

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Saad Dahleb Blida 1

Faculté de Technologie

Département de Mécanique

Option : Énergétique

Mémoire de Master Académique

Titre

Etude énergétique basée sur le modèle « Standard » de l'effet thermoélectrique. Réalisation d'un système de réfrigération hybride : compression-Thermoélectrique refroidi par convection forcée.

Présenté par :

AYMEN SBA.

ABDENOUR AOUICHA.

Encadré par :

Dr. NEHAL.

Année universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Avant tous, nous remercions allah qui nous donne le courage et la patience de faire ce travail, malgré toutes les difficultés.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre encadreur, Monsieur **NEHAL** de nous avoir supervisés, guidés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions lors de nos recherches.

Nous remercions nos chers parents, qui ont toujours été là pour nous, nous remercions nos Frères et Sœurs pour leurs encouragements.

Nous remercions aussi nos collègues pour tout le temps que nous avons partagés ensemble et toutes les connaissances et l'aide que nous avons obtenues d'eux.

Nous remercions notre chef de département Monsieur **BRAHIMI** pour son aide et son assistance durant tout le cursus de formation.

DÉDICACE

Nous dédions ce travail modeste

À la famille, en particulier les parents précieux

En plus de tous amis

Qui nous ont aidés dans notre travail avec l'aide de ce fait,

Que ce soit physique ou morale.

Résumé :

On sait que le refroidissement est un élément essentiel dans la vie de l'individu et pour la société, surtout en été, et il existe de nombreux types de refroidissement.

Dans cette mémoire nous avons faire une étude sur deux de ces types refroidissement par compression et par l'effet thermoélectrique.

Nous avons faire une étude énergétique basée sur le modèle standard de l'effet thermoélectrique.

L'objectif de notre travail est la réalisation d'un système de réfrigération hybride compression et thermoélectrique refroidi par convection forcée.

Cette dernier sera programmé par logiciel arduino puis fera sa conception en fin sa réalisation.

Summary :

It is known that cooling is an essential element in the life of the individual and for the society, especially in summer, and there are many types of cooling.

In this memory we have made a study on two of these types cooling by compression and by the thermoelectric effect.

We have made an energy study based on the standard model of the thermoelectric effect.

The objective of our work is the realization of a hybrid compression and thermoelectric refrigeration system cooled by forced convection.

The latter will be programmed by arduino software then will make its design at the end of its realization.

ملخص :

من المعروف أن التبريد عنصر أساسي في حياة الفرد و المجتمع خاصة فصل الصيف، وهناك أنواع عديدة من التبريد. في هذه المذكرة قمنا بدراسة نوعين من هذه الأنواع من التبريد عن طريق الضغط والتأثير الكهروحراري . لقد قمنا بدراسة الطاقة بناءً على النموذج القياسي للتأثير الكهروحراري. الهدف من عملنا هو تحقيق ضغط هجين و نظام تبريد كهروحراري مبرد بالحمل القسري. سيتم برمجة هذا الأخير بواسطة برنامج أردوينو ثم سيقوم بتصميمه في نهاية تحقيقه.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale 1

Chapitre 01 : bases théoriques sur la production du froid par compression de vapeur

1. Introduction	2
2. Historique	2
3. Principes de production du froid	2
3.1. Circuit fermé	3
3.1.1. Installation frigorifique à compression	3
3.1.2. Installation frigorifique à absorption	3
3.2. Circuit ouvert	4
3.3. Les procédés électriques et magnétiques de production du froid	4
3.4. Refroidissement thermoélectrique par effet Peltier	5
3.5. Désaimantation magnétique	5
4. Applications du froid	6
4.1. Les applications industrielles du froid	6
5. Fonctionnement et composant d'une machine frigorifique	8
5.1. Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique	8
5.2. Les composants de base d'une machine frigorifique	11
5.2.1. Les compresseurs	12
5.2.2. Les condenseurs	13
5.2.2.1. Les condenseurs à air	13
5.2.2.2. Les condenseurs à eau	13
5.2.3. Les détendeurs	14
5.2.4. Les évaporateurs	15
5.2.4.1. Les évaporateurs à eau	15
5.2.4.2. Les évaporateurs à air	16
5.1. Les composants auxiliaires	16
5.1.1. Réservoir liquide	16
5.3.2. Bouteille anti-coup liquide	17
5.3.3. Filtre déshydraté	17
5.3.4. Voyant liquide	17
5.3.5. Thermostat	18
5.3.6. Pressostat	18
6. Les Fluide frigorigène	19
6.1. CODIFICATION ET CLASSIFIDATIONS DES FLUIDES FRIGORIGENE	19
6.2. CLASSIFICATION	19

6.2.1	Fluides inorganiques purs	20
6.2.2	Fluides hydrocarbures	20
6.2.3	Fluides hydrocarbures halogénés	20
6.2.4	Mélange de fluides frigorigènes	21
6.3	R134a	22
7.	Conclusion	24

Chapitre 02 : Bases théoriques sur la thermo électricité

1.	Introduction	25
2.	Historique	25
3.	L'effet Peltier	26
4.	Description	26
5.	Principe de fonctionnement	28
6.	Différents modèles de modules à effet Peltier	30
7.	Elément thermique d'un module Peltier	30
8.	Les applications des modules à effet Peltier	32
8.1.	Effet Seebeck	33
8.2.	Effet Thomson	34
8.3.	Effet Joules	35
8.4.	Relation entre les coefficients Seebeck, Thomson et Peltier	35
9.	Conclusion	35

Chapitre 03: Modélisation et simulation d'une machine frigorifique à effet Peltier en utilisant le modèle standard

1.	Introduction	36
2.	Modélisation simplifiée d'un élément thermoélectrique	36
3.	Etude paramétrique	53
3.1.	Etude paramétrique de la variation de Q_F et COP_F en fonction de l'intensité	41
3.2.	Etude paramétrique de la variation de Q_F et COP_F en fonction de température chaude	43
3.3.	Etude paramétrique de la variation de Q_F et COP_F en fonction de température froid	45
4.	Conclusion	56

Chapitre 04 : Modélisation et Simulation d'une Machine Frigorifique à compression (R134a)

1.	Introduction	47
2.	Modélisation des propriétés thermodynamiques du R134a	47
3.	Les équations de cycle frigorifique	48
4.	Etude paramétrique	53
4.1.	étude paramétrique sur la variation du COP_f en fonction température d'évaporation	53

4.2. étude paramétrique sur la variation du COP_f en fonction température de condensation	54
4.3.étude paramétrique sur la variation de la pression de condensation en fonction température de condensation	55
5. Conclusion	56

Chapitre 05 : Réalisation d'une machine frigorifique à compression de vapeur

1. Introduction.....	57
2. Matériel et outillage nécessaire pour la réalisation	57
3. Les étapes de la réalisation	58
3.1.Etape 1 : réalisation d'un support	59
3.2.Etape 2 : l'installation et assemblage des éléments.....	59
3.2.1. Installation de la tuyauterie	60
3.3.Etape 3 : Installation électrique	62
3.4.Etape 4 : Remplissage du Gaz Frigorigène	63
4. Conclusion	64

Chapitre 06 : Réalisation du système de refroidissement thermoélectrique

1. Introduction	65
2. Matériel et outillage nécessaire pour la réalisation.....	65
3. Les étapes de la réalisation	66
3.1. Etape 1 : la réalisation des radiateurs	68
3.2. Etape 2 : la réalisation de module de refroidissement	69
3.3. Etape 3 : le montage de module sur le frigo.....	70
3.4. Etape 4 : Installation électrique du système.....	71
3.5. Etape 5 : alimentation du système.....	73
4. Conclusion.....	76

Chapitre 07 : Acquisition des données

1. Introduction	77
2. Arduino	77
3. Matériel Arduino	77
4. Les différentes cartes	78
4.1. La carte Arduino Nano	78
4.2. La carte ArduinoZero	78
4.3. Le logiciel Arduino	79
5. Les capteurs	79
5.1. Thermocouples.....	79
5.1.1.MAX6675 Thermocouple	80
5.1.2.Programmation exemple	82
5.2. Les captures DS18B20	83
5.2.1.Câblage de la capture:.....	84
5.2.2.Le montage.....	84
5.2.3.Les Composants utilisé	84

5.2.4. Schéma du montage	85
5.2.5. Programmation exemple.....	85
6. Conclusion	88
Conclusion générale	89
Références	

Liste des figures

Chapitre 01 : bases théoriques sur la production du froid par compression de vapeur

Figure (1.1) : Machine frigorifique à compression.....	3
Figure (1.2) : Machine frigorifique à absorption.....	4
Figure (1.3) : Module thermoélectrique Peltier.....	5
Figure (1.4) : Réfrigérateur magnétique.....	5
Figure (1.5) : Vitrine frigorifique pour des températures proches de l'ambiante grâce à l'usage de nouveaux matériaux.	6
Figure (1.6) : Tunnel de congélation.....	6
Figure (1.7) : Chambre froide	7
Figure (1.8) : Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple.....	9
Figure (1.9) : Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur détaillé.....	10
Figure (1.10) : Cycle P-H d'un système frigorifique à compression de vapeur.	11
Figure (1.11) : Fonctionnement du compresseur.....	12
Figure (1.12) : Compresseur rotatif.....	12
Figure (1.13) : Compresseur hermétique.....	12
Figure (1.14) :- Fonctionnement du condenseur.....	13
Figure (1.15) : Condenseur à convection naturel.....	13
Figure (1.16) : Condenseur à double tube.....	14
Figure (1.17) : Fonctionnement du détendeur.....	14
Figure (1.18) : Détendeur à tube capillaire.....	14
Figure (1.19) : Détendeur électronique.....	15
Figure (1.20) : fonctionnement d'un évaporateur.....	15
Figure (1.21) : Evaporateur immergé.....	15
Figure (1.22) : Evaporateur multitubulaire	16
Figure (1.23) : Evaporateur à convection naturelle	16
Figure (1.24) : Evaporateur à convection forcée.....	16
Figure (1.25) : Réservoir de liquide.....	16
Figure (1.26) : Schéma d'une bouteille anti-coup liquide.....	17
Figure (1.27) : Filtre déshydrater.....	17
Figure (1.28) : Voyant liquide.....	17
Figure (1.29) : Thermostat.....	18
Figure (1.30) : Pressostat HP, BP et mixte.....	18
Figure (1.31) : Fonctionnement du pressostat basse pression	19
Figure (1.32) : diagramme R134a	23
Figure (1.33) : bouteille du r134a	24

Chapitre 02 : Bases théoriques sur la thermo électricité

Figure (2.1) : Schéma descriptif de module Peltier	27
Figure (2.2) : Module Peltier TEC1-12706	27
Figure (2.3) : Signification d'un module Peltier	28
Figure (2.4) : Schéma de Principe.....	29
Figure (2.5): Modèle Peltier cascade.....	30
Figure (2.6) : Modèle Peltier rectangulaire et circulaire... ..	30

Figure (2.7) : schéma des éléments thermiques d'un module Peltier	30
Figure (2.8) : la conception d'un module Peltier.....	31
Figure (2.9) : Schéma des composants d'un module Peltier.....	31
Figure (2.10) : (a) réfrigérateur portable, (b) siège automobile	32

Chapitre 03: Modélisation et simulation d'une machine frigorifique à effet Peltier en utilisant le modèle standard

Figure (3.1) : schéma des propriétés d'un module Peltier	36
Figure (3.2) : organigramme d'une modélisation Peltier	38
Figure (3.3) : Une courbe représentant la variation du COP_f en fonction de L'intensité.....	42
figure (3.4) : Une courbe représentant la variation Q_f en fonction de l'intensité (I).....	42
Figure (3.5) : Une courbe représentant les changements de COP_F en fonction de Température chaud.....	43
Figure (3.6) : Une courbe représentant les changements de Température chaud en fonction Q_F	44
Figure (3.7) : Une courbe représentant les changements de COP_F en fonction Température froid.....	45
Figure (3.8) : Une courbe représentant les changements de Q_F en fonction Température.....	46

Chapitre 04 : Modélisation et Simulation d'une Machine Frigorifique à compression (R134a)

Figure (4.1) : Schéma d'un Cycle frigorifique	48
Figure (4.2) : organigramme d'un Modélisation compresseur	50
Figure (4.3) : cycle thermodynamique d'une machine frigorifique.....	51
Figure (4.4) : une courbe représente la variation du COP_f en fonction de T_{evap} avec la fixation T_{cond}	53
Figure (4.5) : une courbe représente la variation du COP_f en fonction T_{cond} de avec la fixation T_{evap}	54
Figure (4.6) : une courbe représente la variation de la pression de condensation en fonction température de condensation avec la fixation de température de l'évaporation.	55

Chapitre 05 : Réalisation d'une machine frigorifique à compression de vapeur

Figure (5.1) : le matériel et l'outillage utilisés pour la réalisation de projet.....	57
Figure (5.2) : Organigramme des étapes de la réalisation.....	58
Figure (5.3) : la réalisation d'un support.....	59

Figure (5.4) : Schéma d'assemblage	59
Figure (5.5) : la soudure entre la sortie de compresseur et l'entrée de condenseur	60
Figure (5.6) : Création	60
Figure (5.7) : soudure entre le capillaire et le filtre	60
Figure (5.8) : soudure entre le capillaire et l'évaporateur	60
Figure (5.9) : la Cintrreuse	60
Figure (5.10) : la vanne le Mano BP	61
Figure (5.11) : la Vanne et le Mano HP	61
Figure (5.12) : Réglage de pressostat	61
Figure (5.13) : Schéma de l'installation électrique	62
Figure (5.14) : boîte de jonction	62
Figure (5.14): Le Tirage Au vide	63
Figure (5.15) : Remplissage Du Gaz Frigorigène (R12)	64
Figure (5.16) : début de congélation de l'échangeur	64

Chapitre 06 : Réalisation du système de refroidissement thermoélectrique

Figure (6.1) : le matériel et l'outillage utilisé pour la réalisation	65
Figure (6.2) : un organigramme des étapes de la réalisation coté thermoélectrique	66
Figure (6.3) : le coupage des morceaux d'aluminium	67
Figure (6.4) : les morceaux d'aluminium	67
Figure (6.5) : vue de dessus de radiateur	67
Figure (6.6) : vue de coté de radiateur	67
Figure (6.7) : dessin technique d'un radiateur	68
Figure (6.8) : la fixation des ventilateurs sur les radiateurs	69
Figure (6.9) : La fixation des Peltier avec la patte thermique	69
Figure (6.10) : l'assemblage final de module de refroidissement	70
Figure (6.11) : l'ouverture du frigo et la plaque du bois	70
Figure (6.12) : Le montage de module de refroidissement	71
Figure (6.13) : schéma électrique du système	71
Figure (6.14) : câblage des fils	72
Figure (6.15) : Câblage des Switch	72
Figure (6.16) : câblage d'afficheur	72
Figure (6.17) : alimentation de 12V	73
Figure (6.18) : le câblage d'alimentation dans l'unité	73
Figure (6.19) : le montage d'afficheur LCD sur l'unité	74

Figure (6.20) : le montage du petit afficheur de température sur la plaque.	74
Figure (6.21) : le trou sur le coté de frigo	75
Figure (6.22) : le rentré d'échangeur dans le frigo.....	75
Figure (6.23) : réalisation globale de projet.....	76

Chapitre 07 : Acquisition des données

Figure (7.1) : Carte Arduino NANO.....	78
Figure (7.2) : Carte arduino ZERO.....	78
Figure (7.3) : thermocouple.....	79
Figure (7.4) : Schéma Simplifié d'un thermocouple.....	80
Figure (7.5) : Brochage de module MAX6675.....	80
Figure (7.6) : Composants utilisé pour le branchement	81
Figure (7.7) : Montage D'un thermocouple avec arduino.....	81
Figure (7.8) : Capteur DS18B20 en boitier TO-92.....	83
Figure (7.9) : Capteur DS18B20 sonde étanche.....	83
Figure (7.10) : Schéma de câblage d'un capteur	84
Figure (7.11) : Le montage de capteur avec la carte arduino	84
Figure (7.12) : schéma du montage capture DS18B20.....	85
Figure (7.13) : Un afficheur cristaux liquide de 20 car. x 4 lignes sur bus I2C.....	85
Figure (7.14) : Afficheur LCD 22*4.....	87
Figure (7.15) : Le module Bluetooth HC-05.....	87
Figure (7.16) : Schéma de Câblage arduino avec le module HC05.....	88

Liste Des Tableaux

Chapitre 01 : bases théoriques sur la production du froid par compression de vapeur

Tableau (1.1) : gammes de températures de différentes applications du froid.	8
Tableau (1.2) : Les classifications des fluides frigorigène.....	21
Tableau (1.3) : les types des fluides frigorigènes avec ces applications.....	22
Tableau (1.4) : propriétés physique du r134a	24

Chapitre 03: Modélisation et simulation d'une machine frigorifique à effet Peltier en utilisant le modèle standard

Tableau (3.1) : Expressions des performances optimales d'une PACTE, en fonction de la modélisation retenue.....	37
Tableau (3.2) : les données d'exemple.....	39
Tableau (3.3) : les résultats d'exemple.....	40
Tableau (3.4) : la variation de COP et Qf en fonctions de l'intensité (I).....	41
Tableau (3.5) : la variation de température chaude (Tc) aux fonctions du COP_f et le Q_f	43
Tableau (3.6) : la variation de température chaude (Tf) aux fonctions du COP_f et le Q_f.....	45

Chapitre 04 : Modélisation et Simulation d'une Machine Frigorifique à compression (R134a)

Tableau (4.1) : coefficients des équations polynomiales des propriétés physique	49
Tableau (4.2) : les données	51
Tableau (4.3) : les résultats	52
Tableau (4.4) : la variation du COP_f en fonction de T _{evap} avec la fixation de T _{cond}	53
Tableau (4.5) : la variation du COP_f en fonction T _{cond} de avec la fixation T _{evap}	54
Tableau (4.6) : la variation de la pression de condensation en fonction température de condensation la fixation de température de la l'évaporation.....	55

Nomenclature

Q_{evap} : Puissance Frigo	(kW)
I : intensité	(A)
P : puissance électrique	(W)
R : résistance électrique	(Ω)
T : température	(K)
U : tension	(V)
Z : facteur de mérite	(K ⁻¹)
ΔT : écart de température (T _C – T _F)	(K)
ρ : résistivité électrique,	(Ω.m)
Q: Quantité de chaleur	(w)
S : surface	(m ²)
C_p: Chaleur massique spécifique	(J/kg°C)
h: Enthalpie	(J.kg ⁻¹ .°C)
S : Entropie	(J.kg ⁻¹ .°C)
k: Coefficient d'échange convectif	(W.m ⁻² .°C ⁻¹)
L: Longueur	(m)
Chaleur latente du réfrigérant	(J/kg)
SC, s: Surchauffe	

SAT: Saturation

Ω : Ohm

LCD : Liquide Crystal Display

Tr/min: Tour par minute

COP : coefficient de performance

M : moyen

F : côté froid

C : côté chaud

τ : coefficient Thomson

$^{\circ}\text{C}$: Degré Celsius

Cm: Centimètre

J: Joule

M : mètre

Π : Coefficient Peltier entre les conducteurs 1 et 2



Introduction générale

Introduction générale :

Le refroidissement est un processus de production à basse température qui se produit lorsque

La chaleur est retirée d'une substance. Le refroidissement peut être effectué à l'aide de glace, ou des machines. Pendant des milliers d'années, les gens ont utilisé une certaine forme de réfrigération, à la fois pour refroidir les boissons et pour conserver les aliments.

Depuis le milieu du XIXe siècle, la réfrigération a été largement utilisée pour préserver les aliments de

La détérioration. Avec l'amélioration des puissances des circuits et des vitesses d'exploitation des systèmes électroniques avec des composants de tailles diverses dont certains présentent un fort dégagement de chaleur. Cette dissipation de chaleur rend la conception thermique plus critique.

Pour assurer la précision du système, il est impératif de garder tous les composants opérant dans les limites des températures optimales.

Il en résulte que l'étude du refroidissement des composants électroniques devient nécessaire afin de permettre à ces systèmes de fonctionner sous des contraintes thermiques idéales.

L'objectif de cette mémoire est faire une étude énergétique basé sur le modèle standard de l'effet thermoélectrique et la réalisation d'un système de réfrigération hybride compression(R134a) avec thermoélectrique refroidi par la convection forcé.

Ce projet de fin d'étude est partagé en trois grandes parties et chaque partie à des chapitres. La première partie porte sur la revue bibliographique générale comportant deux chapitres dont:

1) une base théorique sur la production du froid et ces applications avec généralité sur le

Fluide frigorigène.

2) Généralité sur thermoélectricité et ces différents les effets.

Le deuxième axe porte sur la modélisation et la simulation qui se compose par deux chapitres dont :

1) la modélisation et la simulation du modèle standard de l'effet thermoélectrique (l'effet Peltier).

2) La modélisation et la simulation du compresseur et le fluide frigorigène R134a Le troisième axe porte sur la conception et la réalisation et acquisition des donnée de système de notre projet qui se compose par trois chapitres :

1) La réalisation du système de réfrigération par compression du vapeur.

2) La réalisation de module de refroidissement.

3) L'acquisition des données.



Chapitre 01 : Bases théoriques Sur la production Du froid par compression de vapeur

1. Introduction :

La production du froid est équivalente à une absorption de chaleur, car refroidir un corps ne consiste pas à lui donner une quantité de froid (c'est-à-dire, du point de vue physique le froid n'existe pas), mais à lui enlever une quantité de chaleur.

Dans le chapitre nous avons fait une base théorique sur la production du froid et leur historique avec les types de la production et ces domaines d'application.

Ensuite nous avons fait la description des fluides frigorigènes et leur classification et codification et ces domaines d'utilisation.

2. Historique :

En 1834, l'américain Jacob Perkins invente une machine à compression de vapeur (en cycle fermé) en utilisant comme fluide frigorigène l'éthyle éther. Un seul prototype fut construit. Une vingtaine d'années plus tard, l'écossais James Harrison, dépose un brevet sur une idée très proche (en utilisant le même fluide frigorigène : l'éthyle éther). Ce fluide est inflammable et toxique mais c'est le seul fluide qui sera utilisé dans les quelques machines à compression fabriquées jusqu'à la fin du siècle. [1]

Durant cette période deux autres principes vont être utilisés pour la production artificielle de froid : les cycles à air et les cycles à absorption.

Le cycle à air a été utilisé la première fois par l'américain John Gorrie, médecin en Floride, qui souhaitait produire de la glace pour améliorer le confort de ses patients. La première machine construite sur ce principe le fut en 1844. Par crainte de réactions hostiles de ses citoyens compte tenu des préjugés religieux de l'époque ("Seul Dieu était capable de produire de la glace et de la neige"), l'invention resta cachée. Gorrie obtint cependant un brevet américain en 1851. La machine utilisant le cycle à air connu, malgré des performances énergétiques médiocres, un grand succès à la fin du siècle. [2]

La machine à absorption a été inventée en 1859 par le français Ferdinand Carré qui choisit comme fluide frigorigène l'ammoniac. Le succès de cette machine fut rapide, tout particulièrement aux Etats-Unis. Cette machine domina largement les autres types de machines jusqu'en 1875. On notera que la théorie sur les systèmes à absorption fut développée bien plus tard, en 1913, par l'allemand Edmund Altenkirch.

Les machines à compression ne connurent une réelle industrialisation qu'à partir de 1870 quand des fluides frigorigènes moins dangereux que l'éthyle éther furent proposés: dioxyde de soufre (SO₂), chlorure de méthylène, dioxyde de carbone (CO₂). [3]

A proprement parlé, la naissance de la technologie de la production du froid (par technologie nous entendons l'utilisation d'outils intellectuels et de théories pour la conception et la réalisation de machines) peut être datée du début du 20^e siècle : la prédominance des machines à compression de fluides liquéfiables était devenue effective et la production artificielle de plus en plus importante. Il fallut toutefois attendre l'année 1915 pour que dans le pays le plus moderne de l'époque, les Etats-Unis, la production artificielle de glace dépasse la production "naturelle" de glace.

3. Principes de production du froid :

Produire du froid, c'est tout simplement absorber de la chaleur à une température inférieure à la température ambiante. Ainsi le refroidissement d'un corps quelconque en dessous de la température

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

ambiante nécessite l'utilisation d'un mécanisme endothermique. La chaleur alors extraite du corps est ensuite rejetée dans le milieu ambiant: air ou eau. Parmi les nombreux mécanismes sont endothermiques, diverses transformations peuvent être citées : [4]

3.1. Circuit fermé :

Ces procédés utilisant l'évaporation d'une phase liquide et le fluide suivent un cycle à compression, à absorption ou adsorption.

3.1.1. Installation frigorifique à compression :

L'installation frigorifique à compression (figure 1.1) est l'installation qui est la plus fréquemment utilisée pour la production du froid. Ici on met à profit l'effet consistant en ce que l'évaporation d'un liquide s'accompagne d'une forte absorption de chaleur. Lors de la condensation de la vapeur, la chaleur est de nouveau émise.

Grâce aux différentes pressions survenant lors de l'évaporation et de la condensation, les niveaux de température peuvent être ajustés de telle sorte qu'il se produise un transport de chaleur du côté froid vers le côté chaud.

Comme dans ce cas, l'agent réfrigérant circule dans un circuit fermé. Au lieu du compresseur à piston présenté, on peut également utiliser des compresseurs à vis, des compresseurs scroll, des turbocompresseurs ou des compresseurs à éjection de vapeur.

Comme agent réfrigérant, on utilise des liquides à ébullition légère comme les hydrocarbures fluorés (HF), du propane, du CO₂ ou du NH₃. [5]

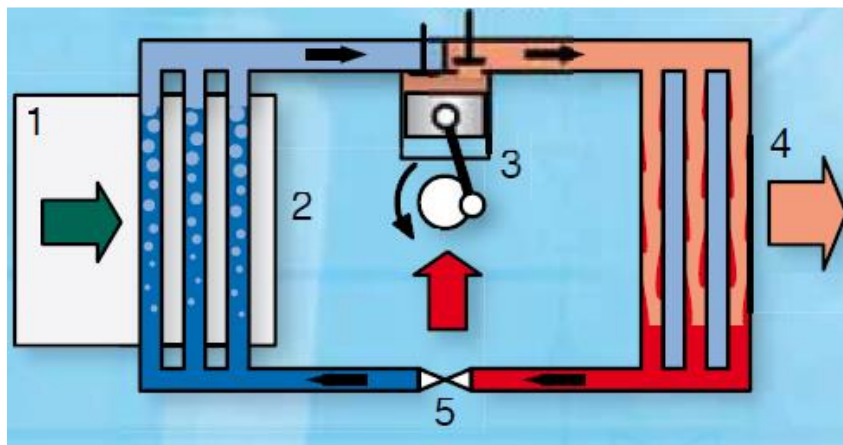


Figure (1.1) : Machine frigorifique à compression.

Dans le cas le plus simple, une installation frigorifique à compression se compose d'un évaporateur (2) installé dans la pièce devant être refroidie (1), d'un compresseur (3), d'un condenseur (4) et d'un élément d'expansion (5).

3.1.2. Installation frigorifique à absorption :

Dans le cas d'une installation à absorption, Figure (1.2) on utilise de l'ammoniaque (NH₃) comme agent réfrigérant. Comme dans une installation frigorifique à compression, l'ammoniaque liquide s'évapore dans un évaporateur. Dans un absorbeur, l'ammoniaque en forme de vapeur est ensuite dissoute dans de l'eau. La solution ammoniacale est chauffée, de telle sorte que l'ammoniaque dégage sous forme

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

de vapeur. Dans un condenseur, la vapeur ammoniacale est de nouveau condensée pour en faire de l'ammoniaque liquide.

Afin de pouvoir établir une différence de température entre l'évaporation et la condensation, il faut créer une différence de pression. Celle-ci est produite par une pompe pour la solution ou pour ce que l'on appelle un gaz auxiliaire (hydrogène H₂). Lors de l'utilisation du gaz auxiliaire, on peut faire l'économie d'une pompe et l'installation frigorifique ne possède pas de pièces mobiles. L'arrivée de l'énergie d'entraînement s'effectue via le bouilleur et elle est uniquement thermique. Le réchauffement du bouilleur peut s'effectuer électriquement ou avec du gaz. On peut également utiliser la chaleur perdue ou l'énergie solaire. [6]

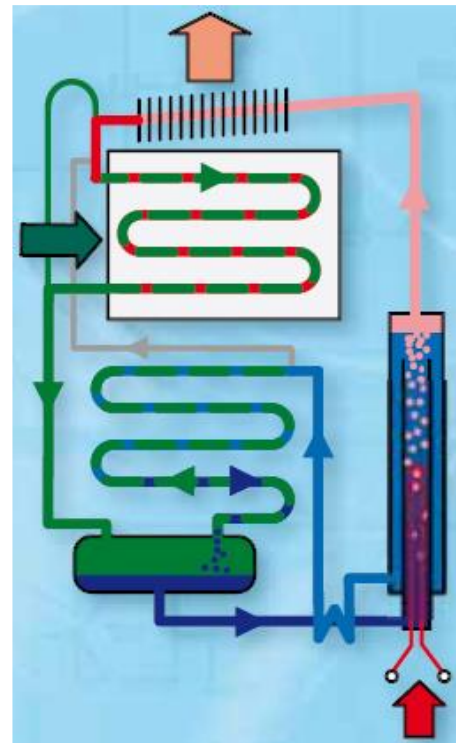
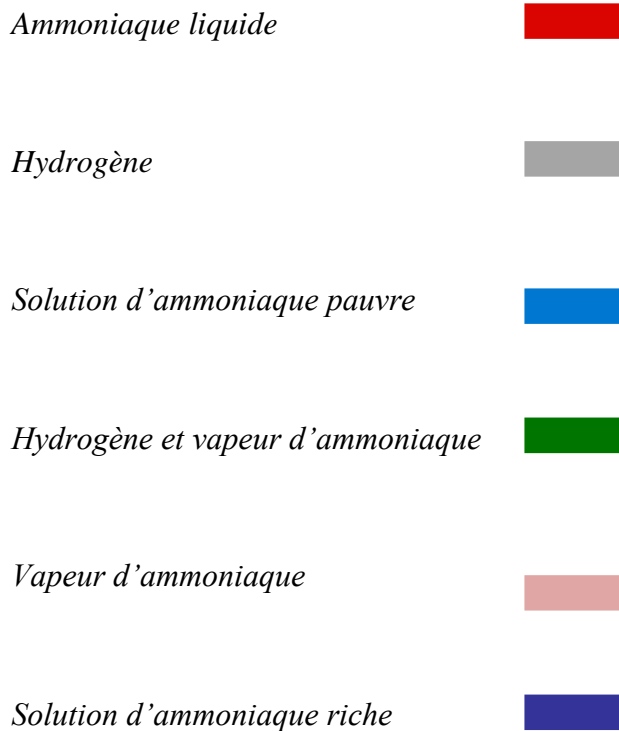


Figure (1.2) : Machine frigorifique à absorption

3.2. Circuit ouvert :

les fluides retenus sont largement conditionnés par les niveaux de températures recherchés : on peut ainsi utiliser l'évaporation de l'azote liquide (chaleur de vaporisation à la pression atmosphérique = 200 kJ/kg à la température de -196°C), la sublimation de la glace carbonique (chaleur de sublimation = 500 kJ/kg à la pression atmosphérique et à la température de -78,6°C), la fusion de la glace (chaleur de fusion = 340 kJ/kg à la pression atmosphérique et à la température de 0°C), l'évaporation de l'eau sous vide (chaleur de vaporisation = 2000 kJ/kg à 0°C). [7]

3.3. Les procédés électriques et magnétiques de production du froid :

Ils peuvent être regroupés en deux familles.

3.4. Refroidissement thermoélectrique par effet Peltier :

Si on fait circuler un courant électrique à travers un circuit hétérogène constitué par une série de barreaux semi-conducteurs placés entre deux jonctions conductrices, on constate un refroidissement de l'une des jonctions et un réchauffement de l'autre. Cet effet Figure (1.3) est réversible selon le sens du courant. Il ne fonctionne donc qu'avec du courant continu. Si l'on maintient la face chaude à température constante par échange thermique avec le milieu ambiant, on peut avoir une production frigorifique sur la face froide. [8]

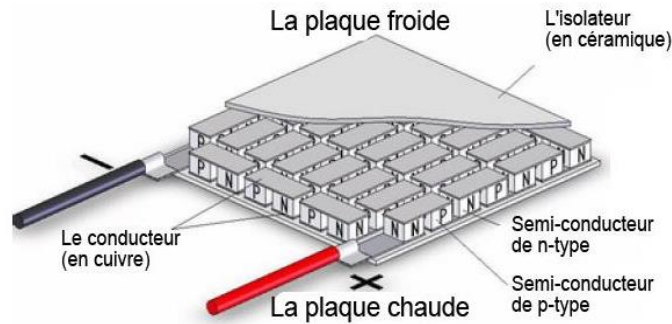


Figure (1.3) : Module thermoélectrique Peltier.

3.5. Désaimantation magnétique :

Certaines substances paramagnétiques placées sous champ magnétique et soumis ensuite à une désaimantation de type adiabatique se refroidissent. Cette propriété est utilisée à très basse température (proche du zéro absolu) lorsque les procédés habituels de refroidissement par abaissement de la pression sur un liquide en ébullition ($He+4$ ou $He+3$) ne sont plus utilisables. A titre indicatif, la température limite obtenue par pompage sur un bain d' $He+4$ est d'environ 0,7K (pompage en vide primaire + secondaire) et de 0,3K sur un bain d' $He+3$ (cryopompage par zéolithes).

Ces techniques sont essentiellement réservées au domaine de la recherche en physique mais elles connaissent depuis quelques années un regain d'intérêt Figure (1.4). [9]

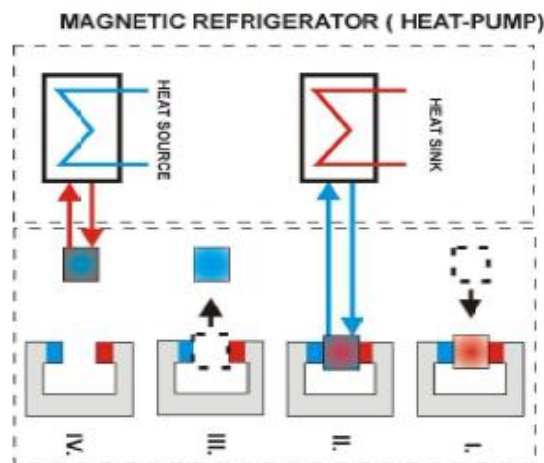


Figure (1.4) : Réfrigérateur magnétique.

4. Applications du froid :

Le froid a de nombreuses applications dont les principales sont les suivantes :

Parmi les applications industrielles du froid, on peut citer :

- Domaine médical : cryochirurgie, conservation de certains produits.
- Industries alimentaires : conservation des aliments Figure (1.5), Pasteurisation des liquides...
- Industries chimiques et pétrochimiques : liquéfaction des gaz.
- Génie civil : refroidissement des bétons.
- Conditionnement des locaux : rafraîchissement de L'air, conditionnement des patinoires, canons à neige...



Figure (1.5) : Vitrine frigorifique pour des températures proches de l'ambiante grâce à l'usage de nouveaux matériaux.

4.1. Les applications industrielles du froid :

Parmi les applications industrielles du froid peut citer : le traitement thermique des pièces métalliques (glace carbonique), l'ébarbage de pièces en caoutchouc (glace carbonique), la concentration de solutions aqueuses (épaississement d'extraits végétaux, entre autres), le contrôle de température de réacteurs chimiques ou de futs de vinification. Figure (1.6) [10]



Figure (1.6) : Tunnel de congélation.

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

Une application particulièrement importante qui utilise des techniques frigorifiques est la production de Gaz Naturel Liquéfié (GNL). La liquéfaction du gaz, constitué de 90% de méthane, présente un avantage évident pour le transport et le stockage : à la pression atmosphérique, la phase gazeuse occupe un volume 600 fois plus grand qu'à l'état liquide. Le processus de liquéfaction nécessite la production de froid à des niveaux de température inférieurs ou égaux à -160°C .

De même la liquéfaction du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), mélange de butane et de propane, est un processus nécessitant des productions frigorifiques importantes pour des températures comprises entre 0 et -40°C .

Les gaz industriels liquéfiés sont des gaz séparés de l'air (N_2 , O_2 , Argon) et autres (hélium, acétylène). Les techniques de production de ces gaz reposent sur une séparation par distillation et font appel à des techniques frigorifiques. L'usage de ces gaz industriels, rarement utilisés sous forme liquide mais plus souvent sous forme gazeuse, est varié :

- En sidérurgie et métallurgie (50% du marché des gaz purs) : l'oxygène est utilisé pour éliminer les impuretés lors de la production d'acier, l'acétylène et l'oxygène sont utilisés pour les soudures autogènes, l'azote pour l'inertage des ambiances.
- En chimie pour l'inertage, l'extraction d'arômes, la concentration à froid.
- En électronique pour les atmosphères contrôlées, le gaz vecteur pour les dépôts de Si.
- En agro-alimentaire pour la surgélation, l'atmosphère inerte.
- dans le secteur médical pour la conservation des cellules, le traitement cryogénique. Figure (1.7)



Figure (1.7) : Chambre froid

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

A quoi s'ajoutent les applications relatives à la protection de l'environnement telles que le piégeage par le froid des solvants (composé organique volatil) contenus dans les effluents gazeux, et les applications diverses telles que les patinoires, le désembuage des aéroports, la production de neige artificielle.

REFRIGERATION CLASSIQUE	GAMMES DE TEMPERATURES (°C)	APPLICATIONS
Conditionnement d'air	+16 à +26	Confort humain
Réfrigération des denrées	0 à +10	Conservation des aliments à court/moyen terme
Congélations des denrées	-35 à 0	Conservation des aliments à long terme
Lyophilisation	-80 à -30	Dessiccation à basse température
Traitements divers	-200 à 0	Applications chimiques Essais thermiques des matériaux
CRYOGENIE	GAMMES DE TEMPERATURES	APPLICATIONS
Liquéfaction du gaz naturel	93 à 113	Transport en phase liquide (méthanier)
Liquéfaction de l'air	70 à 80	Distillation
Liquéfaction de l'hydrogène	14 à 30	Recherche nucléaire
Liquéfaction de l'hélium	1 à 5	Supraconductivité
Méthodes magnétiques	10^{-3} à 10^{-2}	Recherche fondamentale

Tableau (1.1) : gammes de températures de différentes applications du froid.

5. Fonctionnement et composant d'une machine frigorifique :

5.1. Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique:

Le principe consiste à prendre de la chaleur dans un circuit d'utilisation, à l'intérieur d'une pièce par exemple, et à la restituer (l'évacuer) dans un circuit de refroidissement (extérieur de l'habitation). Le transport de l'énergie est assuré par un compresseur, dont l'énergie propre doit être elle aussi dissipée (évacuée) dans le circuit de refroidissement (Condenseur).

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

Le fluide frigorigène produit du froid en s'évaporant dans l'évaporateur, (il enlève de la chaleur : chaleur latente de vaporisation). Il doit pouvoir s'évaporer et se condenser facilement.

Le système frigorifique à compression de vapeur le plus courant fonctionne grâce à un frigorigène situé dans un circuit fermé comprenant un compresseur Figure (1.8), un condenseur, un organe de détente, un évaporateur et des tuyauteries de raccordement [11]

La vapeur du 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 (WC) consommée par le compresseur.

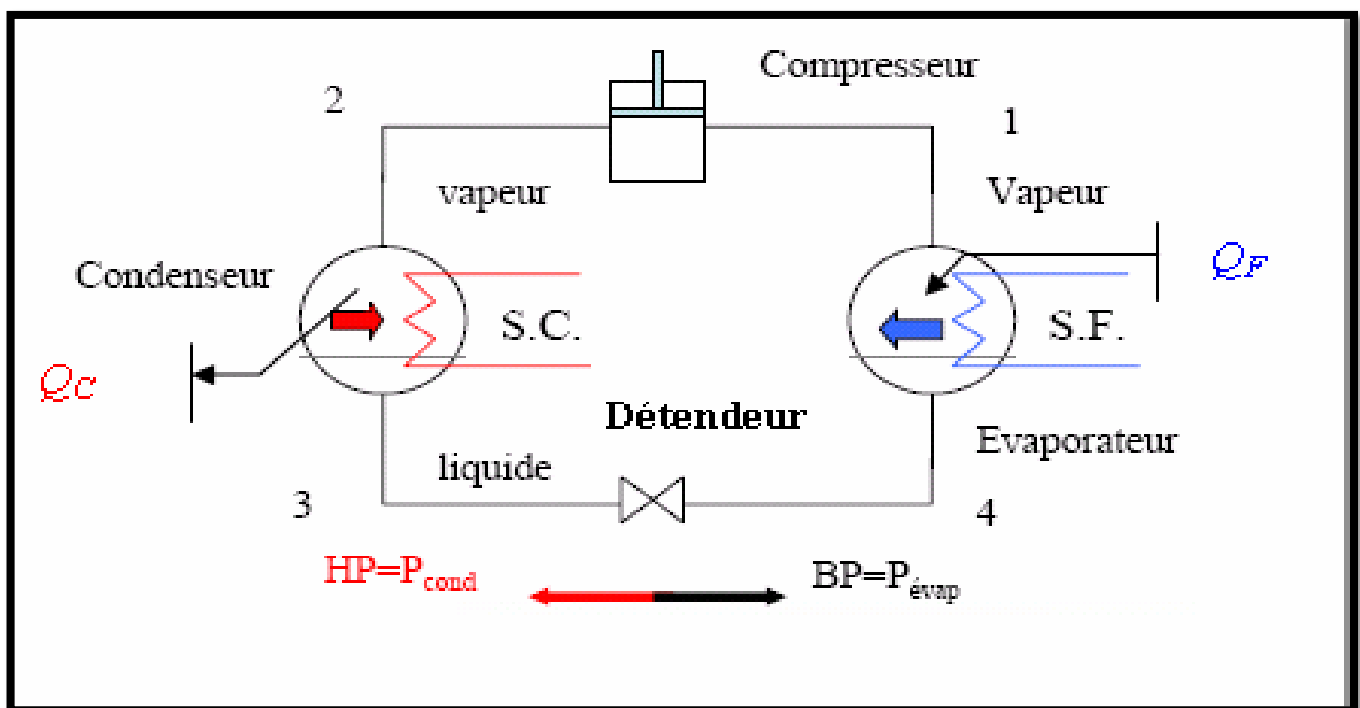


Figure (1.8) : Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple.

Le cycle de fonctionnement d'un tel circuit se décompose en quatre étapes Figure (1.9) :

- 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.

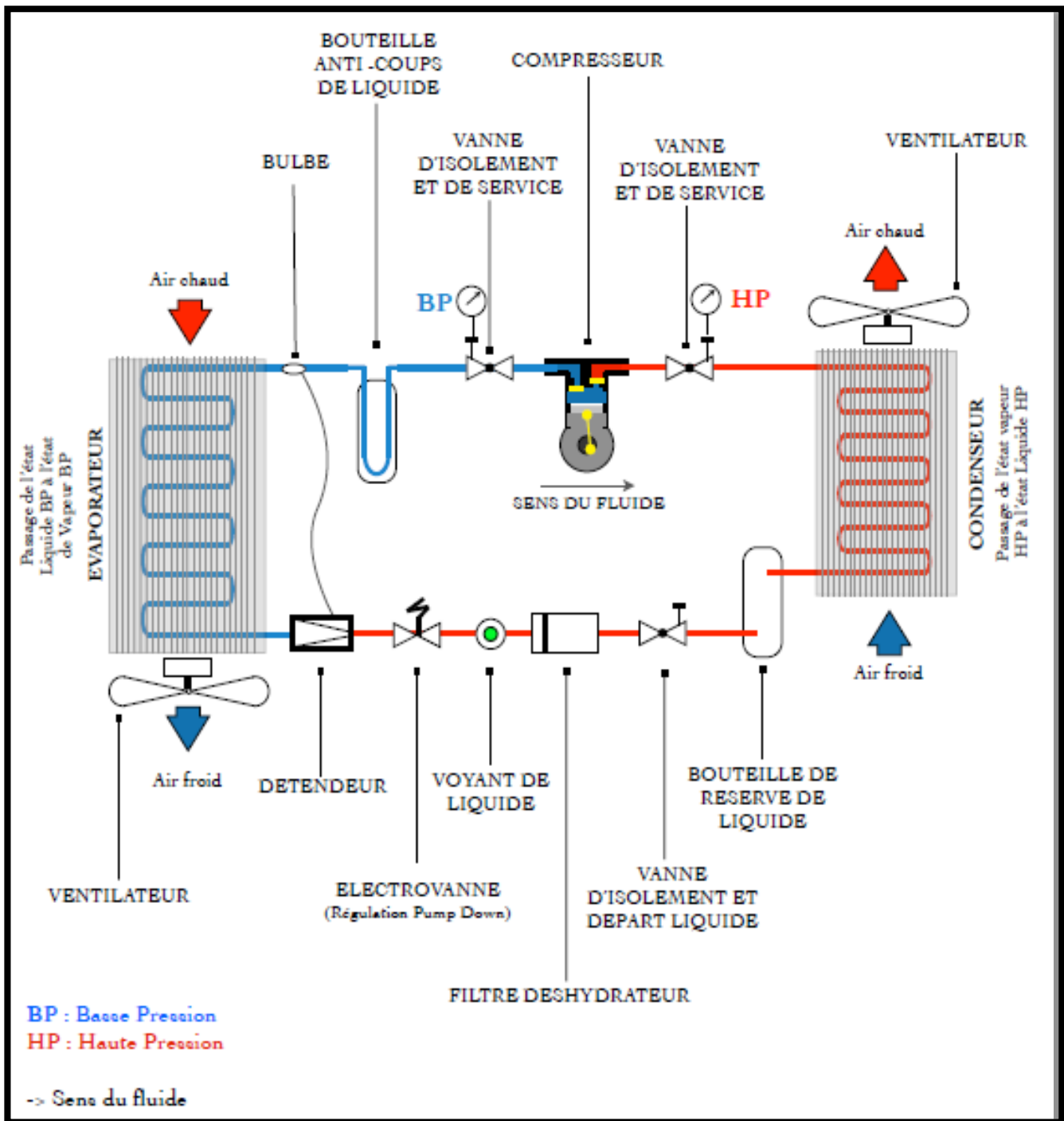


Figure (1.9) : Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur détaillé. [12]

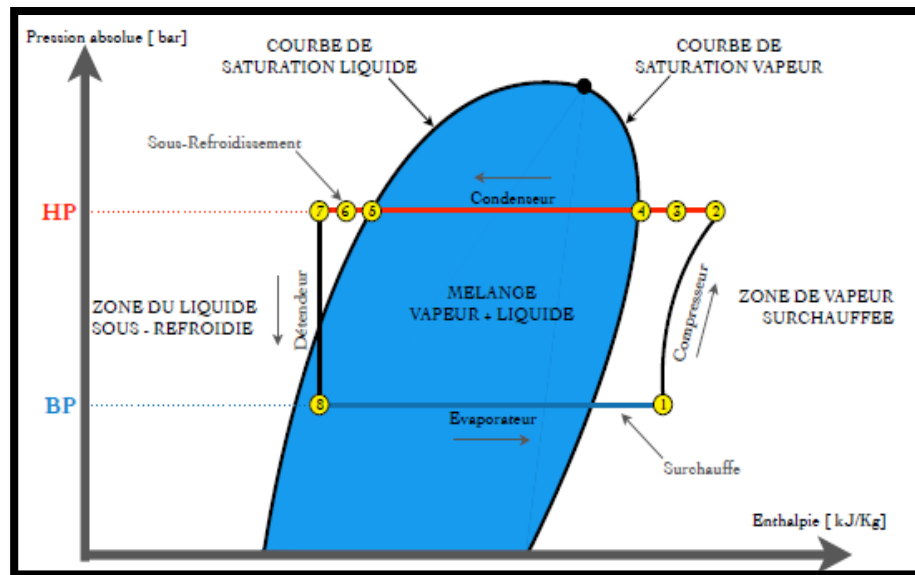


Figure (1.10) : Cycle P-H d'un système frigorifique à compression de vapeur.

Les états successifs du fluide frigorigène dans le circuit **Figure (1.10)** :

(1) - Température BP entrée du compresseur (Etat du fluide : Vapeur BP).

(2) - Température HP sortie du compresseur (Etat du fluide : Vapeur HP).

(3) - Température HP entrée du condenseur (Etat du fluide : Vapeur HP).

Zone de désurchauffe de (3) vers (4) (Etat du fluide : Vapeur HP).

Zone de condensation de (4) vers (5) (Etat du fluide : Passage de l'état vapeur à l'état liquide HP).

(6) - Température sortie de condenseur (Etat du fluide : Liquide HP).

(7) - Température entrée détendeur (Etat du fluide : Liquide HP).

(8) - Température sortie détendeur (Etat du fluide : Liquide BP).

Zone d'évaporation de (8) vers (9) (Etat du fluide : Passage de l'état liquide à l'état vapeur BP).

(9) - Température sortie évaporateur, (Etat du fluide : Vapeur BP).

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

5.2. Les composants de base d'une machine frigorifique :

La machine frigorifique à compression de vapeur est composée de 4 organes principaux sont [13] :

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

5.2.1. Les compresseurs :

Aspire le fluide frigorigène gazeux (à bas niveau de température et de pression) issu de l'évaporateur, le comprime à un niveau plus haut de température et de pression puis le refoule vers le condenseur. Figure (1.12) .[14]

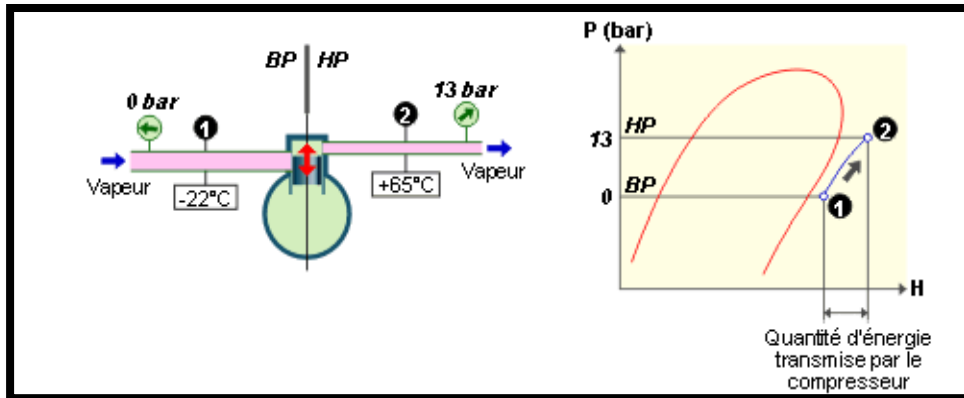


Figure (1.11) : Fonctionnement du compresseur.



Figure (1.12) : Compresseur rotatif.

Le moteur électrique et le compresseur sont enfermés dans la même enveloppe sans possibilité d'accès « en principe » à chacune des parties de manière isolée, l'ensemble est supporté généralement par ressorts pour éviter la transmission des vibrations. Figure (1.13)

Ce type de compresseur est utilisée pour les petites puissances (réfrigérateurs, climatiseurs...) et les moyennes puissances (refroidisseurs de liquides, armoires de climatisation...).



Figure (1.13) : Compresseur hermétique.

5.2.2. Les condenseurs :

C'est un échangeur de chaleur qui va permettre l'évacuation de la chaleur contenue dans le fluide frigorigène gazeux issu du compresseur en le liquéfiant. Cette condensation (liquéfaction) est obtenue par le refroidissement du fluide frigorigène gazeux à pression constante par un médium qui peut être de l'eau ou de l'air. Figure (1.14) [16]

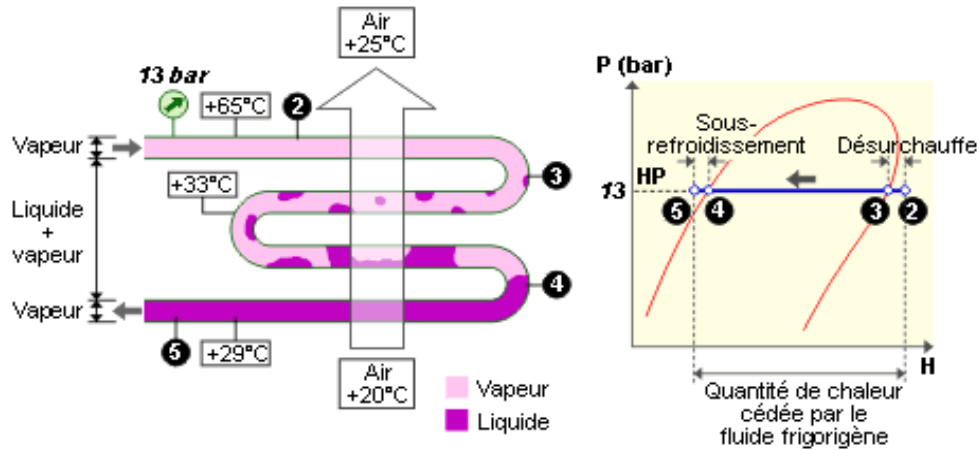


Figure (1.14) :- Fonctionnement du condenseur.

On distingue deux familles de condenseurs suivant le fluide de refroidissement :

- Les condenseurs à air.
- Les condenseurs à eau.

5.2.2.1. Les condenseurs à air :

Il existe deux types de condenseur à air à savoir les condenseurs à convection naturelle (sans ventilateur) et les condenseurs à convection forcée (utilisation d'un ventilateur pour la circulation forcée de l'air). Figure (1.15)

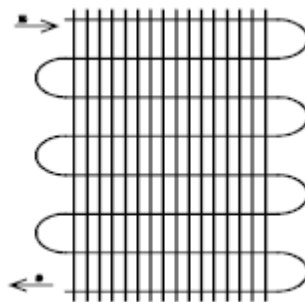


Figure (1.15) : Condenseur à convection naturel.

5.2.2.2. Les condenseurs à eau :

Parmi les condenseurs à eau on peut citer :

- Les condenseurs à double tube. Figure (1.16)

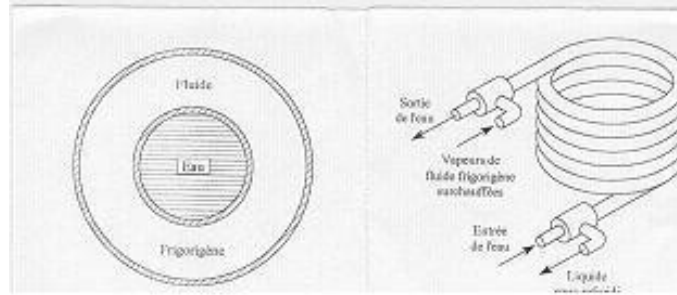


Figure (1.16) : Condenseur à double tube.

- Les condenseurs bouteilles.
- Les condenseurs multitubulaires.

5.2.3. Les détendeurs :

Permettent de réduire la pression du fluide frigorigène liquide (création de pertes de charge) issu du condenseur avant son introduction dans l'évaporateur dans le but de permettre sa vaporisation à basse température dans l'évaporateur. Il régule aussi la quantité de fluide frigorigène liquide arrivant à l'évaporateur en fonction des besoins de "froid" (uniquement pour les détendeurs thermostatiques). Figure (1.17) [17]

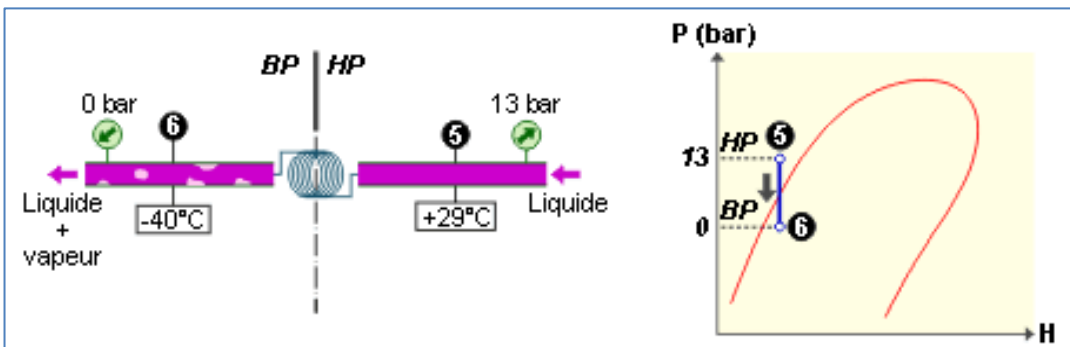


Figure (1.17) : Fonctionnement du détendeur

Les détendeurs sont destinés à l'alimentation des évaporateurs en fluide frigorigène.

- Les tubes capillaires. Figure (1.18)



Figure (1.18) : Détendeur à tube capillaire.

- Les détendeurs électroniques. Figure (1.19)

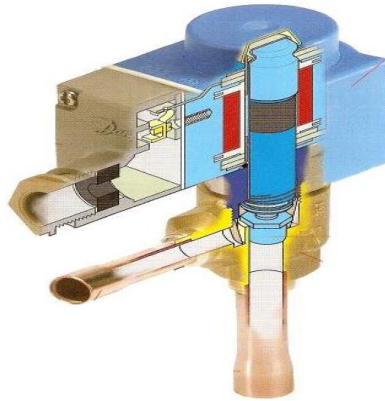


Figure (1.19) : Détendeur électronique.

5.2.4. Les évaporateurs :

C'est un échangeur de chaleur dans lequel le fluide frigorigène liquide à bas niveau de température et de pression va absorber la chaleur du milieu à refroidir (air ou eau) à pression constante devenant ainsi gazeux. Figure (1.20) [18]

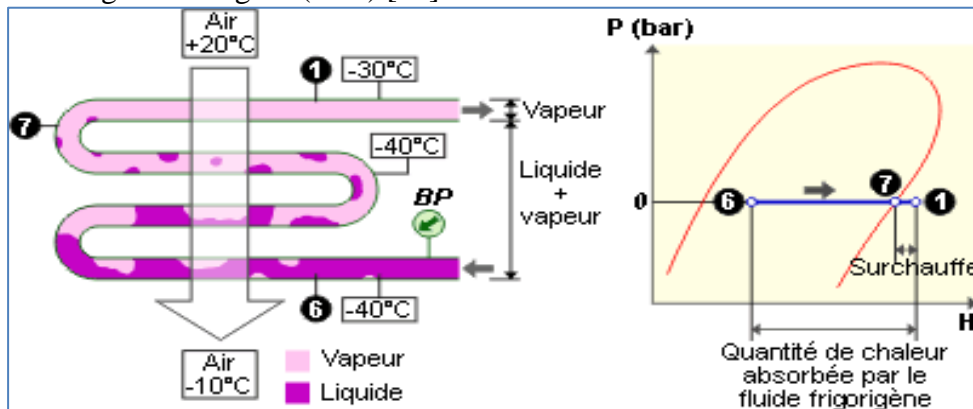


Figure (1.20) : fonctionnement d'un évaporateur.

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

- Les évaporateurs à eau.
- Les évaporateurs à air.

5.2.4.1. Les évaporateurs à eau :

La congélation de l'eau ou de toute solution aqueuse conduit à une augmentation du volume qui peut endommager l'évaporateur ; d'où la nécessité de se prémunir contre cette congélation (utilisation de saumures, contrôleur de débit...).

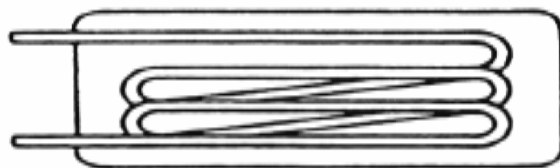


Figure (1.21) : Evaporateur immergé.

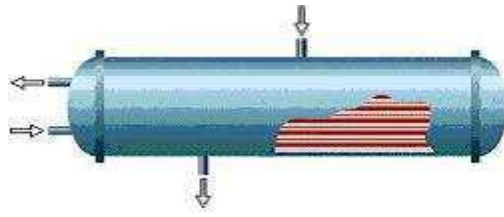


Figure (1.22) : Evaporateur multitubulaire.

5.2.4.2. Les évaporateurs à air :

- Les évaporateurs à convection naturelle. Figure (1.23)

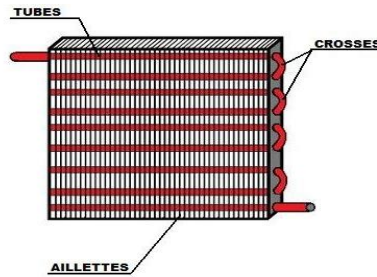


Figure (1.23) : Evaporateur à convection naturelle.

- Les évaporateurs à convection forcée. Figure (1.24)

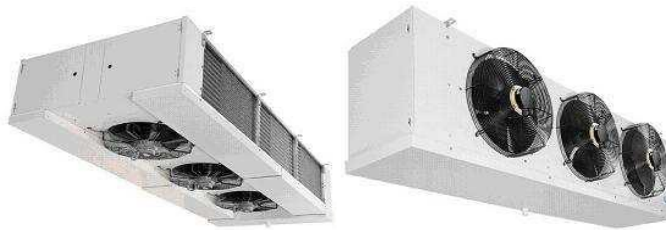


Figure (1.24) : Evaporateur à convection forcée.

5.3. Les composants auxiliaires :

5.3.1. Réservoir liquide :

Il est placé à la sortie du condenseur et sert à stocker le fluide frigorigène liquide à la mise en d'arrêt de l'appareil ou lors des opérations de maintenance. Il permet d'alimenter le détendeur en liquide de façon permanente à l'aide de son tube plongeur. Le réservoir de liquide aussi bouteille liquide Figure (1.26), bouteille accumulatrice ou peut être quelque fois dimensionnée pour stocker toute la charge en fluide frigorigène de l'installation. [19]

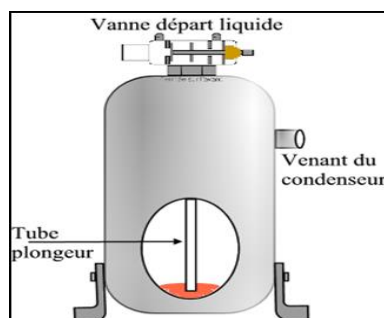


Figure (1.25) : Réservoir de liquide.

5.3.2. Bouteille anti-coup liquide :

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

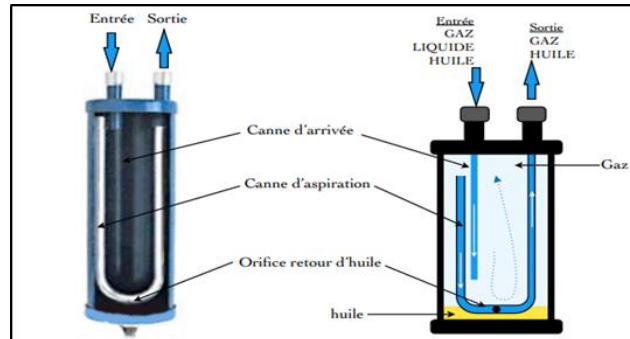


Figure (1.26) : Schéma d'une bouteille anti-coup liquide.

5.3.3. Filtre déshydraté :

Le filtre déshydrater qui rassemble dans le même appareil les fonctions de filtre (sert à piéger les impuretés contenues dans le circuit frigorifique) et de dés hydrateur (permet l'élimination de l'humidité contenue dans le circuit frigorifique). Figure (1.27) [20]



Figure (1.27) : Filtre déshydrater.

5.3.4. Voyant liquide :

Le voyant indicateur d'humidité est un voyant simple (permet de contrôler la présence éventuelle de bulles donc de fluide frigorigène à l'état vapeur, indice d'anomalie) avec un double fonctionnement, celle de 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 fluide frigorigène. Le vert indique généralement un circuit sec (parfaitement déshydraté) et le jaune un circuit humide ; le vert clair indique que le filtre déshydratera est en train de se saturer. Figure (1.28) [21]



Figure (1.28) : Voyant liquide.

5.3.5. Thermostat :

Les thermostats peuvent assurer des fonctions de régulation (par exemple, l'arrêt du compresseur d'une installation lorsque la température désirée dans l'enceinte est atteinte), ou de sécurité (par exemple, l'arrêt de l'alimentation des résistances électriques de dégivrage d'un évaporateur lorsque la température d'évaporation est trop élevée ou l'arrêt du compresseur lorsque la température de refoulement est élevée). [22].



Figure (1.29) : Thermostat.

5.3.6. Pressostat :

Ces pressostats Figure (1.30) sont raccordés à l'aspiration du compresseur et ils assurent généralement :

- la protection du compresseur contre toute baisse anormale de la pression d'aspiration : c'est une fonction de sécurité. Figure (1.32)
- le contrôle du fonctionnement de l'évaporateur par l'arrêt du compresseur lorsque la pression d'évaporation descend à une valeur de consigne pré réglée : c'est une fonction de régulation.

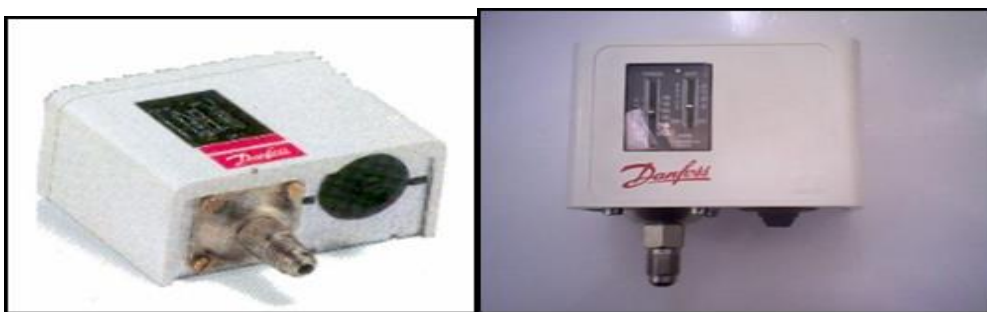


Figure (1.30) : Pressostat HP, BP et mixte.

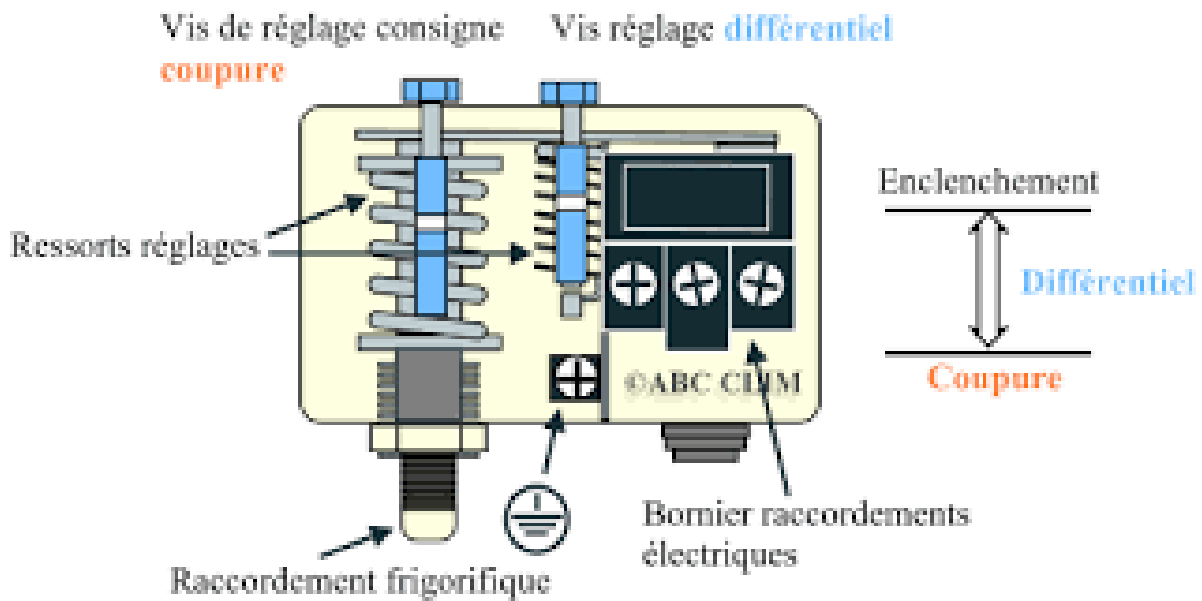


Figure (1.31) : Fonctionnement du pressostat basse pression

6. Les Fluides frigorigènes :

6.1. CODIFICATION ET CLASSIFICATIONS DES FLUIDES FRIGORIGÈNES :

Pour faciliter les noms chimiques on utilise la codification qui lie à la composition chimique :

Exemple : le R22 (chlorodifluorométhane – CHClF_2) : **R022**

0 : Nombre d'atomes de carbone - 1 (ce chiffre est nul, il ne doit pas apparaître)

2 : Nombre d'atomes d'hydrogène + 1

2 : Nombre d'atomes de fluor

Nombre d'atomes de chlore : 1

(Soit 4 moins 1 atome d'hydrogène et moins 2 atomes de fluor)

Dans le cas des isomères de la série éthane, chacun possède le même numéro. Le plus symétrique d'entre eux est indiqué par le numéro seul. L'asymétrie des isomères est repérée suivant son importance par l'adjonction successive de lettres minuscules (a, b, c).

Exemple : le R134 et le R134a).[23]

6.2. CLASSIFICATION :

Les fluides peuvent être classés en quatre familles:

- LES SUBSTANCES INORGANIQUES PURES.
- LES HYDROCARBURES.
- LES HYDROCARBURES HALOGÉNÉS.
- LES AUTRES PRODUITS.

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

6.2.1 Fluides inorganiques purs :

Les fluides de cette famille sont principalement composés de :

- Eau (H₂O)
- Ammoniac (NH₃)
- Dioxyde de carbone (CO₂)

FLUIDES INORGANIQUE PURS		
R717	R718	R744

6.2.1. Fluides hydrocarbures:

Les fluides de cette famille peuvent être composés de :

- Butane
- Isobutane
- Propane
- Cyclopropane
- Propylène

FLUIDES HYDROCARBURES				
RC270	R290	R600	R600a	R1270

6.2.2. Fluides hydrocarbures halogénés:

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

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

- ✓ CFC --> Chlorofluorocarbones $C_xF_yCl_z$ ex: CF₂Cl₂ («R12 »)
- ✓ HCFC-->hydrogénochlorofluorocarbones $C_xH_yCl_zF_u$ ex: CHClF₂
- ✓ HFC-->Hydrogénéofluorocarbures $C_xH_yF_z$
- ✓ NH₃--> ammoniac

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

Mélange de fluides frigorigènes :

Exemples de mélanges:

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

le R407B est composé de R32 (10%), R125 (70%), R134a (20%) [24]

LES CFC

ChloroFluoroCarbures

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

CFC
R11
R12
R113
R115
R502

LES HCFC

HydroChloroFluoroCarbures

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

HCFC	
R21	R401A
R22	R402A
R123	R408A
R124	R409A
R142b	

LES HFC

HydroFluoroCarbures

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

HFC	
R32	R404A
R125	R407C
R134a	R410A
R143a	R507
R152a	

Tableau (1.2) : Les classifications des fluides frigorigène.

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

FLUIDE FRIGORIGÈNE	QUALIFICATIF	TYPE	FORMULE composition et %	HUILE A UTILISER	APPLICATION
R.12 -29,8°C	Ancien	C.F.C.	Dichlorodifluorométhane	Minérale / Alkylbenzène	Réfrigération
R.22 -40,8°C	Transition / 2015	H.C.F.C.	Chlorodifluorométhane	Minérale / Alkylbenzène	
R.134a -26,5°C	Définitif	H.F.C.	Tétrafluoroéthane	Polyolester (POE)	
R.401A -33°C MP 39/Primagaz	Transition / 2015	mélange zéotropique H.C.F.C.	53%: R22 34%: R 124 13%: R 152a	Minérale / Alkylbenzène (AB)	
R.409A -34,2°C FX 56/Dehon Elf Ato.	Transition / 2015	mélange zéotropique H.C.F.C.	60%: R22 25%: R 124 15%: R 142b	Minérale / Alkylbenzène	
R.413A -35°C Iscéon 49/R.Poulenc	Définitif	mélange zéotropique H.F.C.	6%: R218 88%: R134a 6%: 600a (iso-butane)	Minérale / Alkylbenzène Polyolester	Conservation
R.502 -45,6°C	Ancien	mélange azéotropique	48,8%: R22 51,2%: R 115	Alkylbenzène	
R.22 -40,8°C	Transition / 2015	H.C.F.C.	Chlorodifluorométhane	Alkylbenzène	
R.402A -47,4°C HP 80/Primagaz	Transition / 2015	mélange zéotropique H.C.F.C.	38%: R22 2%: propane 60%: R 125	Alkylbenzène	
R.408A -44,5°C FX 10 Dehon Elf Ato.	Transition / 2015	mélange zéotropique H.C.F.C.	47%: R22 7%: R 125 46%: R 143a	Alkylbenzène	
R.404A -46,5°C HP 62/Primagaz FX 70/Dehon Elf Ato.	Définitif	mélange zéotropique H.F.C.	4%: R134a 44%: R 125 52%: R 143a	Polyolester	Climatisation
R.22 -40,8°C	Transition / 2015	H.C.F.C.	Chlorodifluorométhane	Alkylbenzène	
R.407C -43,7°C	Définitif	mélange zéotropique H.F.C.	52%: R134a 23%: R 32 25%: R 125	Polyolester	
R.410A -52,7°C	Définitif	mélange zéotropique H.F.C.	50%: R 32 50%: R 125	Polyolester	
R.12 -29,8°C	Ancien	C.F.C.	Dichlorodifluorométhane	Minérale / Alkylbenzène	Clim-automobile
R.134a -26,5°C	Définitif	H.F.C.	Tétrafluoroéthane	Polyalkylèneglycols (PAG)	

Tableau (1.3) : les types des fluides frigorigènes avec ces applications.

6.3. R134a :

Le tétrafluoroéthane est un hydrocarbure halogéné de formule brute $C_2H_2F_4$. Il est utilisé principalement comme fluide réfrigérant sous le nom de R-134a ou HFC-134a. Composé de la classe des hydrofluorocarbures (HFC), il n'a pas d'impact sur la couche d'ozone (ODP=0), et ainsi donc a été désigné pour remplacer les divers CFC (en particulier le dichlorodifluorométhane R-12) dans le système de refroidissement, mais il contribue grandement à l'effet de serre (GWP100=1430¹⁰) et sa teneur dans l'air augmente régulièrement depuis 1990 environ[25]

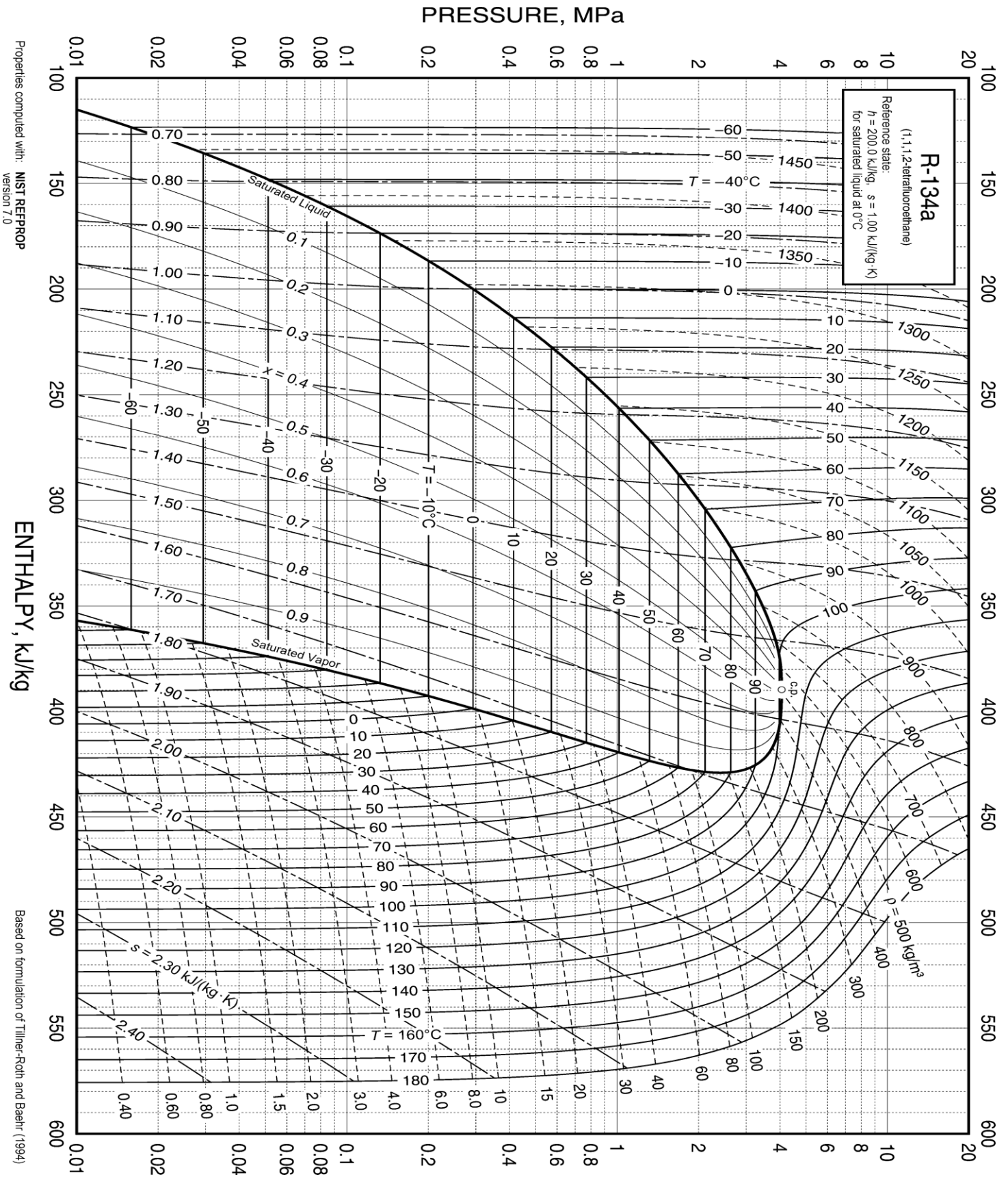


Figure (1.32) : diagramme R134a

Chapitre 01 : Base théorique sur la production du froid par compression de vapeur

Propriété	Valeur
T d'ébullition (°C)	-26.07
T critique (°C)	101.06
P critique (MPa)	4.065
Masse molaire (kg/mol)	0.102
ODP	0
GWP100 (ans)	1300



Figure (1.2) bouteille du r134a

Tableau (1.4) : propriétés physique du r134a

Figure (1.33) : bouteille du r134a

Les principales propriétés (Tableau (1.4)) thermodynamiques du fluide frigorigène R134 Figure (1.33) a, représentées par des équations polynomiales à l'état de saturation sont: la pression de saturation ou la tension de vapeur P, l'enthalpie H des phases liquide et vapeur, le volume massique V et la masse volumique ρ des deux phases, l'entropie S des phases liquide et vapeur.

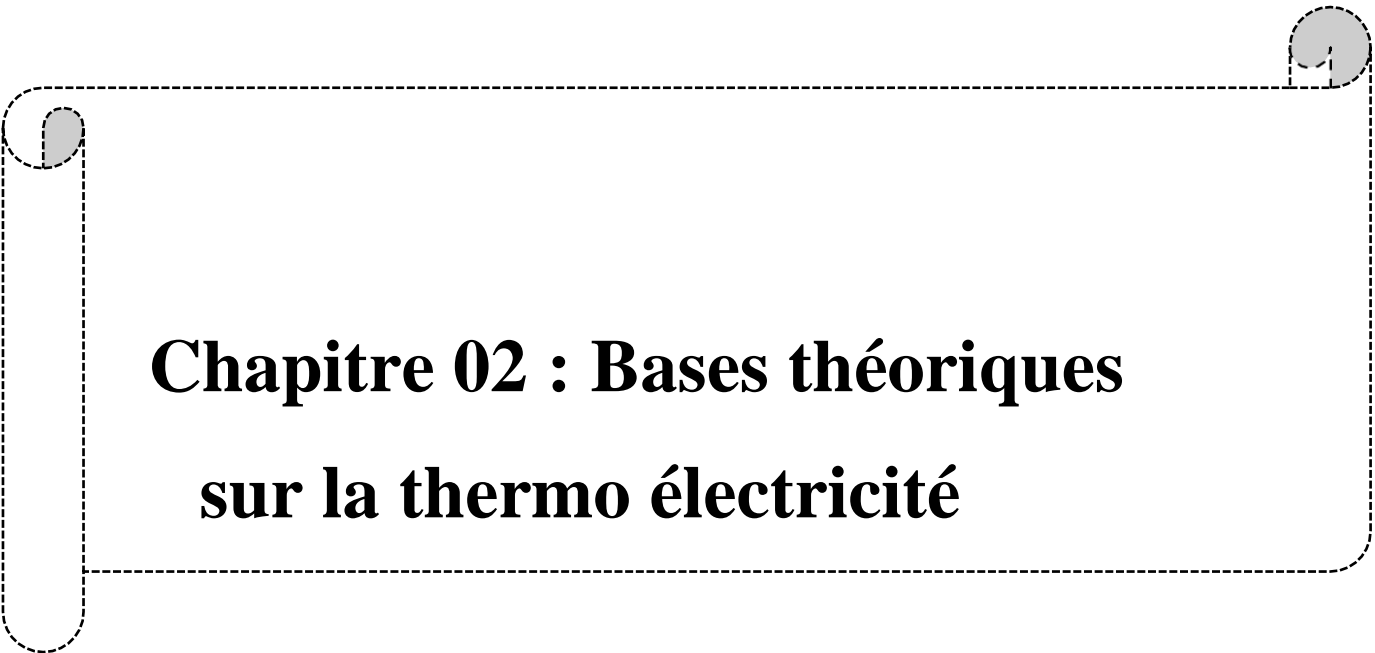
Les équations de ces grandeurs, données ci-après, et décrivant au mieux les points expérimentaux, ont été développées grâce à des méthodes numériques.

7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait une recherche sur la production du froid pour l'utilisation des besoins domestiques, médicaux et industriels.

Dans notre cas, nous avons choisi le système de refroidissement du type thermoélectrique (effet Peltier) car ils sont très faciles d'utilisation, et sont silencieuses, peu encombrantes, de petites tailles, compactes et légères. On peut aisément les utiliser dans presque toutes les positions et la régulation de la température est précise.

Les fluides frigorigènes ont des propriétés très intéressantes qui permettent l'existence des réfrigérateurs, des congélateurs ou des pompes à chaleur. Cependant, leur pouvoir de destruction de la couche d'ozone est très important et les risques pour l'environnement sont donc réels.



Chapitre 02 : Bases théoriques sur la thermo électricité

1. Introduction :

La thermoélectricité est l'électricité générée par l'effet thermoélectrique, un phénomène physique présent dans certains matériaux, qui lie les flux de chaleur qui les traverse aux courants électriques qui les parcourt. Cet effet est à la base d'applications, dont très majoritairement la thermométrie, puis la réfrigération (ex. : module Peltier)

Il existe trois effets thermoélectriques qui résultent du couplage entre les phénomènes de conduction électrique et thermique : les effets Seebeck, Peltier et Thomson. Les performances d'un matériau thermoélectrique sont caractérisées par le facteur de mérite adimensionnel.

Dans ce chapitre nous avons expliqué les effets thermoélectrique basée sur l'effet Peltier et le leur principe de fonctionnement et déférent modelé et ces application. [26]

2. Historique :

La première mention relative aux effets thermoélectriques est faite dans les rapports de l'Académie des sciences de Prusse en 1822 [Seebeck-1822]. Seebeck y note l'apparition d'un courant continu dans un circuit fermé constitué de deux conducteurs de nature différente dont les jonctions sont à des températures différentes. Il explique ce phénomène par l'apparition d'un champ magnétique, et croit ainsi fournir une explication à l'existence du champ magnétique terrestre. Il classe de nombreux matériaux sur lesquels il travaille dans l'ordre de leurs produits $S \cdot \sigma$, où S est le coefficient Seebeck et σ la conductivité électrique.

Le coefficient Seebeck s'exprime en volts par degré. L'utilisation la plus connue de l'effet Seebeck est la mesure de température à l'aide de thermocouples.

Douze ans plus tard, Peltier découvre un effet complémentaire en observant des variations de température à proximité de la jonction entre des matériaux conducteurs différents lorsqu'un courant est appliqué [Peltier-1834].

En 1838, Lenz explique la nature de l'effet Peltier [Ioffe-1957]. Il conclut que selon la direction du courant, la chaleur est absorbée ou générée au niveau de la jonction entre les deux conducteurs et en fit la démonstration en gelant de l'eau au niveau d'une jonction en bismuth puis en la faisant fondre en inversant la direction du courant.

Thomson montre en 1851 que les effets Seebeck et Peltier sont liés : un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Réciproquement, un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.

La différence fondamentale entre les effets Seebeck et Peltier considérés séparément et l'effet Thomson est que ce dernier existe pour un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction.

La possibilité d'utiliser la thermoélectricité pour générer de l'électricité est envisagée par Rayleigh qui calcule pour la première fois, l'efficacité d'un générateur thermoélectrique.

En 1909 [Altenkirch-1909] et 1911 [Altenkirch-1911] Altkirch expose une théorie sur la génération et la réfrigération thermoélectrique et montre que les meilleurs matériaux thermoélectriques doivent

avoir de bons coefficients Seebeck avec une conductivité thermique faible pour maintenir un gradient de température suffisant, ainsi qu'une faible résistivité électrique pour diminuer la chaleur perdue par effet Joule. Toutes ces propriétés sont alors regroupées dans un terme appelé facteur de mérite ZT où T est la température, $Z = S^2/\rho\kappa$, avec $\rho = 1/\sigma$ la résistivité électrique et κ la conductivité thermique. Vers la fin des années 40,

le développement de semi-conducteurs dont le coefficient de Seebeck avoisine les $100 \mu\text{V/K}$ relance la thermoélectricité.

Motivées par d'éventuelles applications militaires, de nombreuses recherches sur les matériaux sont entreprises, notamment dans les laboratoires Américains, et permettent d'obtenir des semi-conducteurs dont les ZT avoisinent les 1,5.

A la fin des années 80, dans un souci environnemental, la production d'énergie propre relance l'intérêt pour les générateurs de conversion thermoélectrique.

Le matériau le plus utilisé à l'heure actuelle est Bi_2Te_3 qui associé à Sb_2Te_3 présentent de performances thermoélectriques intéressantes [Goldsmid-1964]. [27]

3. L'effet Peltier :

L'effet Peltier est un phénomène physique de production de froid au niveau de la jonction de 2 conducteurs de nature différente parcouru par un courant continu. [28]

En effet, lorsqu'un courant électrique continu passe à travers la jonction reliant deux conducteurs de nature différente, on observe un dégagement de chaleur ou une absorption de chaleur selon le sens du courant. Ceci est traduit par l'équation suivante:

$$Q = \Pi \times I \quad (2.1)$$

Q : quantité de chaleur en Joule

I : intensité du courant électrique en Amôère

Π: coefficient Peltier entre les conducteurs 1 et 2.

4. Description :

Les modules Peltier sont composés de plusieurs couples thermoélectriques élémentaires

Connectés électriquement. Chaque couple est constitué d'un matériau semi-conducteur de type P et d'un matériau semi-conducteur de type N réunis par un pont métallique conducteur dont le pouvoir thermoélectrique est supposé nul. Les semi-conducteurs utilisés sont fabriqués à base de différents matériaux entre autre : l'alliage d'antimoine et de tellure (Sb_2Te_3), l'alliage de plomb et de tellure (PbTe) et l'alliage de bismuth et de tellure (Bi_2Te_3). Cependant, seul le dernier est utilisé dans la fabrication des modules Peltier pour la réfrigération.

Ensuite, les deux branches (P et N) du couple et tous les autres couples composant le Module sont connectés en série électriquement et en parallèle thermiquement afin d'optimiser le flux de chaleur qui traverse le module et sa résistance électrique.

Les couples sont maintenus solidaires par deux plaques de céramique qui assurent l'isolation électrique tout en garantissant de bons transferts thermiques. [29]

La figure (2.1) ci-dessous donne une représentation des modules Peltier.

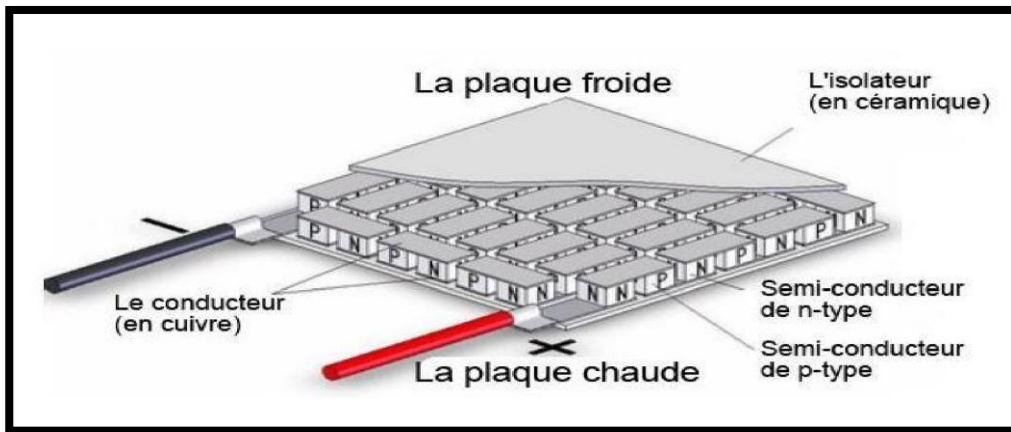


Figure (2.1) : Schéma descriptif de module Peltier

Les modules Peltier commercialisés existent sous différentes tailles et sous différents étages. Cependant, la taille maximale est de 62 mm et la figure (2.2) ci-dessous illustre un type de module Peltier.

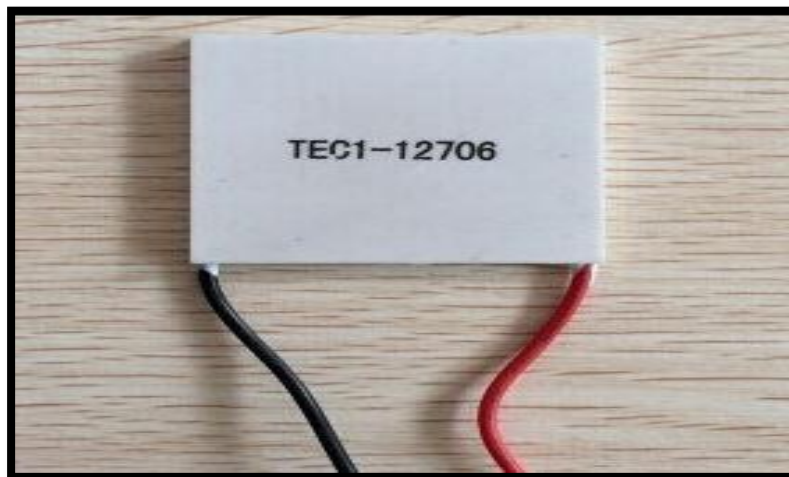


Figure (2.2) : Module Peltier TEC1-12706

TEC1-12706 Refroidisseur Peltier (Figure (2.3)).



Figure (2.3) : Signification d'un module Peltier

Le dispositif Peltier que nous allons utiliser est un module très courant, le TEC1-12706 Refroidisseur Peltier.

C'est un petit appareil mesurant 40mm x 40mm, j'ai mesuré l'épaisseur de mon

Module à 3,75 mm. Il s'agit d'un module Peltier de taille standard, et vous constaterez que 40 mm x 40 mm est également une taille de dissipateur thermique standard.

- TE– Il s'agit d'une abréviation pour « Thermoélectrique »
- C– Ceci indique la taille du module. Un module "C" est un module de taille standard alors qu'un module "S" est plus petit.
- 1– Cela indique le nombre d'étages ou de couches de matériau semi-conducteur.

Dans cette série, la plupart n'ont qu'une seule couche, mais les modules Peltier sont disponibles avec plus couches.

- 127– Le nombre de Couples, un « couple » est une paire de jonction P-N.
- 06– La quantité de courant à laquelle l'appareil est évalué en ampères. Notez que cèles modules n'ont pas de tension nominale.

5. Principe de fonctionnement

Pour passer de la soudure métallique vers le semi-conducteur de type N, les électrons doivent vaincre une barrière énergétique caractérisée par la différence d'énergie entre la bande de conduction et le niveau de Fermi (niveau de Fermi est proche de la limite supérieure d'une bande, et que l'intervalle d'énergie interdite situé au-dessus du niveau est étroit, le solide est un semi-conducteur, comme le silicium). [30]

Ce sont donc les électrons de plus grande énergie, ou les électrons les plus « chaud » qui sont les plus propices pour surpasser cette barrière énergétique et entrer dans le matériau de type N.

Ces électrons vont ensuite traverser l'élément de type N puis passer dans la soudure opposée sans rencontrer d'autre barrière énergétique. Il en résulte donc un transfert des électrons de plus haute énergie d'un côté à l'autre de l'élément de type N et donc un transfert de chaleur.

Le courant électrique est ainsi accompagné d'un flux thermique qui va s'opposer à la conduction thermique. Dans les éléments de type P, les porteurs de charges majoritaires sont les trous. De la même manière, il existe un transfert des trous de plus haute énergie d'un côté à l'autre de l'élément de type P et donc un transfert de chaleur.

Dans les modules thermoélectriques, le circuit électrique est conçu en reliant en série alternativement des éléments de type P et de type N, de telle sorte que toutes les jonctions P-N soient situées sur une face tandis que les jonctions N-P sont sur l'autre face. Ainsi le transfert des trous et des électrons de haute énergie est unidirectionnel, il y a donc un transfert de chaleur d'une face à l'autre.

Si le sens du courant est inversé, les jonctions P-N deviennent des jonctions N-P, l'absorption de chaleur se fera sur la face opposée. La figure (2.4) ci-dessous illustre le principe de fonctionnement des modules.

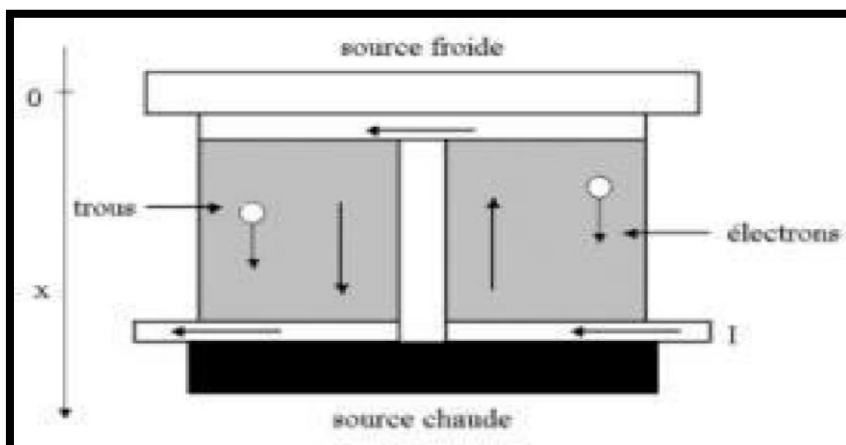


Figure (2.4) : Schéma de Principe

6. Différents modèles de modules à effet Peltier :

Il existe différents modèles de modules à effet Peltier, En effet, en fonction de l'application différentes formes et tailles sont disponibles afin de répondre à tous les besoins. Il existe des modules de type cascade Figure (2.5) , ainsi, qui ont un ΔT maximal de 140°C. Ce genre de modèle est donc très utile quand il est nécessaire de refroidir fortement un composant. Son inconvénient réside dans sa hauteur et sa forme peu pratique.

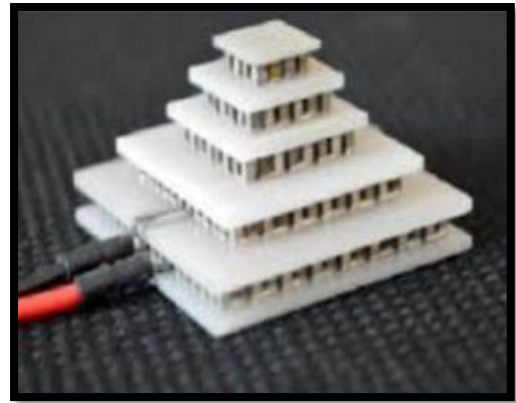


Figure (2.5): Modèle Peltier cascade

On trouve également des modèles trous, rectangulaires ou circulaires. Leur utilité se trouve dans leur forme qui permet de fixer les modules. On peut citer les modèles CH-21-1.0-1.3 et CH-43-1.0-

0.8 Du fabricant TE Technologie Figure (2.6).

L'entreprise TECHNICOME.com propose des modules spécifiques tels que des modules étanches, des modules avec gaines thermo-rétractable ou encore des modules pré-assemblent. [31]

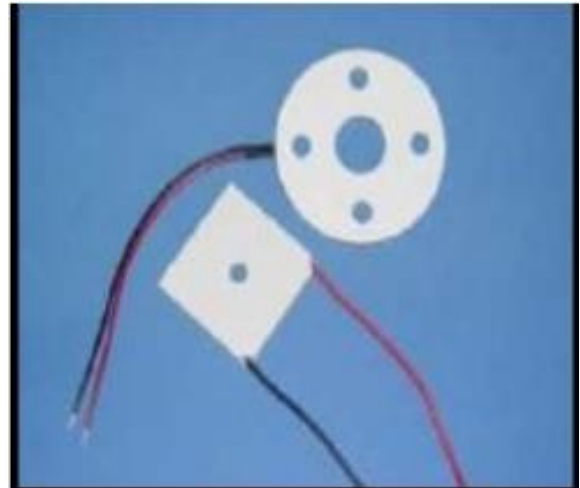


Figure (2.6) : Modèle Peltier rectangulaire et circulaire

7. Élément thermique d'un module Peltier :

Les générations actuelles d'éléments Peltier sont constituées d'une multitude de thermocouples connectés électriquement en série par des ponts de cuivre. Les ponts de cuivre sont isolés thermiquement de chaque côté par des plaques de céramiques (en général de l'oxyde d'aluminium), mais isolés électriquement les uns des autres. Figure (2.7)

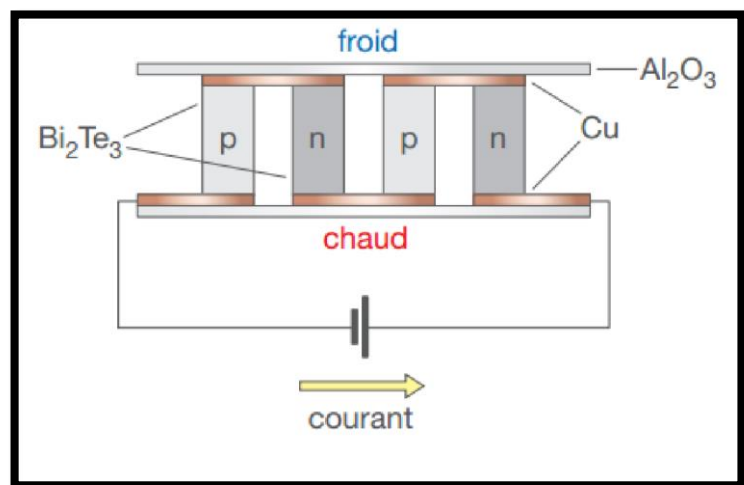


Figure (2.7) : schéma des éléments thermiques d'un module Peltier

Lorsque des semi-conducteurs avec dopage de type N et P sont utilisés, la principale réflexion ne porte pas sur le „matériau semi-conducteur“ au sens propre du terme comme pour les diodes à semi-conducteur. Dans ce cas, les deux semi-conducteurs doivent être en contact direct pour forcer le courant électrique à circuler dans un sens. Alors que pour l'effet Peltier Figure (2.8), ceci n'est d'aucune aide et les différents semi-conducteurs sont connectés par des ponts métalliques. Les semi-conducteurs sont donc préférés aux autres matériaux conducteurs en raison de leur tension thermoélectrique élevée permettant une excellente conductivité électrique tout en étant isolés thermiquement. C'est ainsi que le côté refroidi peut être efficacement séparé du côté chaud et produire une différence de température utilisable.

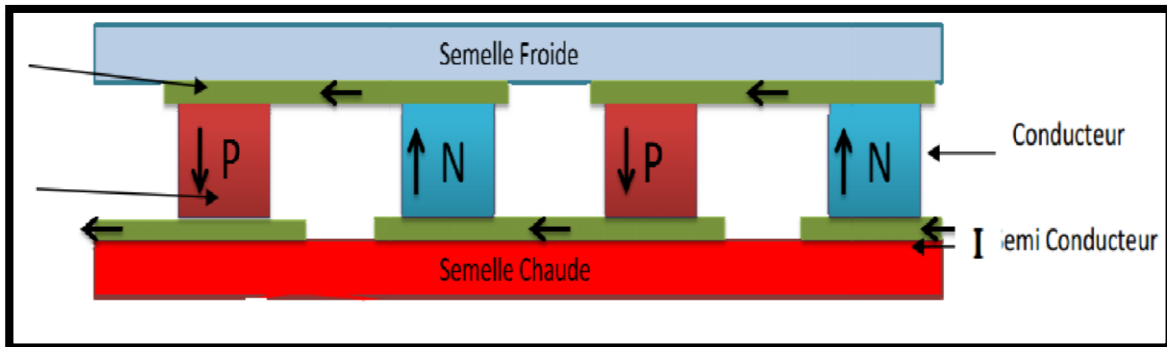


Figure (2.8) : la conception d'un module Peltier.

Un module Peltier Figure (2.9) est composé d'un ou plusieurs éléments Peltier et couplé thermiquement à des dissipateurs de chaleur. La puissance électrique utilisée pour pomper est irréversiblement convertie en chaleur dans les éléments Peltier et doit être dissipée efficacement.

De plus, les éléments Peltier pompent de façon réversible la chaleur d'un côté à l'autre en fonction de la direction du courant.

Par conséquent, la chaleur est absorbée d'un côté, mais significativement moins que celle émise de l'autre côté.

Ainsi, la chaleur doit être échangée via des dissipateurs de chaleur de grandes dimensions, situés de chaque côté de l'élément Peltier. De puissants ventilateurs sont utilisés pour chasser l'air chaud ou refroidi. [32]

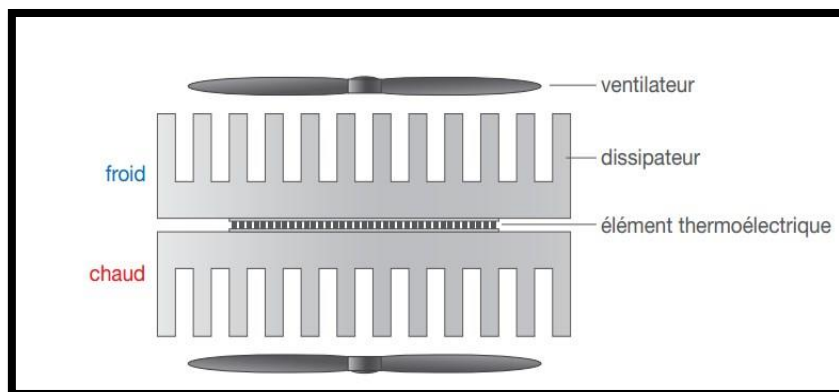


Figure (2.9) : Schéma des composants d'un module Peltier.

8. Les applications des modules à effet Peltier :

Les modules à effet Peltier sont alimentés par un courant et présente par un effet thermoélectrique une face chaude et une face froide.

Ses applications dans la vie de tous les jours ont donc en général pour but de refroidir un objet de manière peu encombrante et silencieuse. Son utilisation la plus courante se situe dans le milieu de l'informatique où la plaque froide est en contact avec le circuit intégré de manière que celui-ci soit maintenu à une température inférieure à 40°C.

De l'autre côté du module, un ventilateur se charge de refroidir la plaque chaude pour éviter toute surchauffe. Il peut également être utilisé pour refroidir des enregistreurs magnétiques ou des disques durs.

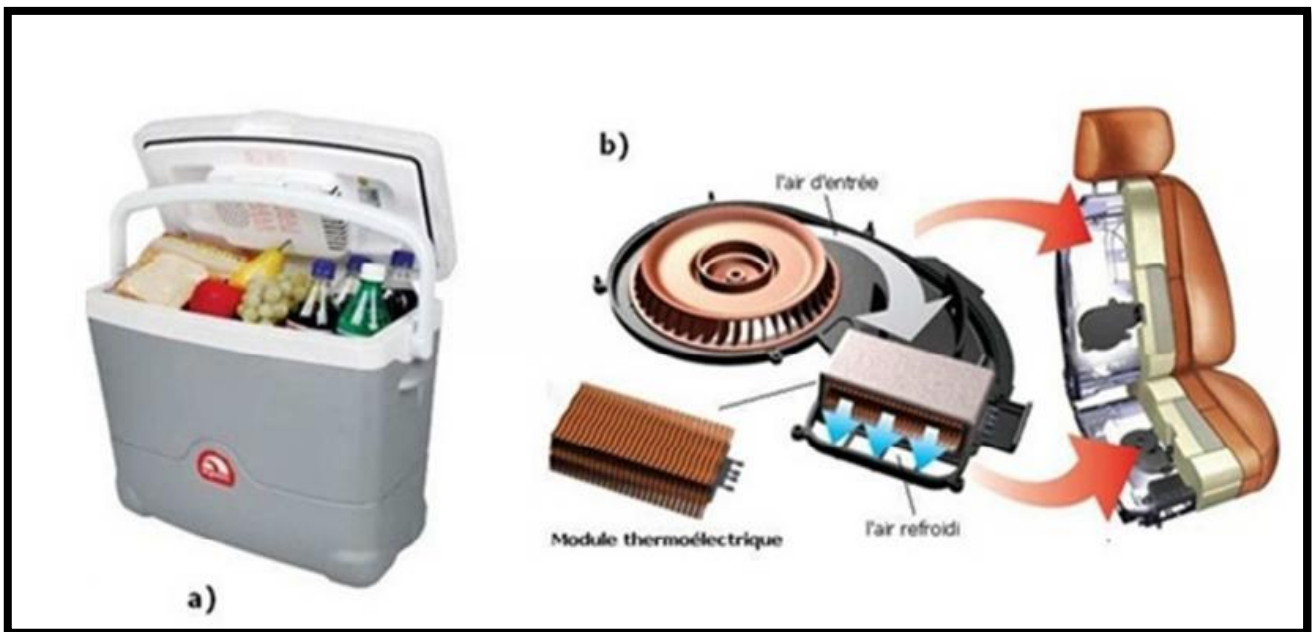


Figure (2.10) : (a) réfrigérateur portable, (b) siège automobile

Dans le milieu industriel, on retrouve les modules dans toutes sortes d'étalonnages de .

Températures. Par exemple une caméra infrarouge pour être étalonnée utilise comme cible optique une cellule à effet Peltier dont la température évolue selon un modèle programmé.

Ce genre de variation de la température trouve également plusieurs applications dans l'industrie chimique afin de pouvoir changer rapidement et précisément la température d'une réaction ou de stockage de produits.

Enfin, les cellules à effet Peltier sont utilisées pour usiner des pièces sur machine-outil. Afin d'être usinées, les pièces sont immobilisées sur le plateau (la face froide de la cellule) par une fine couche de glace. La libération des pièces s'obtient par un cycle de dégel.

On utilise également fréquemment les modules Peltier dans les laboratoires dans des rôles de maintien ou de baisse de la température (analyse à basse température, refroidissement d'éprouvettes...). Les cellules peuvent comme dans l'industrie servir à étalonner les chromatographes par différents cycles de températures. Son rôle réfrigérant trouve également son utilité dans les milieux médicaux et agro-alimentaires Figure (2.10).

Les cellules à effets Peltier servent aussi dans des applications bien plus complexes comme par exemple la détection du point de rosée.

Le principe de mesure à injecter un courant électrique périodique afin de produire une oscillation thermique, en utilisant la réversibilité de l'effet Peltier. La tension Seebeck aux bornes du générateur permet de mesurer l'écart de température et de détecter

les flux thermiques liés aux changements de phase qui apparaissent sur la jonction dès que sa température devient inférieure à la température de point de rosée. La fréquence d'oscillation varie alors en fonction du niveau d'humidité.

Les cellules à effet Peltier possèdent donc de nombreuses utilités pour leur capacité réfrigérante, on en trouve dans les réfrigérateurs de voiture, les containers pour le transport d'organes, refroidissement des systèmes laser et infrarouges des missiles... Mais son utilité ne se limite pas qu'à ça puisqu'il existe bien d'autres applications plus complexes comme nous l'avons vu avec la détection du point de rosée.

En dehors de l'effet Peltier, d'autres effets découlent de ce dernier et lui sont Complémentaires. Parmi eux, on isole l'effet Seebeck ainsi que l'effet Thomson. [33]

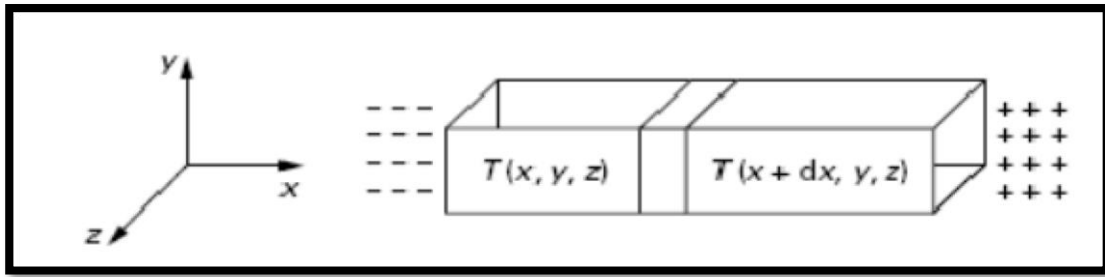
8.1. Effet Seebeck :

En 1821, le médecin Thomas Seebeck découvre une autre façon de produire de l'électricité.

Sa méthode consiste à placer l'un sur l'autre un disque d'antimoine (élément chimique) et un disque de cuivre, il presse à la main un fil de cuivre relié à un galvanomètre (ampèremètre de type analogique), qui indique alors le passage d'un courant. Il comprend que l'échauffement des deux métaux par le contact de la main distribue une différence de température, laquelle provoque cette électricité : c'est la découverte de la thermoélectricité : « un courant électrique (très faible) se manifeste dans un circuit dont les deux soudures se trouvent à des températures différentes. On fabrique alors les premières piles thermoélectriques. »

Physiquement, l'effet Seebeck peut s'expliquer par la polarisation de tout élément de conducteur placé dans un gradient de température non nul. En effet, les observations ont montré que le fait de chauffer ou de refroidir un élément conducteur induit un déplacement d'électron à l'origine du courant électrique qui s'établit. Physiquement, ce phénomène s'explique de la façon suivante :

Tout d'abord il faut considérer un conducteur (métallique) dans lequel la température n'est pas uniforme. On observe après un petit temps que l'extrémité chaude se charge positivement (déficit d'électrons) et qu'à l'inverse l'extrémité froide se charge négativement (excès d'électrons). Ceci s'explique par la conduction thermique. Une stabilité à cause d'un champ électrique interne (la diffusion des électrons chauds va être compensée par la diffusion des électrons froids). [34]



Conducteur métallique à une température non uniforme : répartition des charges électriques mesurer en séparant les deux conducteurs au niveau de l'une des jonctions et en reliant les deux extrémités obtenues à un voltmètre.

Une première relation a été établie par Seebeck reliant les potentiels électriques à la chaleur: « une différence de température dT entre aux jonctions de deux matériaux a et b, ce qui implique une différence de potentiel électrique dV » :

$$S_{ab} = \frac{dv}{dT} \quad (2.2)$$

D'autre part, à chaque conducteur dans un montage à effet Seebeck, est relié un coefficient Appelé le coefficient Seebeck qui informe sur le pouvoir thermoélectrique du matériau.

Il existe une Relation mathématique reliant ces derniers :

$$S_{ab} = S_a - S_b \quad (2.3)$$

Avec S_{ab} : Coefficient de Seebeck du thermocouple

S_a : Coefficient Seebeck du matériau a (conducteur a)

S_b : Coefficient Seebeck du matériau b (conducteur b)

8.2. Effet Thomson :

Cet effet correspond au dégagement ou à l'absorption de chaleur, autre que l'effet Joule, qui accompagne le passage d'un courant électrique à travers un conducteur homogène dont la Température n'est pas uniforme. Une relation peut être établie :

$$Q = \tau_a \cdot \Delta T \cdot I \quad (2.4)$$

Avec : Q : quantité de chaleur échangée avec l'extérieur par effet Thomson, par unité de longueur d'un conducteur homogène et par unité de temps.

ΔT : différence de température qui existe entre deux points du conducteur distant d'une longueur unité. [35]

τ_a : Coefficient de Thomson

I : intensité du courant qui circule

8.3. Effet Joules :

L'effet joule est une réaction thermique qui se produit lorsque l'électricité se déplace au sein de matériaux conducteurs. Découverte en 1840 par un physicien anglais répondant au nom de James Prescott Joule, cette manifestation s'est depuis imposée comme une norme irréfutable.

Lorsqu'un courant électrique I traverse un conducteur de résistance R , il y a

Dissipation d'énergie électrique,

C'est l'effet joule. L'énergie dissipée est donné

Par ;

$$Q_j = I^2 R \quad (2.5)$$

8.4. Relation entre les coefficients Seebeck, Thomson et Peltier :

Ces trois effets (Peltier, Seebeck et Thomson) ne font pas référence à des phénomènes réellement distincts et ils s'avèrent être reliés. Thomson (devenu Lord Kelvin) a ainsi établi deux relations entre les coefficients de Seebeck, Peltier et Thomson. Ces dernières, vérifiées expérimentalement, sont connues sous le nom de relation de Kelvin et s'expriment de la manière suivante :

$$\pi_{a/b} = T \cdot (S_a - S_b) \quad (2.6)$$

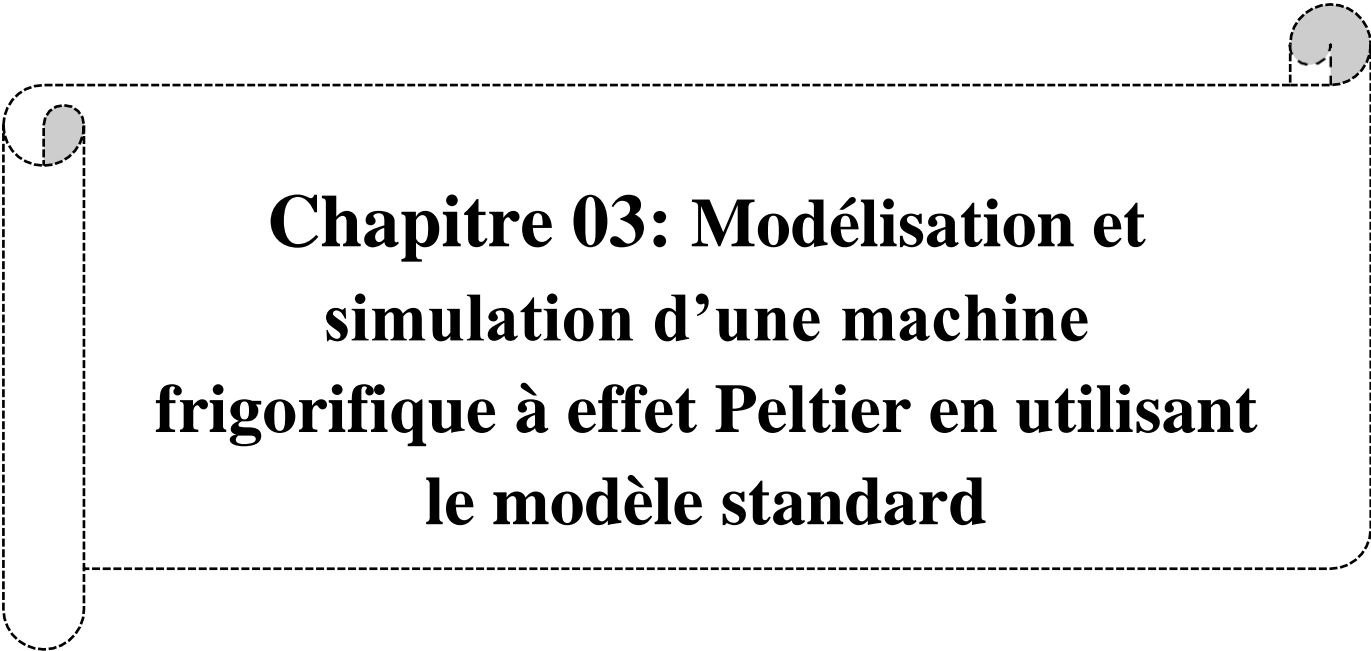
$$\tau_a - \tau_b = T \cdot \frac{(S_a - S_b)}{dT} \quad (2.7)$$

Ces relations marquent donc bien la dépendance entre les trois coefficients. [36]

9. Conclusion :

La technologie Peltier ouvre de nouvelles opportunités pour des applications spécifiques, notamment si elles ne demandent pas une capacité de refroidissement maximale ou une grande efficacité. Sa miniaturisation et son positionnement libre permet de développer de petits appareils portables. Les modules Peltier rendent le contrôle de la température efficace pour des gradients de température réduits par un dosage fin de la capacité de refroidissement.

Grâce à leur grande efficacité et leur importante réserve de puissance, les compresseurs conventionnels maintiennent leur suprématie pour les réfrigérateurs et les congélateurs domestiques ou de laboratoire.



**Chapitre 03: Modélisation et
simulation d'une machine
frigorifique à effet Peltier en utilisant
le modèle standard**

1. Introduction :

Il existe plusieurs types et modèles de refroidissement par l'effet thermoélectrique. Dans ce chapitre nous avons choisi l'effet Peltier et le modèle standard de l'effet thermoélectrique. Dans ce chapitre nous avons fait une étude basée sur le modèle standard de l'effet thermoélectrique.

Puis la modélisation de module Peltier avec un exemple pour voir les performances de ce module utilisé.

2. Modélisation simplifiée d'un élément thermoélectrique :

Modèle « Standard » ;

Le modèle « Standard » est le plus couramment utilisé (1-2). Les propriétés du matériau (Conductivité thermique λ , résistivité électrique ρ , et coefficient Seebeck α) sont prises à la température T_m de la jonction, définie comme la moyenne des températures des jonctions :

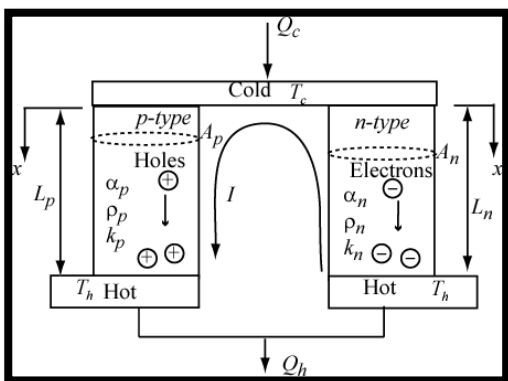


Figure (3.1) : schéma des propriétés d'un module Peltier

$$T_M = \frac{T_c + T_f}{2} \dots\dots\dots (1)$$

Cette hypothèse sur la température reste valable dans le cas où l'effet Joule n'est pas trop important. Par ailleurs, l'écart de température entre les faces étant faible en mode refroidissement, la valeur de T_m restera proche des températures de face. Les équations (2) et (3) donnent les flux de chaleur côté froid et côté chaud respectivement. [38]

$$Q_f = \alpha \cdot I \cdot T_f - \frac{1}{2} R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_c = \alpha \cdot I \cdot T_c + \frac{1}{2} R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T \dots\dots\dots (3)$$

La puissance électrique nécessaire à la production de ces flux est alors

$$P = Q_c - Q_f = R \cdot I^2 + \alpha \cdot I \cdot \Delta T \dots\dots\dots (4)$$

Enfin, les expressions (5) et (6) indiquent respectivement les COP

froid (Mode refroidissement) et chaud (mode chauffage) :

$$COP_f = \frac{Q_f}{P} = \frac{\alpha \cdot I \cdot T_f - \frac{1}{2} R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T}{R \cdot I^2 + \alpha \cdot I \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (5)$$

$$COP_C = \frac{Q_C}{P} = \frac{\alpha \cdot I \cdot T_C + \frac{1}{2} R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T}{R \cdot I^2 + \alpha \cdot I \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (6)$$

Modèle	STANDARD
Facteur de mérite	$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda}$
Facteur M	$M = \sqrt{1 + Z \cdot T_m}$
Facteur A	-
Intensité	$I_{opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{\alpha \cdot T_m} (1 + M)$
Tension optimale	$V_{opt} = A \cdot \Delta T \cdot \frac{M}{(M-1)}$
Puissance froide optimale	$Q_{f_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[(M+1) \cdot \left(T_f - \frac{\Delta T}{2} \left(\frac{1}{M-1} \right) \right) - T_m \right]$
Puissance chaude optimale	$Q_{c_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[(M+1) \cdot \left(T_c - \frac{\Delta T}{2} \left(\frac{1}{M-1} \right) \right) - T_m \right]$
COP froid maximal	$COP_{f_opt} = \frac{T_m}{\Delta T} \left(\frac{M-1}{M+1} \right) - \frac{1}{2}$
COP chaud maximal	$COP_{c_opt} = \frac{T_m}{\Delta T} \left(\frac{M-1}{M+1} \right) + \frac{1}{2}$

Tableau (3.1) : Expressions des performances optimales d'une PACTE, en fonction de la modélisation retenue

Conductivité thermique	$\lambda(T) = (62605 - 277,7 * T + 0,4131 * T^2) * 10^{-4}$	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
Résistivité électrique	$\rho(T) = (5112 + 163,4 * T + 0,6279 * T^2) * 10^{-10}$	$[\Omega.m]$
Coefficient Seebeck	$\alpha(T) = (22224 + 930,6 * T - 0,9905 * T^2) * 10^{-9}$	$[V/K]$

Donnés :

Matériel propriétés : $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$ 400 x 10 V/K, $\rho = \rho_p + \rho_n = 2.0 \times 10^{-5} \Omega$

m, et $k = k_p + k_n = 3.04 \text{ W/mK}$

Le nombre de thermocouples est $n = 128$. Les températures de jonction

chaude et froide sont $T_c = (40+273) = 313K$ et $T_f = (15+273) = 288K$

$$\Delta T = T_1 - T = 25K \quad ; \quad \frac{T_c + T_f}{2} = 300.5 K$$

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{(2.0 \times 10^{-5} \Omega m) (1 \times 10^{-3} m)}{2 \times 10^{-6} m^2} = 0.01 \Omega$$

$$N = \frac{Q_{red}}{\dot{Q}_{cmid}} = \frac{630w}{65.47W} = 9.63$$

$$k = \frac{kA}{L} = \frac{(3.04W/mK)2 \times 10^{-6} m^2}{1 \times 10^{-3}m} = 6.08 \times 10^{-3} \frac{W}{K}$$

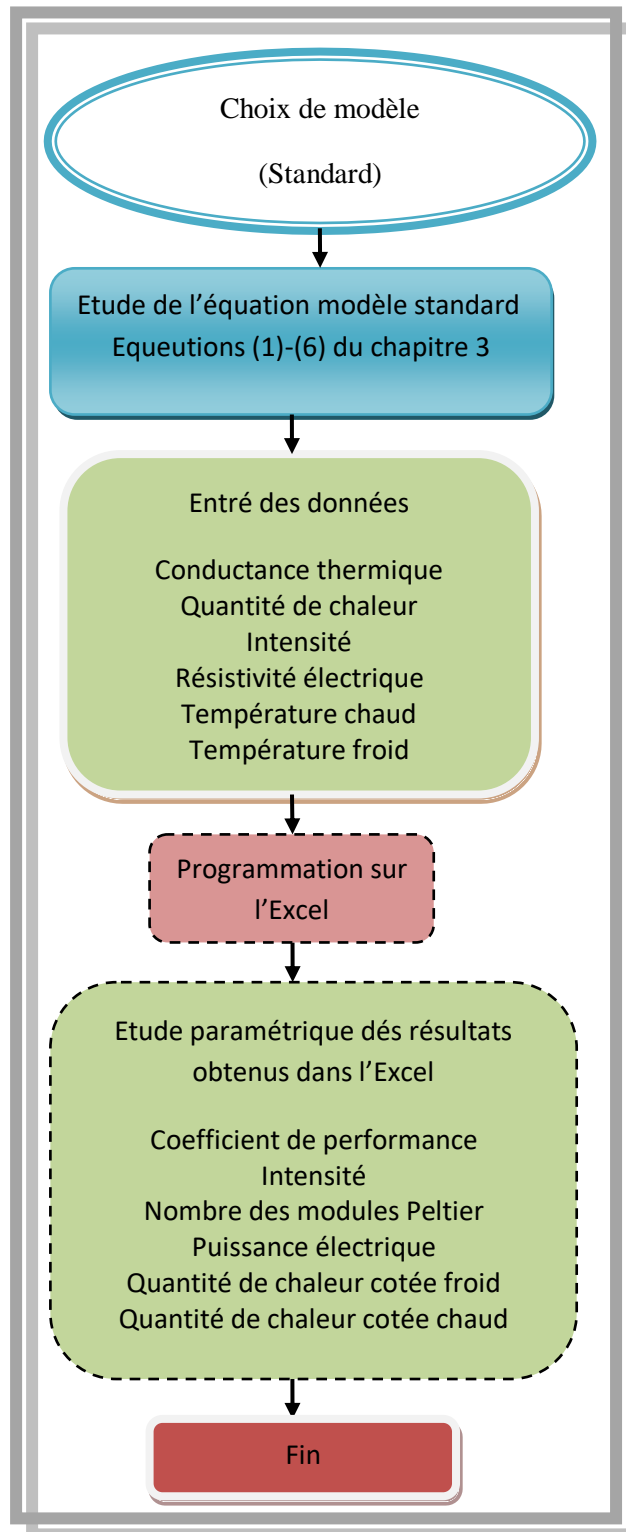


Figure (3.2) : organigramme d'une modélisation Peltier

Données		
Température froid	(K)	288
Température chaud	(K)	313
T_m	(K)	300.50
ΔT	(K)	25.00
k	(W/m.K)	3.29
ρ_p	($\Omega.m$)	1.11E-05
ρ	($\Omega.m$)	2.22E-05
α_p	($\Omega.m$)	0.000212427
α	(V/K)	0.000424854
R	(Ω)	0.01
K	(W/K)	0.006583673
A	(m^2)	0.000002
L	(m)	0.001
Q_{red}	(W)	630
n		128

Tableau (3.2) : les données d'exemple

i	Q_f	Q_c	P	COP_f	N
2	7.42	15.81	8.40	0.88	84.95
2.5	13.65	25.92	12.27	1.11	46.15
3	19.53	36.38	16.86	1.16	32.26
3.5	25.05	47.20	22.15	1.13	25.15
4	30.22	58.38	28.15	1.07	20.85
4.5	35.04	69.90	34.87	1.00	17.98
5	39.50	81.79	42.29	0.93	15.95
5.5	43.60	94.02	50.42	0.86	14.45
6	47.35	106.61	59.27	0.80	13.31
6.5	50.74	119.56	68.82	0.74	12.42
7	53.78	132.86	79.08	0.68	11.71
7.5	56.47	146.52	90.05	0.63	11.16
8	58.80	160.53	101.74	0.58	10.71
8.5	60.77	174.90	114.13	0.53	10.37
9	62.39	189.62	127.23	0.49	10.10
9.5	63.66	204.70	141.04	0.45	9.90
10	64.57	220.13	155.56	0.42	9.76
10.5	65.12	235.92	170.80	0.38	9.67
11	65.32	252.06	186.74	0.35	9.64
11.5	65.17	268.55	203.39	0.32	9.67
12	64.66	285.41	220.75	0.29	9.74
12.5	63.79	302.61	238.82	0.27	9.88

Tableau (3. 3) : les résultats d'exemple.

3. Etude paramétrique :

3.1. Etude paramétrique de la variation de Q_F et COP_F en fonction de l'intensité :

I (A)	COP_f	I (A)	Q_f (W)
2	0.88	2	7.42
2.5	1.11	2.5	13.65
3	1.16	3	19.53
3.5	1.13	3.5	25.05
4	1.07	4	30.22
4.5	1	4.5	35.04
5	0.93	5	39.5
5.5	0.86	5.5	43.6
6	0.8	6	47.35
6.5	0.74	6.5	50.74
7	0.68	7	53.78
7.5	0.63	7.5	56.47
8	0.58	8	58.8
8.5	0.53	8.5	60.77
9	0.49	9	63.39
9.5	0.45	9.5	63.66
10	0.42	10	64.57
10.5	0.38	10.5	65.12
11	0.35	11	65.32
11.5	0.32	11.5	65.17
12	0.29	12	64.66
12.5	0.27	12.5	63.79
13	0.24	13	62.57

Tableau (3.4): la variation de COP et Qf en fonctions de l'intensité (I).

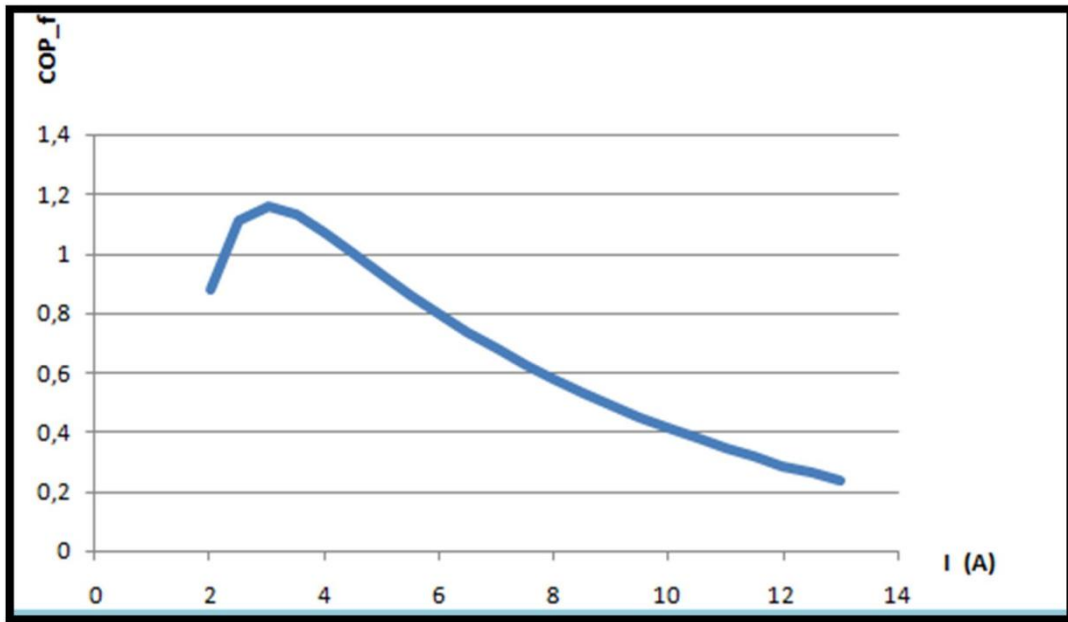


Figure (3.3) : Une courbe représentant la variation du COP_f en fonction de L'intensité du courant(I).

Remarque : d'après le graphe 1 qui représente la variation de COP_f en fonctions de l'intensité (I), nous avons remarqué que le COP_f augmente jusqu'a le COP_f optimale =1.9 a I=3A, après se diminuera jusqu'a I=13A.

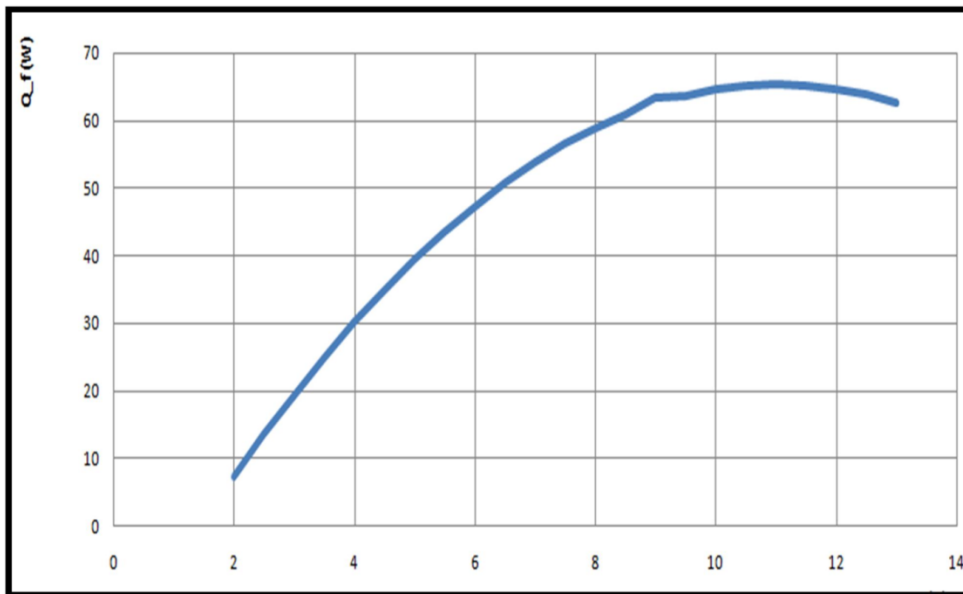


Figure (3.4) : Une courbe représentant la variation Q_f en fonction de l'intensité (I)

La remarque : d'après le graphe 2 qui représente la variation du Q_f en fonction de l'intensité (I) ,nous avons remarqué que le Q_f a I=2A augmente jus qua I=11A et obtiens la valeur optimale de Q_f=67w a la fin la Q_f se diminué lentement jusqu'à I=14A.

3.2. Etude paramétrique de la variation de Q_F et COP_F en fonction de température chaude :

T_c (k)	COP_f		T_c (k)	Q_f (W)
313	1		313	41,8
314	0,97		314	40,99
315	0,94		315	40,19
316	0,92		316	39,38
317	0,89		317	38,58
318	0,86		318	37,78
319	0,84		319	36,98
320	0,81		320	36,18
321	0,79		321	35,38
322	0,76		322	34,58
323	0,74		323	33,78
324	0,72		324	32,98
325	0,69		325	32,19
326	0,67		326	31,39
327	0,65		327	30,6
328	0,63		328	29,8
329	0,61		329	29,01
330	0,59		330	28,21
331	0,56		331	27,42
332	0,54		332	26,63
333	0,52		333	25,83
334	0,5		334	25,04
335	0,48		335	24,25

Tableau (3.5) : la variation de température chaud (T_c) aux fonctions du COP_f et le Q_f

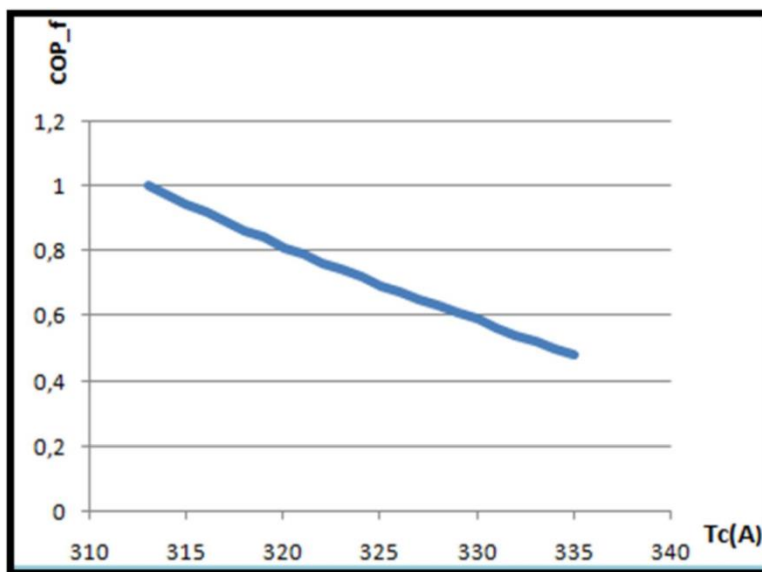


Figure (3.5) : Une courbe représentant les changements de COP_F en fonction de Température chaud

Remarque : d'après le graphe 3 qui représente la variation de de COP_f en fonction de TcNous avons remarque que le COP_f diminué lorsque le Tc augmente.

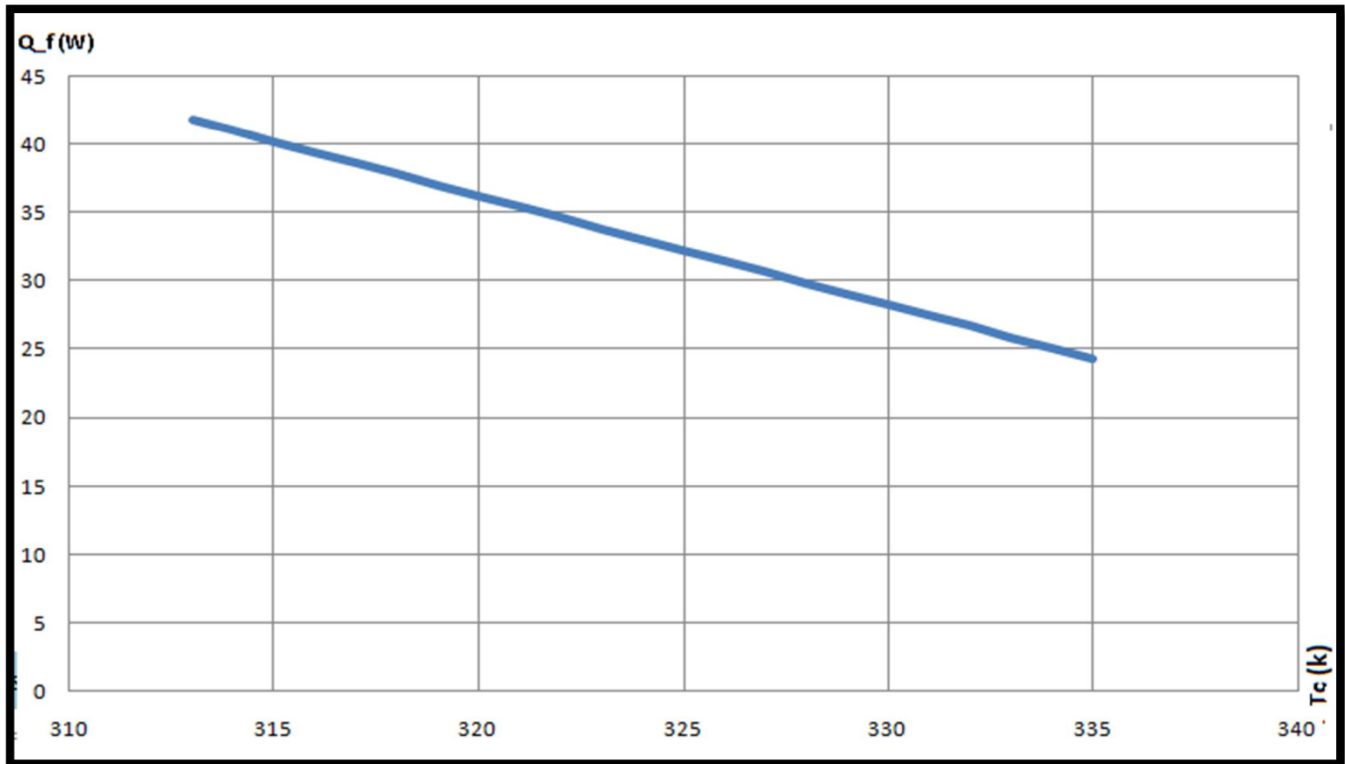


Figure (3.6) : Une courbe représentant les changements de Température chaud en fonction Q_f

Remarque : d'après le graphe 4 qui représente la variation de de Q_f en fonction de TcNous avons remarque que le Q_f diminué lorsque le Tc augmente.

3.3. Etude paramétrique de la variation de Q_F et COP_F en fonction de température froide :

T_f (k)	COP_f		T_f (k)	Q_f (W)
300	4,09		300	25,67
299	3,87		299	24,69
298	3,67		298	23,72
297	3,47		297	22,75
296	3,27		296	21,77
295	3,08		295	20,79
294	2,89		294	19,81
293	2,71		293	18,83
292	2,54		292	17,85
291	2,37		291	16,87
290	2,2		290	15,88
289	2,04		289	14,89
288	1,88		288	13,9
287	1,72		287	12,91
286	1,57		286	11,92
285	1,42		285	10,93
284	1,28		284	9,93
283	1,14		283	8,93
282	1		282	7,93
281	0,86		281	6,93
280	0,73		280	5,93
279	0,6		279	4,92
278	0,47		278	3,91

Tableau (3.6) : la variation de température chaud (T_f) aux fonctions du COP_f et le Q_f

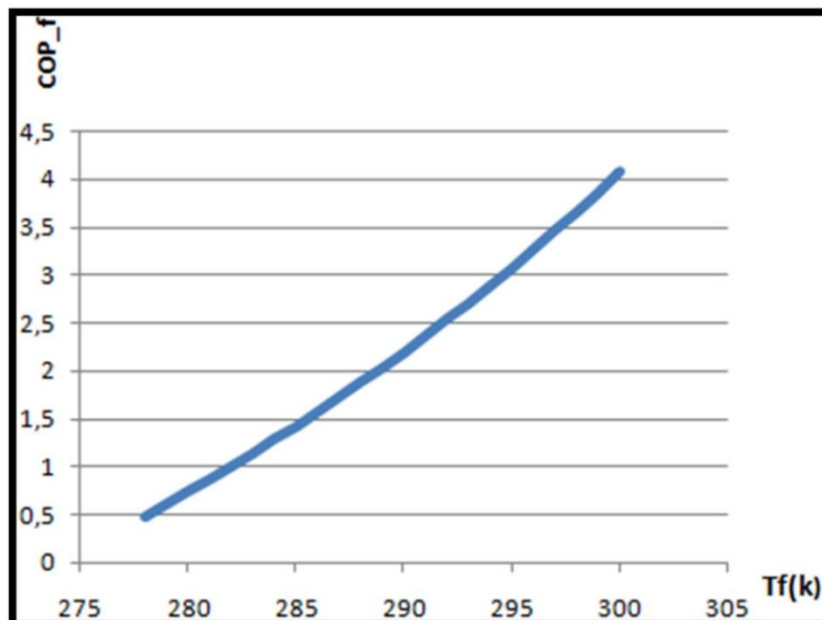


Figure (3.7) : Une courbe représentant les changements de COP_F en fonction Température froid

Remarque: d'après le graphe 5 qui représente la variation de COP_f en fonction de T_f

Nous avons remarque que le COP_f augmente lorsque le T_f augmente.

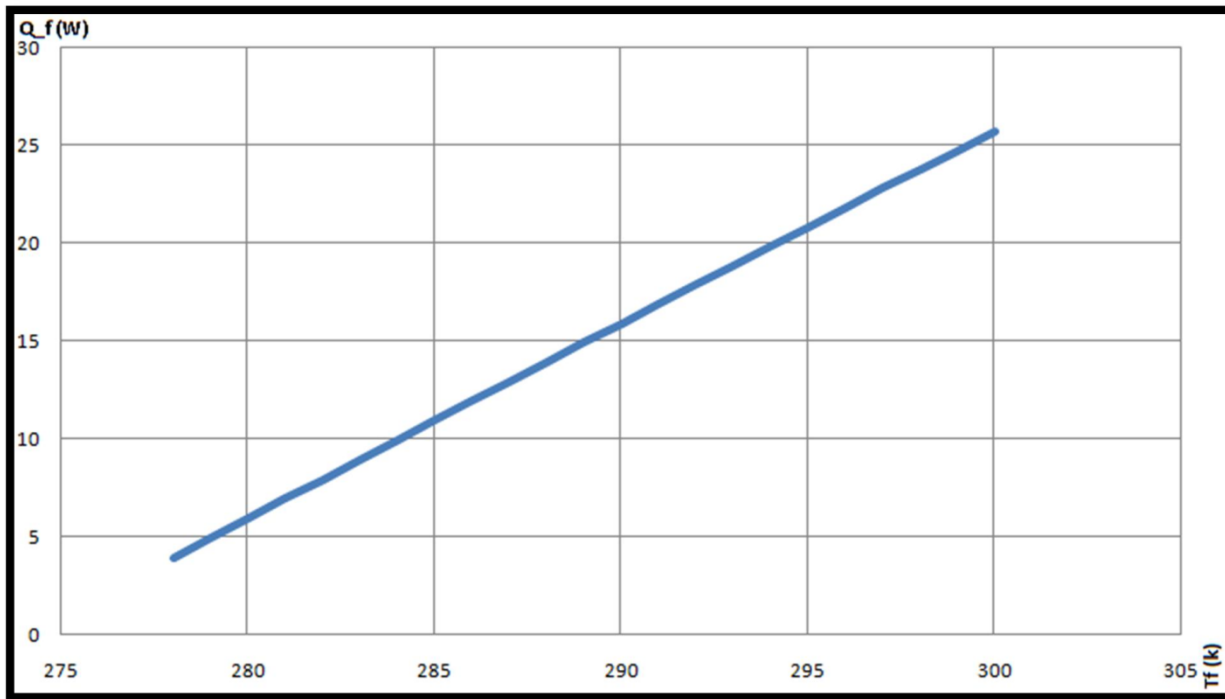


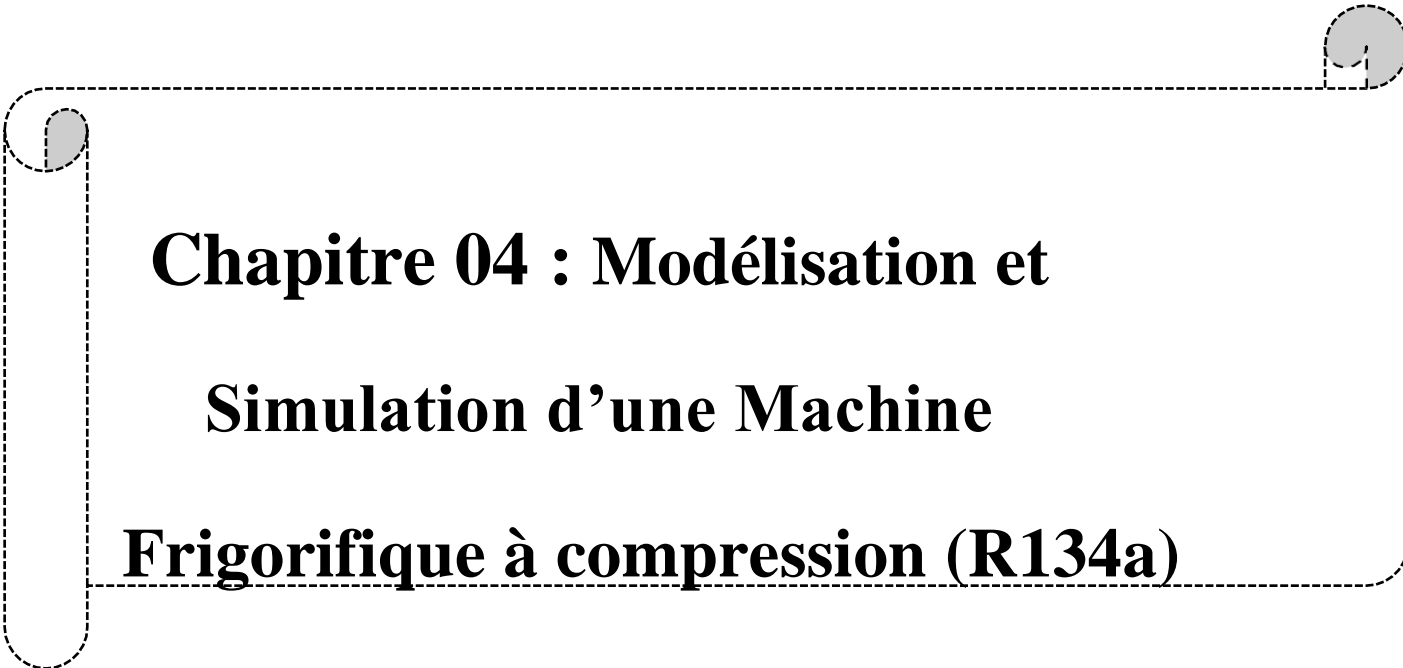
Figure (3.8) : Une courbe représentant les changements de Q_F en fonction de la température froide

.Remarque : d'après le graphe 6 qui représente la variation de Q_f en fonction de T_f . Nous avons remarqué que lorsque le COP_f augmente, le T_f augmente.

4. Conclusion :

On a déterminé des expressions simples pour les grandeurs liées au fonctionnement optimal d'un système thermoélectrique.

Bien qu'en apparence incomplète, la modélisation simplifiée standard donne des résultats relativement précis quant au point de fonctionnement optimal, dans le cas considéré. Ce n'est plus vrai en génération de courant, car les écarts de températures sont plus importants.



**Chapitre 04 : Modélisation et
Simulation d'une Machine
Frigorifique à compression (R134a)**

1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons faire la modélisation d'un compresseur hermétique. À piston. Il est essentiellement utilisé pour les installations des les petites puissances. Ces caractéristiques sont fournies par le constructeur du compresseur et elles expriment la puissance calorifique du condenseur ainsi que la puissance électrique absorbée par le compresseur en fonction de la température d'évaporation et de condensation de R134a. Pour chaque valeur de température de condensation et d'évaporation correspond une courbe.

Ensuite nous avons déterminé les propriétés thermodynamique du fluide frigorigène le R134a et Mentionner leur ces équations. .

2. Modélisation des propriétés thermodynamiques du R134a :

La modélisation des propriétés thermodynamiques à l'état de saturation a été réalisée suivant l'équation polynomiale de degré 3 de la forme :

$$Y = a_1 T^3 + a_2 T^2 + a_3 T + a_4$$

Ces équations sont valables pour l'intervalle de température T [-20 ,80°C]. La modélisation a été réalisée avec le logiciel **Excel** et les coefficients **a_i** ont été déterminés par la méthode des moindres carrés.

L'enthalpie du fluide frigorigène sous-refroidi liquide peut être calculée par :

$$H_{\text{sous-refroidi}} = H_{\text{saturé}} - C_{p\text{liq}} (T_{\text{saturation}} - T_{\text{sous-refroidi}})$$

L'enthalpie du fluide frigorigène surchauffée liquide peut être calculée par :

$$H_{\text{surchauffe}} = H_{\text{saturé}} + C_{p\text{vap}} (T_{\text{saturation}} - T_{\text{surchauffe}})$$

Equations polynomiales

$$Y = a_1 T^3 + a_2 T^2 + a_3 T + a_4$$

- Equation de pression de saturation et température de saturation [P_{sat}=f(T_{sat})]

$$P_{\text{sat}} = 1E-05T_{\text{sat}}^3 + 0,001T_{\text{sat}}^2 + 0,106T_{\text{sat}} + 2,935 \dots \dots \dots (4-1)$$

- Equation de température de saturation et pression de saturation [T_{sat}=f(P_{sat})]

$$T_{\text{sat}} = 0,009P_{\text{sat}}^3 - 0,478P_{\text{sat}}^2 + 10,69P_{\text{sat}} - 27,87 \dots \dots \dots (4-2)$$

- Equation d'enthalpie liquide et température de saturation [H_{liq-sat}=f(T_{sat})]

$$H_{\text{liq-sat}} = 2E-05T_{\text{sat}}^3 + 1,347T_{\text{sat}} + 200,0 \dots \dots \dots (4-3)$$

- Equation d'enthalpie vapeur et température de saturation [H_{vap-sat}=f(T_{sat})]

$$H_{\text{vap-liq}} = -3E-05T_{\text{sat}}^3 + 0,577T_{\text{sat}} + 398,5 \dots \dots \dots (4-4)$$

Chapitre 04 : Modélisation et simulation d'une Machine frigorifique à compression

- Equation d'entropie liquide et température de saturation $[S_{\text{liqu-sat}}=f(T_{\text{sat}})]$

$$S_{\text{liqu-sat}} = 5E-08T_{\text{sat}}^3 - 6E-06T_{\text{sat}}^2 + 0,004T_{\text{sat}} + 1,000 \dots\dots\dots(4-5)$$

- Equation d'entropie vapeur et température de saturation $[S_{\text{vap-sat}}=f(T_{\text{sat}})]$

$$S_{\text{vap-sat}} = -9E-08T_{\text{sat}}^3 + 8E-06T_{\text{sat}}^2 + 1,727 \dots\dots\dots(4-6)$$

- capacité thermique a pression constant liquide et temperature de saturation $[Cp_{\text{liqu-sat}}=f(T_{\text{sat}})]$

$$Cp_{\text{liqu-sat}} = 1E-06T_{\text{sat}}^3 - 4E-05T_{\text{sat}}^2 + 0,003T_{\text{sat}} + 1,345 \dots\dots\dots(4-7)$$

- capacité thermique a pression constant vapeur et température de saturation $[Cp_{\text{vap-sat}}=f(T_{\text{sat}})]$

$$Cp_{\text{liqu-sat}} = 2E-07T_{\text{sat}}^3 - 7E-06T_{\text{sat}}^2 + 0,001T_{\text{sat}} + 0,656 \dots\dots\dots(4-8)$$

- Equation volume spécifique liquide et temperature de saturation $[V_{\text{liqu-sat}}=f(T_{\text{sat}})] * 10^{-3}$

$$V_{\text{liqu-sat}} = 3E-07T_{\text{sat}}^3 - 3E-07T_{\text{sat}}^2 + 0,002T_{\text{sat}} + 0,773 \dots\dots\dots(4-9)$$

- Equation volume spécifique vapeur et temperature de saturation $[V_{\text{vap-sat}}=f(T_{\text{sat}})]$

$$V_{\text{vap-sat}} = -2E-07T_{\text{sat}}^3 + 4E-05T_{\text{sat}}^2 - 0,002T_{\text{sat}} + 0,070 \dots\dots\dots(4-10)$$

3. Les équations de cycle frigorifique :

Q_1 : c'est la quantité de chaleur absorbé.

Q_2 : c'est la quantité de chaleur dégagé.

W : le travail de compresseur

W_d : le travail de détente

W_n : le travail net

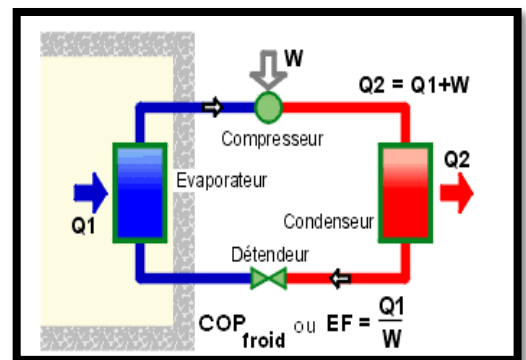


Figure (4.1) : Schéma d'un Cycle frigorifique

$$W_n = W + W_d \quad (W_d=0) \dots\dots\dots (4.11)$$

On a

$$W = h_2 - h_1 \dots\dots\dots (4.12)$$

Et

$$Q_1 = h_1 - h_4 \dots\dots\dots (4.13)$$

Débite fluide frigorifique (kg/s) : $\dot{m} = Q_{\text{evap}} \text{ (kw)} / Q_{\text{evap}} \text{ (kj/kg)} \dots\dots\dots (4.14)$

Donc COP_F est:

$$COP_F = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1) \dots\dots\dots (4.15) \text{ [39]}$$

Chapitre 04 : Modélisation et simulation d'une Machine frigorifique à compression

Coefficients	R134a
Equation de pression de saturation et température de saturation [$P_{sat}=f(T_{sat})$]	
a1	1E-05
a2	0.001
a3	0.106
a4	2,935
Equation de température de saturation et pression de saturation [$T_{sat}=f(P_{sat})$]	
a1	0.009
a2	-0.478
a3	10.69
a4	-27,87
Equation d'enthalpie liquide et température de saturation [$H_{liqu-sat}=f(T_{sat})$]	
a1	2E-05
a2	0
a3	1.347
a4	200
Equation d'enthalpie vapeur et température de saturation [$H_{vap-sat}=f(T_{sat})$]	
a1	-3E-05
a2	0
a3	0.577
a4	398 ,5
Equation d'entropie liquide et température de saturation [$S_{liqu-sat}=f(T_{sat})$]	
a1	5E-08
a2	-6E-06
a3	0.004
a4	1
Equation d'entropie vapeur et température de saturation [$S_{vap-sat}=f(T_{sat})$]	
a1	-9E-08
a2	8E-06
a3	0
a4	1.727
capacité thermique a pression constant liquide et température de saturation [$Cp_{liqu-sat}=f(T_{sat})$]	
a1	1E-06
a2	-4E-05
a3	0.003
a4	1.345
capacité thermique a pression constant vapeur et température de saturation [$Cp_{vap-sat}=f(T_{sat})$]	
a1	2E-07
a2	-7E-06
a3	0.001
a4	0.656
Equation volume spécifique liquide et température de saturation [$V_{liqu-sat}=f(T_{sat})$]*10 ⁻³	
a1	3E-07
a2	-3E-07
a3	-0.002
a4	0.773
Equation volume spécifique vapeur et température de saturation [$V_{vap-sat}=f(T_{sat})$]	
a1	-2E-07
a2	4E-05
a3	-0.002
a4	0.070

Tableau (4.1) : coefficients des équations polynomiales des propriétés physique

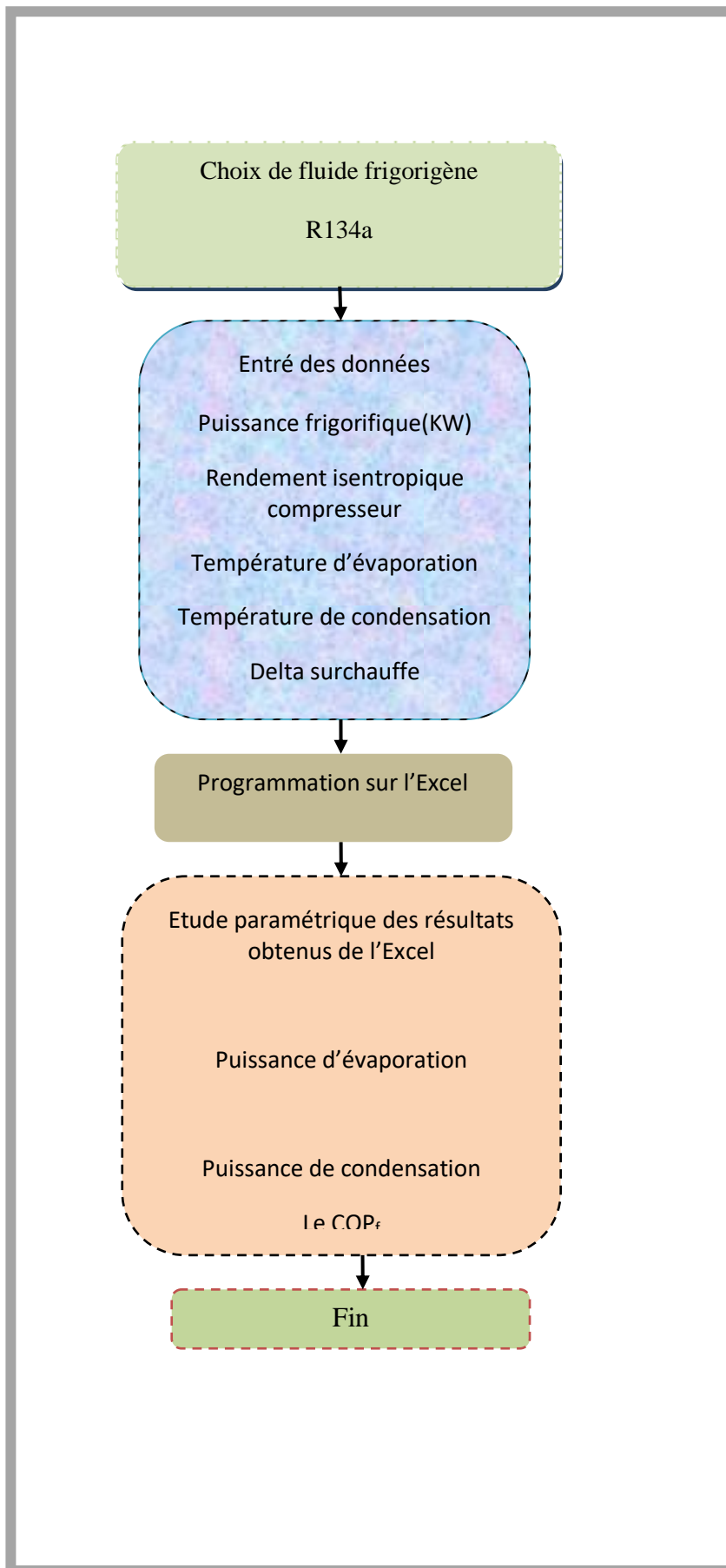


Figure (4.2) : organigramme d'un Modélisation compresseur

4. Etude paramétrique :

Données	
Puissance Frigo= Q_{evap} (kW)	0.63
Rend.isentrop Comp	1.00
T_{evap} (°C)	-10.00
T_{cond} (°C)	40.00
Vitesse rot. Comp (tr/min)	2800
$\Delta T_{surchauffe}$ (°C)	5.00

Tableau (4. 2) : les donnés

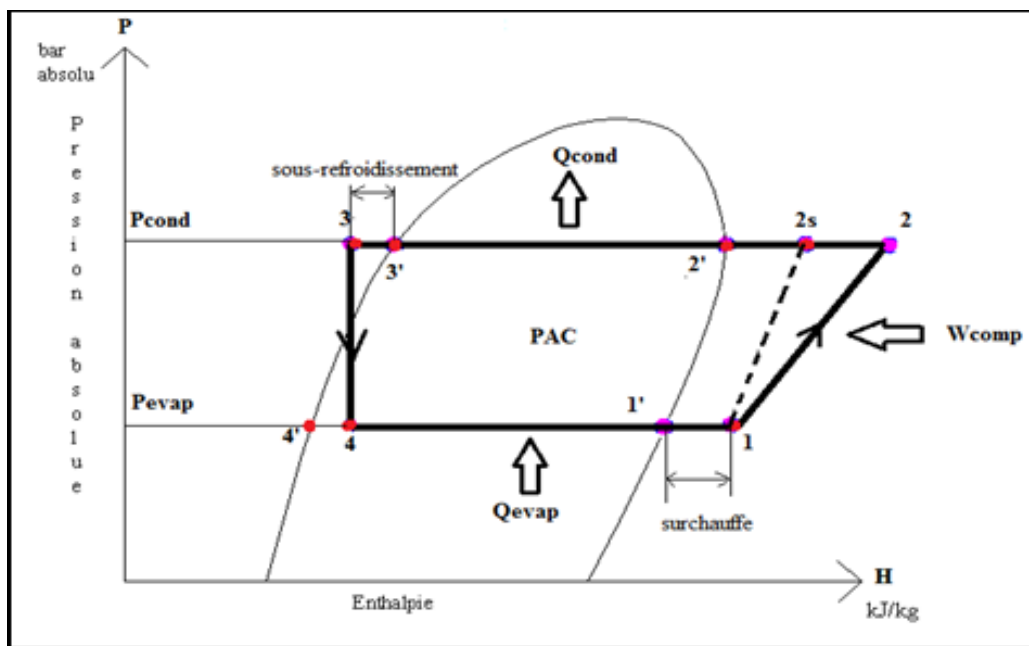


Figure (4.3) : cycle thermodynamique d'une machine frigorifique

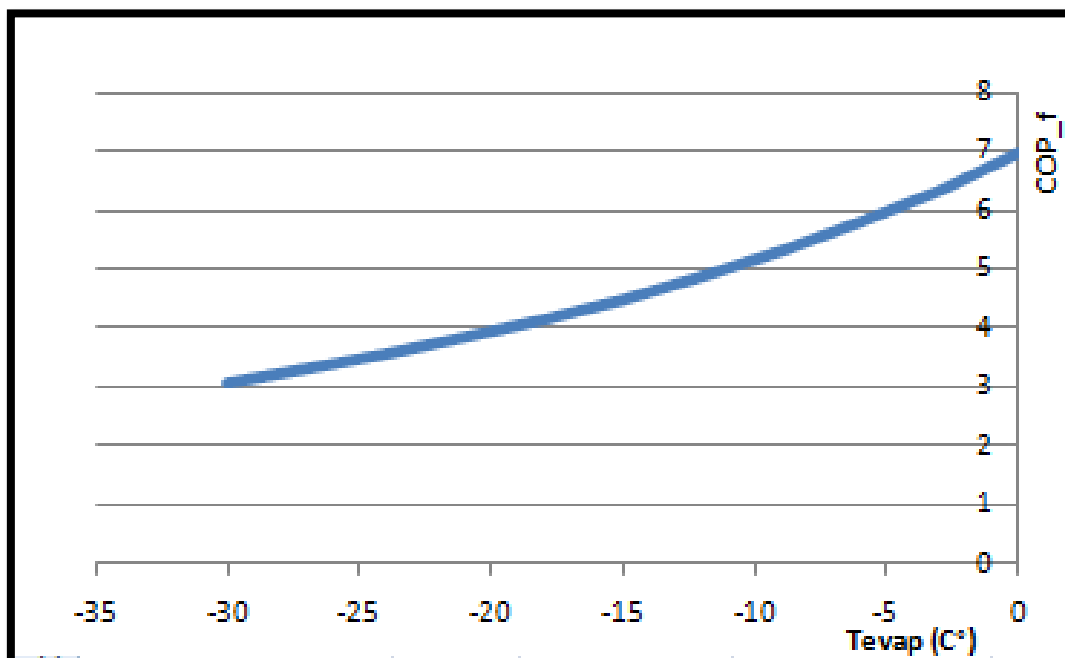
Résultats	R134a
Pevap (bar)	1.97
Pcond (bar)	9.42
Taux de comp=Pcond/Pevap	4.79
Rend.vol Comp=1-0,05*(Taux de comp)	0.76
T1'=T4 =T4'=Tevap (°C)	-10.00
T3'=T2'=Tcond (°C)	40.00
T1 (°C)	-5.00
H(1') (kJ/kg)	392.76
Cp(1') (kJ/kg.°C)	0.846
S(1') (kJ/kg.K)	1.728
H(1) (kJ/kg)	396.99
S(1)=S(2s) (kJ/kg.K)	1.744
vol.spec(1)=v(1) (m3/kg)	0.081
H(2') (kJ/kg)	419.66
Cp(2') (kJ/kg.°C)	1.121
S(2') (kJ/kg.K)	1.734
H(3') (kJ/kg)	255.16
Cp(3') (liq) (kJ/kg.°C)	1.465
H(3)=H(4) (kJ/kg)	250.93
H(4') (kJ/kg)	186.51
Titre X(4)	0.31
T(2s) (K)	315.74
T(2s) (°C)	42.74
H(2s) (kJ/kg)	424.41
H(2) (kJ/kg)	424.41
T(2) (°C)	44.24
T(3) (°C)	37.11
Δtsous-refroidissement (°C)	2.89
Pfrigo=Qevap en (kJ/kg)	141.83
Wcomp (KJ/kg)	27.42
COPf	5.17
mfluide=Débit fluide frigo (kg/s)	0.004
Cylindrée Comp (cm3)	22.09

Tableau (4.3) : les résultats

4.1.étude paramétrique sur la variation du COP_f en fonction température d'évaporation :

T _{evap} (c)	cop _f
0	6,98
-3	6,35
-6	5,81
-9	5,32
-12	4,89
-15	4,51
-18	4,16
-21	3,85
-24	3,57
-27	3,32
-30	3,09

Tableau (4.4) : la variation du COP_f en fonction de T_{evap} avec la fixation de T_{cond}.



Figure(4.4) : une courbe représente la variation du COP_f en fonction de T_{evap} avec la fixation T_{cond}

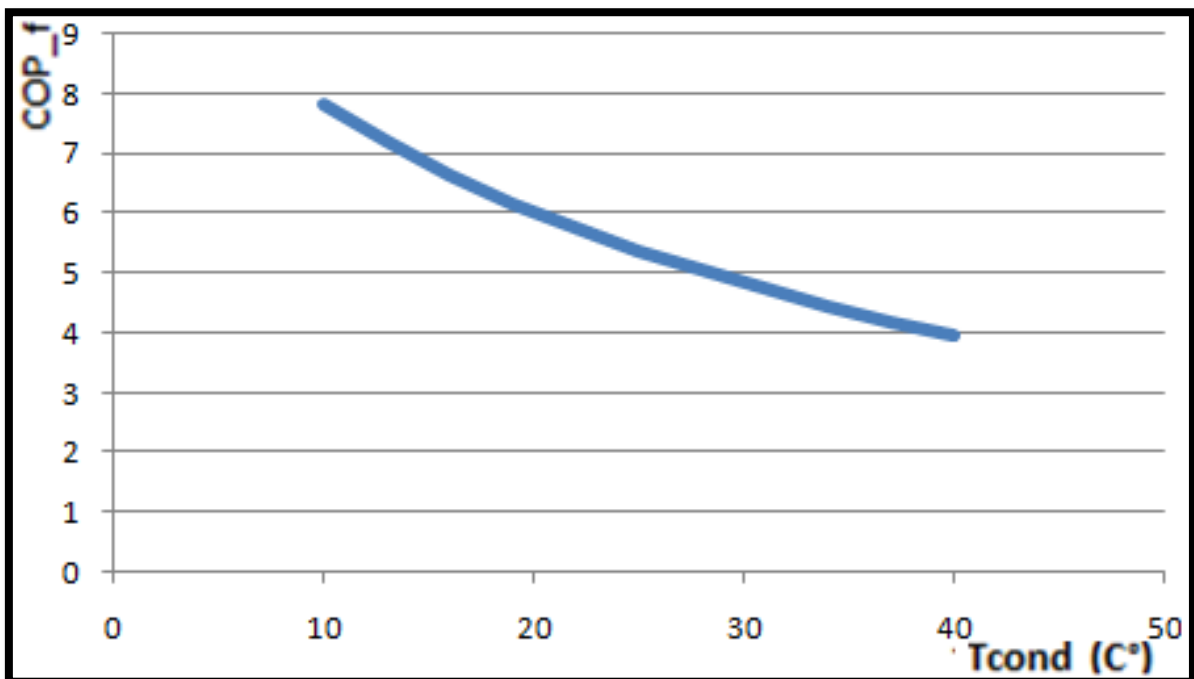
Chapitre 04 : Modélisation et simulation d'une Machine frigorifique à compression

Remarque : d'après la figure qui représente la variation du COP_f en fonction de T_{evap} avec la fixation T_{cond}=cst=30 nous avons remarqué que lorsque le T_{evap} diminue le COP_f se diminue.

4.2.étude paramétrique sur la variation du COP_f en fonction température de Condensation :

T _{cond}	COP _f
10	7,84
13	7,2
16	6,65
19	6,17
22	5,75
25	5,37
28	5,04
31	4,73
34	4,45
37	4,19
40	3,95

Tableau (4.5) : la variation du COP_f en fonction T_{cond} de avec la fixation T_{evap}



Figure(4.5) : une courbe représente la variation du COP_f en fonction T_{cond} de avec la fixation T_{evap}

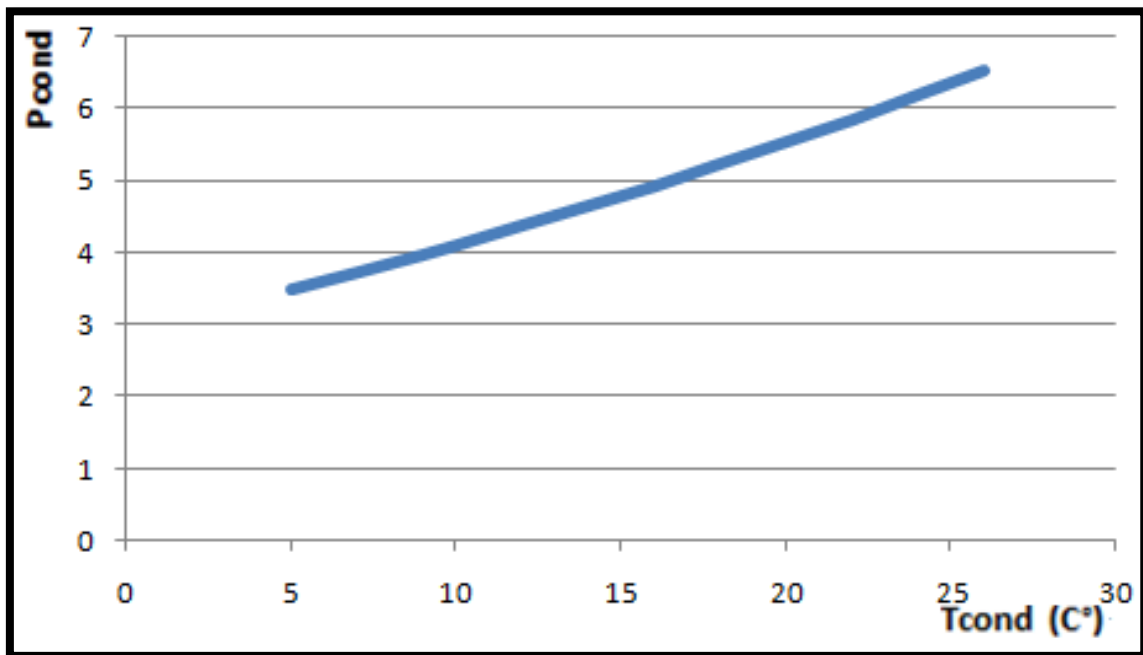
Chapitre 04 : Modélisation et simulation d'une Machine frigorifique à compression

Remarque : D'après le graphe 4 qui représente la variation du COPf en fonction de Tcond avec la fixation de Tevap nous avons remarqué lorsque le Tcond augmente le COPf diminué

4.3.étude paramétrique sur la variation de la pression de condensation en fonction température de condensation :

T _{cond}	P _{cond}
5	3,49
7	3,73
9	3,98
10	4,11
12	4,37
14	4,64
16	4,93
18	5,23
20	5,54
22	5,86
24	6,19
26	6,54

Tableau (4.6) : la variation de la pression de condensation en fonction température de condensation la fixation de température de la l'évaporation.



Figure(4.6) : une courbe représente la variation de la pression de condensation en fonction température de condensation avec la fixation de température de l'évaporation.

Chapitre 04 : Modélisation et simulation d'une Machine frigorifique à compression

Remarque : d'après la figure 5 qui représente la variation de la pression de condensation en fonction température de condensation avec la fixation de température de l'évaporation. Nous avons remarqué que lorsque le P_{cond} a T_{cond} augmente P_{cond} démineur .

5. Conclusion :

On a déterminé des expressions simples pour les grandeurs liées au fonctionnement optimal d'un Compresseur la puissance frigorifique et rendement isentropique la puissance électrique et les autres Propriétés.

Ensuite nous avons varié ces propriétés pour voir leur effet sur le coefficient de performances et les Autres propriétés pour assures des bon performances.



Chapitre 05 : Réalisation d'une machine frigorifique à compression de vapeur

1. Introduction:

Pour la réalisation de notre projet de réfrigération hybride compression plus la thermoélectrique Nous avons divisé le projet en deux parties, la premier partie c'est le coté de compression et la deuxième partie c'est le coté thermoélectrique

Dans ce chapitre nous avons faire la réalisation de la premier partie le coté compression.

2. Matériel et outillage nécessaire pour la réalisation :



Figure (5.1) : le matériel et l'outillage utilisés pour la réalisation de projet.

La réalisation s'est déroulée au niveau des ateliers du département de mécanique.

Nous donnons au-dessus quelques éléments et outillages que nous avons utilisés (figure 1).

3. Les étapes de la réalisation :

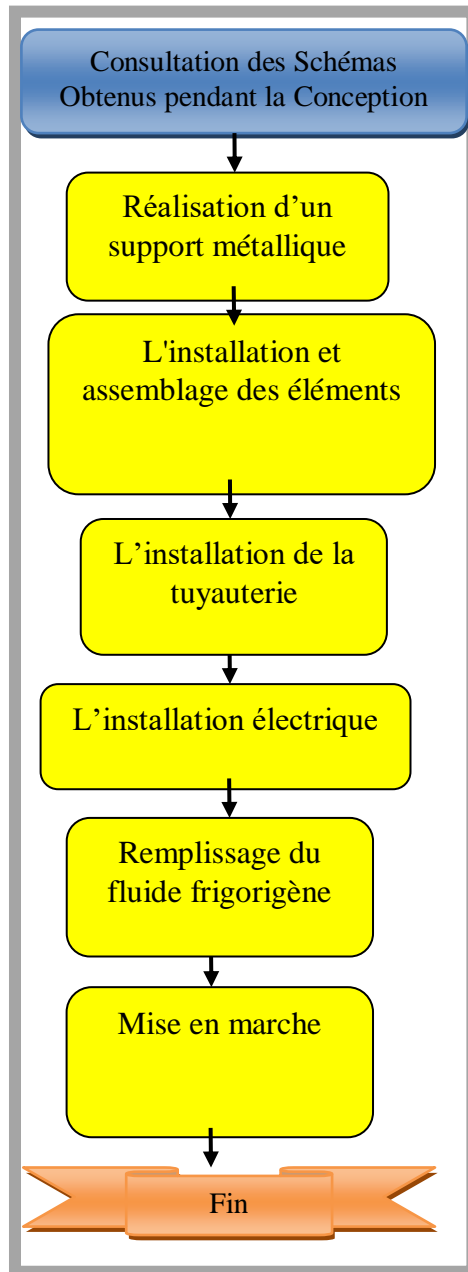


Figure (5.2) : Organigramme des étapes de la réalisation

3.1. Etape 1 : réalisation d'un support :

Nous avons fabriqué un support de démission (43cm*28cm*37cm) pour mettre l'installation est fixé sur le support.

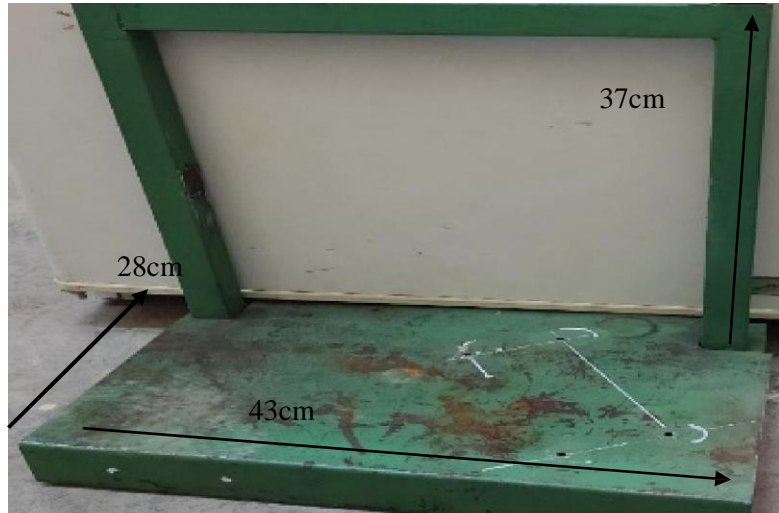


Figure (5.3) : la réalisation d'un support

3.2. Etape 2 : l'installation et assemblage des éléments :

Dans cette étape nous avons fixé l'élément et assemblé les éléments sur le support selon le schéma Figure 4

BP : Manomètre de la haute pression

HP : Manomètre de la Basse pression

P : Pressostat

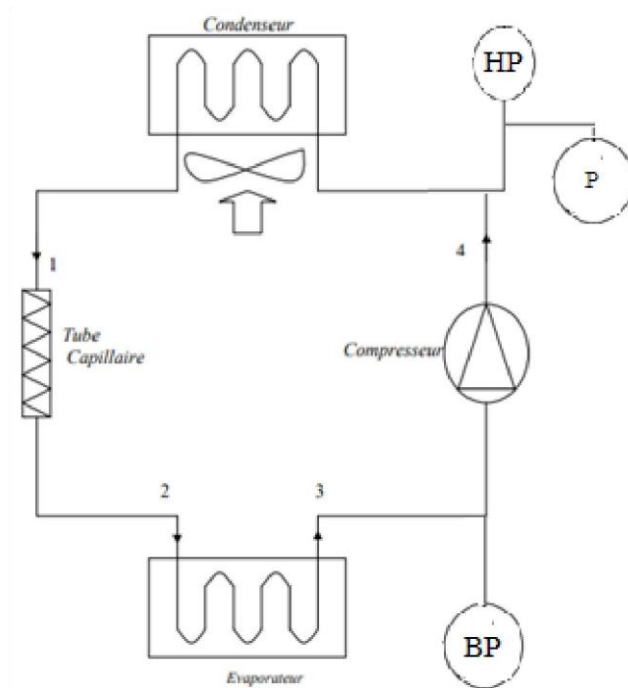


Figure (5.4) : Schéma d'assemblage

3.2.1. Installation de la tuyauterie :

Avant d'aller, en alimente le compresseur pour déterminer la sortie et l'entrée et qu'il se marche et découvert l'entrée et la sortie, après en le fixe dans le support. Ensuite, en soude la sortie de compresseur avec l'entrée de condenseur (Figure 5), après en créer un T au milieu de ce tuyau. (Figure 6).

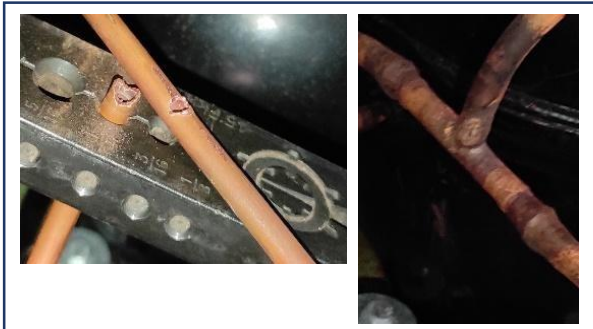


Figure (5.6) : Création

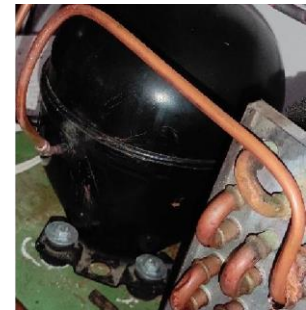


Figure (5.5) : la soudure entre la sortie de compresseur et l'entrée de condenseur.

Par la suite, en connecte la sortie de tuyau avec le filtre déshydraté.

Dans la suite, le capillaire avec le filtre (Figure 7), après le capillaire avec l'évaporateur.

Deuxièmes (figure 8), en utilisant le tuyau 1/4 en créer un évaporateur avec la cintreuse

(figure 9).

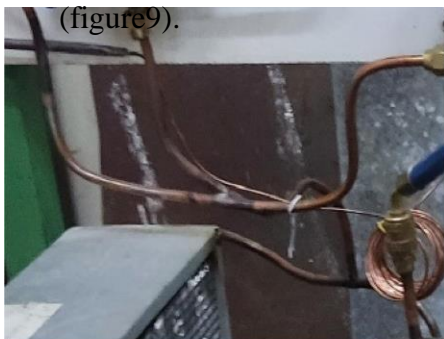


Figure (5.8) : soudure entre le capillaire et l'évaporateur



Figure (5.7) : soudure entre le capillaire et le filtre



Figure (5.9) : la Cintreuse

Vane, qui se divise en deux un coté vers le Mano de BP et un coté vers l'entrée de compresseur (figure 10).

En finale la tuyauterie de ce projet par une vanne (dans le T qui a été déjà conçue entre le compresseur et le condenseur) qu'il se partage avec un Mano HP et la Pressostat (figure 11).

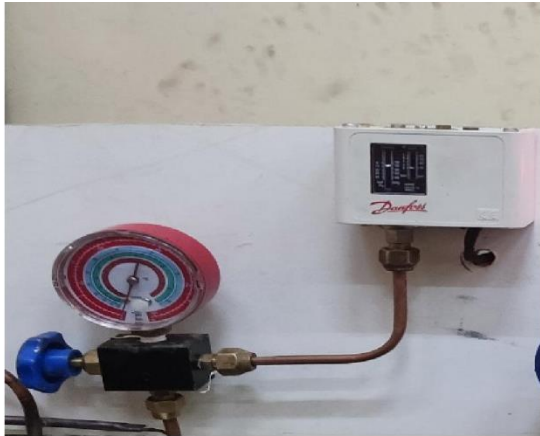


Figure (5.10) : la vanne le Mano BP

Figure (5.11) : la Vanne et le Mano HP

Le pressostat a été réglé comme désigné dans la figure 43 à 14 Bar. (Figure12)



Figure (5.12) : Réglage de pressostat

3.3. Etape 3 : Installation électrique :

Dans cette étape nous avons fait l'installation électrique pour allumer le compresseur, le ventilateur de condenseur et le voyant installer selon le schéma (Figure 13) :

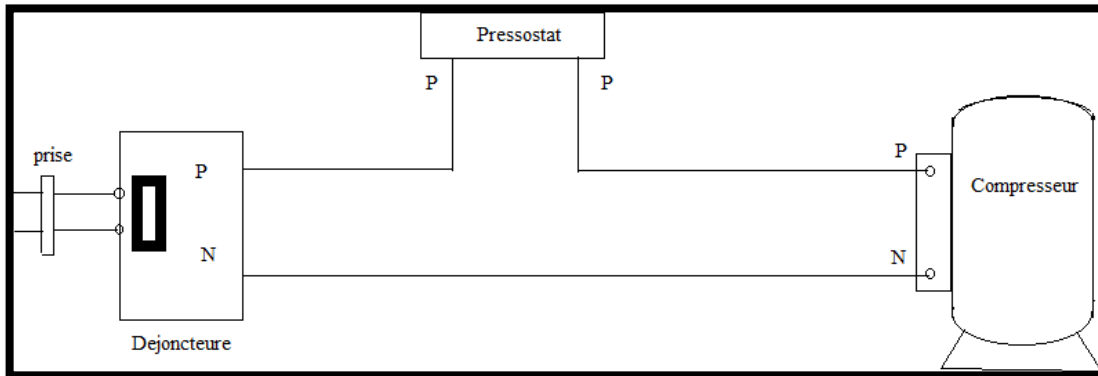


Figure (5.13) : Schéma de l'installation électrique

* Nous avons raccordé tous les fils des éléments avec des dominos sur l'arrière dans une boîte de jonction après on a placé un pour allumer le système par la prise 220v. Figure14

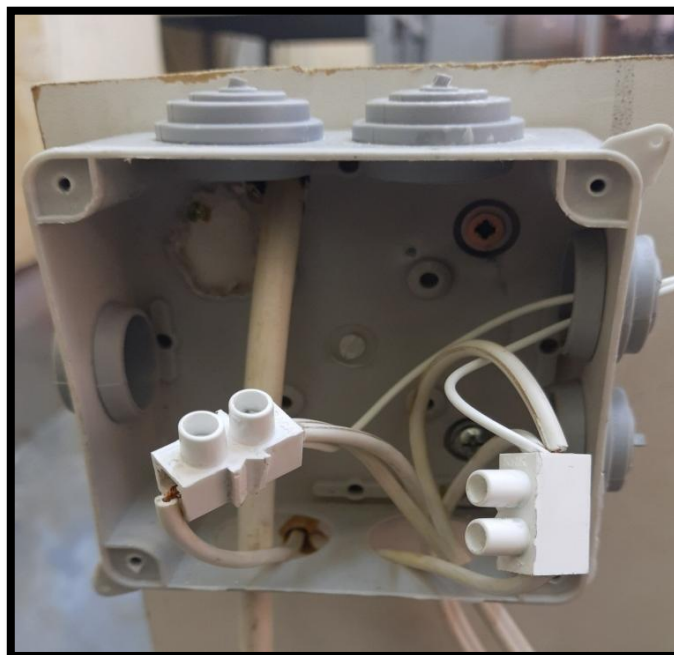


Figure (5.14) : boîte de jonction

3.4.Etape 4 : Remplissage du Gaz Frigorigène :

Avant de remplir le gaz frigorigène, on a fait le tirage au vide en utilisant le système lui-même : on allume le disjoncteur le compresseur démarre et la basse pression chute dessous de zéro, on laisse comme ça pour quelque minute ensuite on éteint le disjoncteur. On remarque le Mano BP ne retourne pas à zéro ce qui veut dire que le Tirage au vide a été très bien fait. (Figure 15)

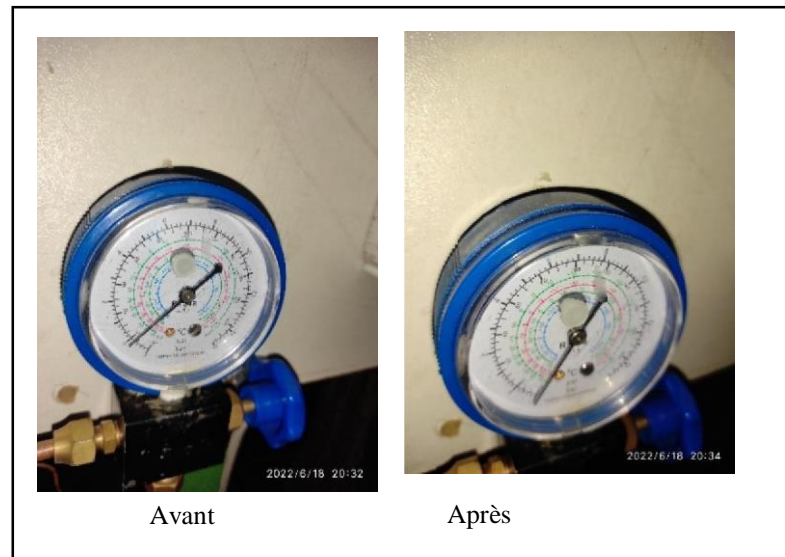


Figure (5.15): Le Tirage Au vide

Après le Tirage au vide, on remplit le compresseur avec le gaz frigorigène R12 jusqu'à ce que le Mano de BP augmente à 8 Bar. (Figure 16)



Figure (5.16) : Remplissage Du Gaz Frigorigène (R12).

Nous remarquons que l'échangeur commence à congeler (figure16).



Figure (5.17) : début de congélation de l'échangeur.

4. Conclusion :

À la fin de la réalisation du système, nous avons testé chaque composant si Il ya des fuites pour nous assurons la mise marche du système et pour avoir des meilleures performances.



Chapitre 06 : Réalisation du système De refroidissement thermoélectrique

1. Introduction:

Dans ce chapitre nous avons fait la deuxième partie de la réalisation c'est le coté thermoélectrique.

2. Matériel et outillage nécessaire pour la réalisation:

Nous donnons au-dessus quelques éléments et outillages que nous avons utilisés (figure 1).

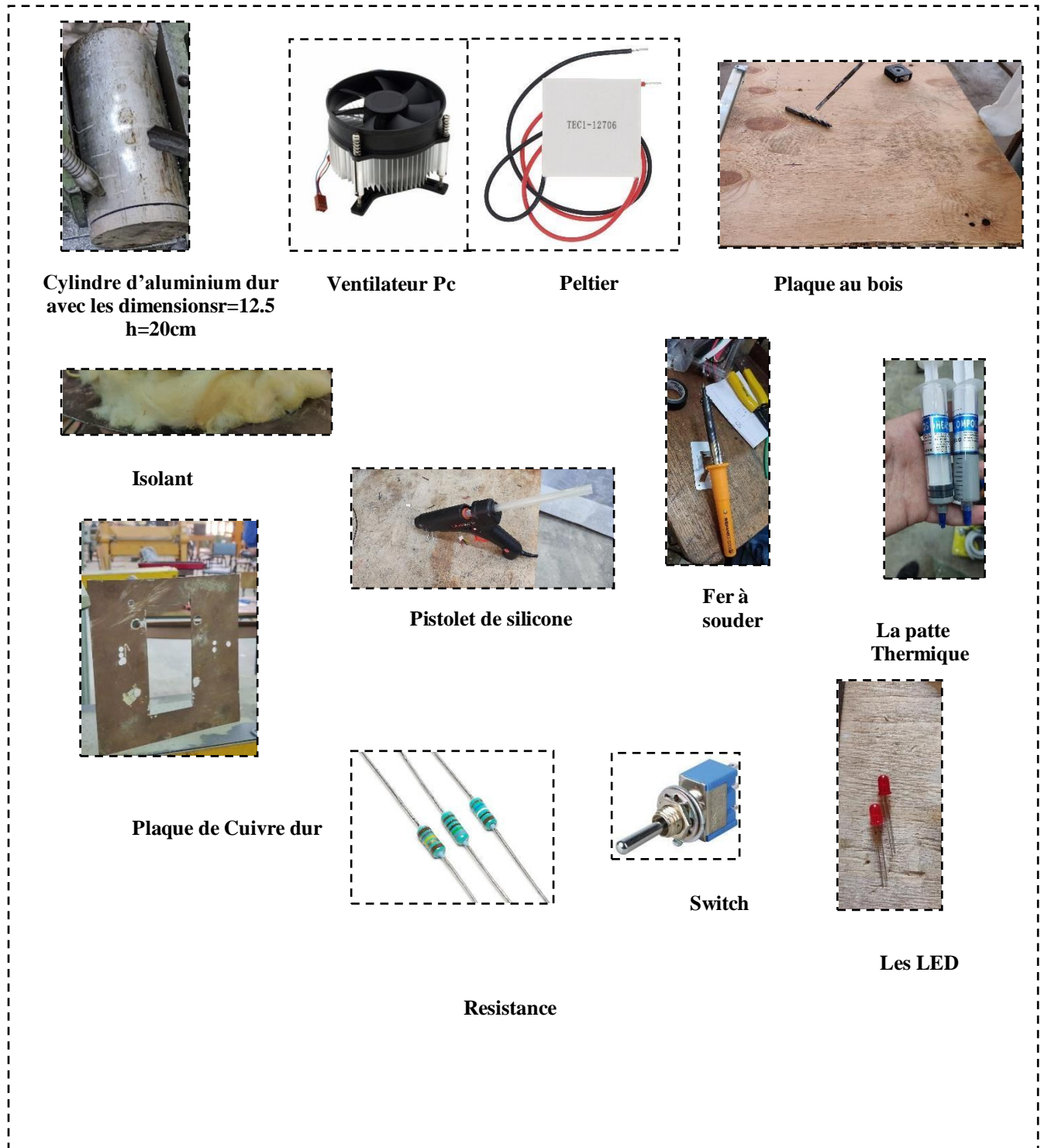


Figure (6.1) : le matériel et l'outillage utilisé pour la réalisation

3. Les étapes de la réalisation :

Nous avons passé avec plusieurs étapes, nous discuterons de tout cela en détail ci-dessous. (Figure2)

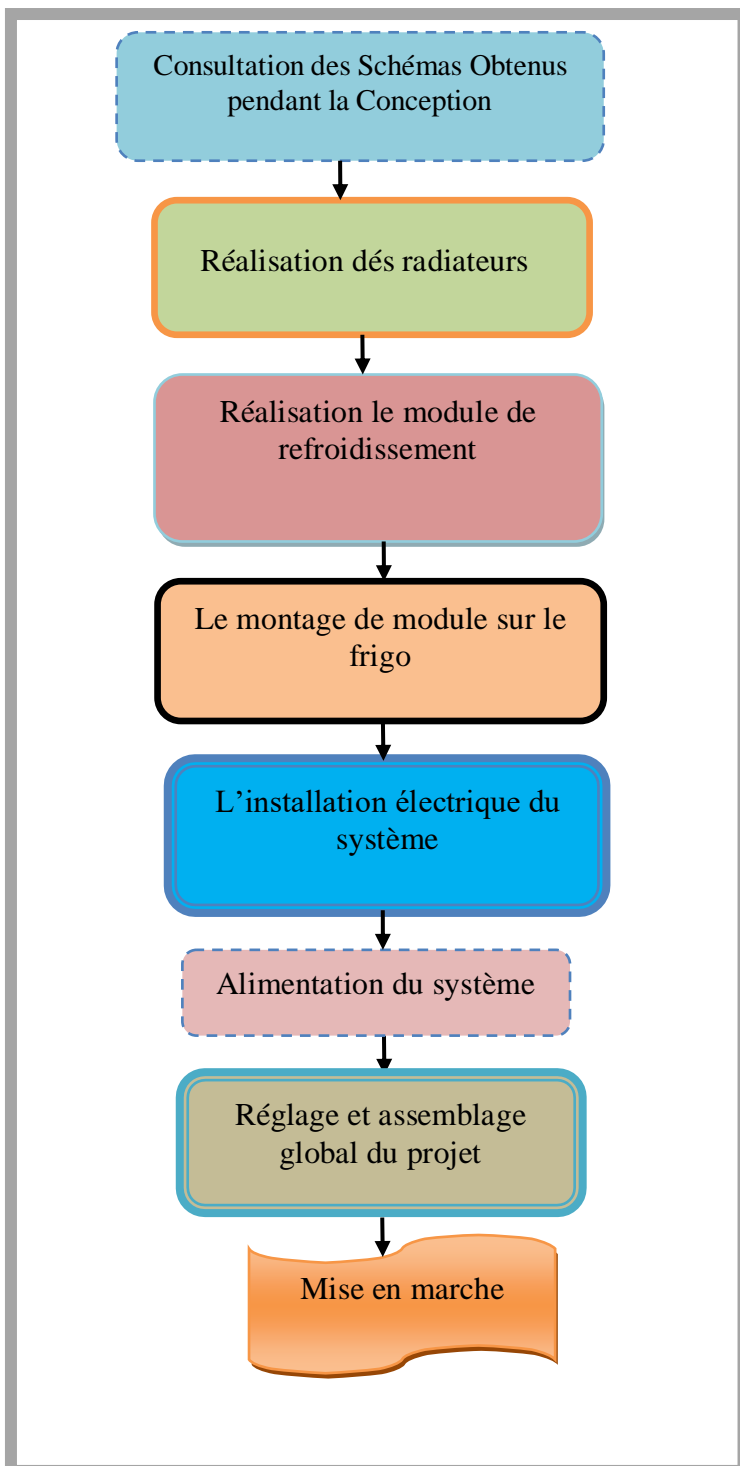


Figure (6.2) : un organigramme des étapes de la réalisation coté thermoélectrique.

3.1. Etape 1 : la réalisation des radiateurs :

-Au départ, nous avons besoin de deux radiateur donc nous prenons au tourneur un block cylindrique en aluminium de 8 kg, pour coupé 2 morceaux égaux selon le figure (6.3) et (6.4)



Figure (6.4) : les morceaux d'aluminium



Figure (6.3) : le coupage des morceaux d'aluminium

-Puis nous avons emmené à fraiseur pour le creuser selon notre dimension selon le dessin technique (figure (6.7)).

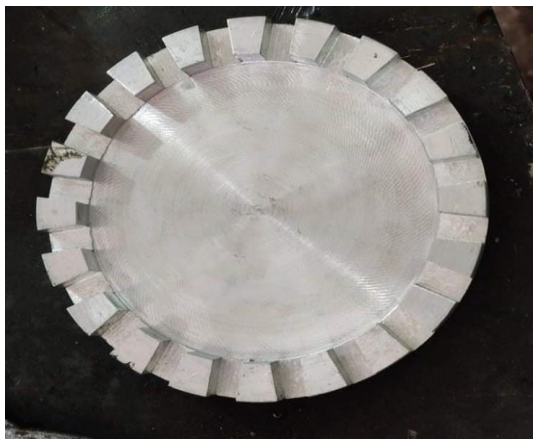


Figure (6.5) : vue de dessus de radiateur



Figure (6.6) : vue de coté de radiateur

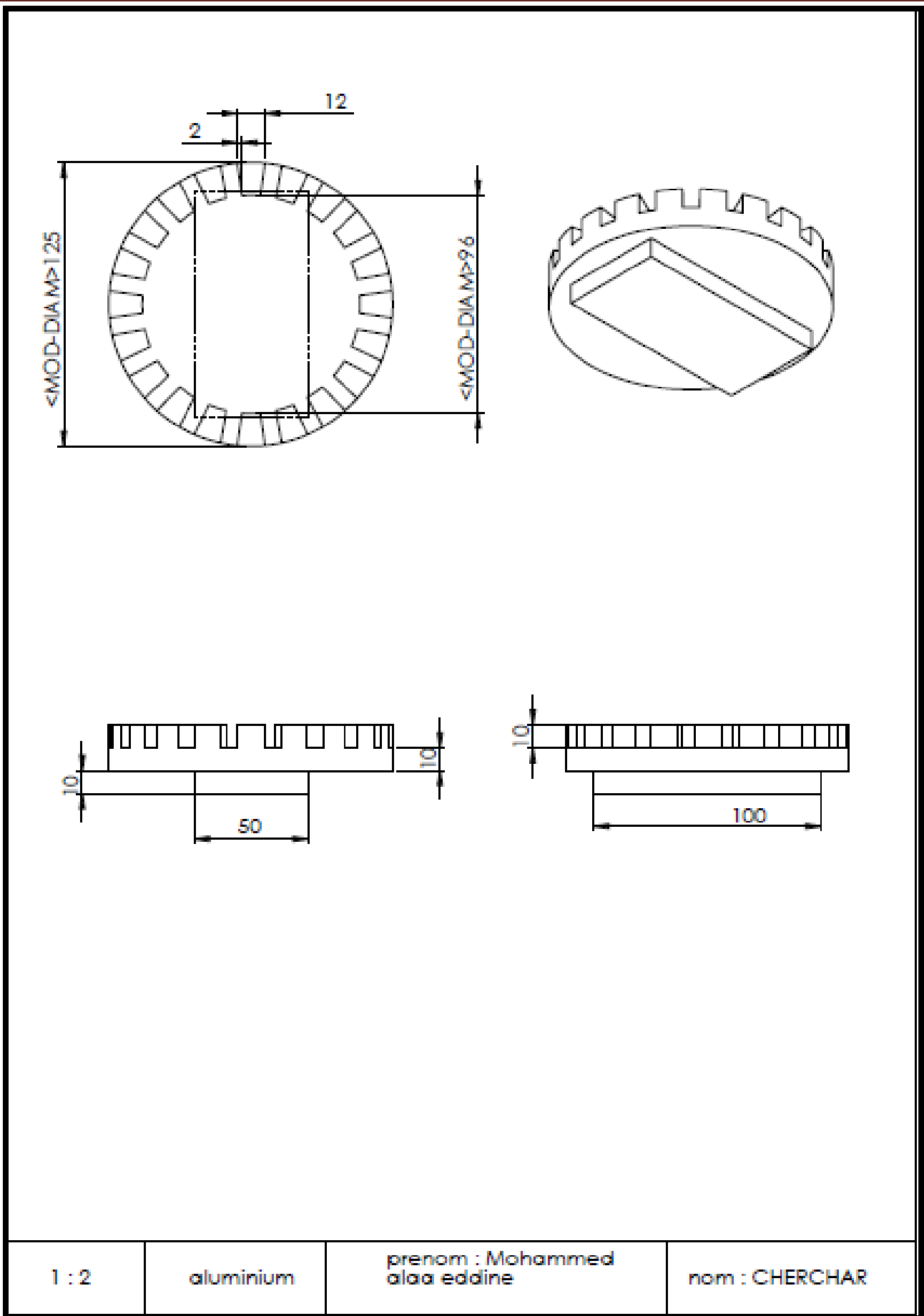


Figure (6.7) : dessin technique d'un radiateur

3.2. Etape 2 : la réalisation de module de refroidissement. :

Dans cette étape nous avons faire l'assemblage des éléments pour réalisé le module de refroidissement.

*On fixé chaque ventilateur avec un radiateur (figure (6.8)).

*On monte les Peltier avec la patte thermique sur le haut des radiateurs (Figure (6.9)).

*On raccrocher les deux radiateurs avec deux tiges et un ressort et l'isolant.

*On ajuste aux milieux des blocks une plaque de fer comme support (figure (6.10)).



Figure (6.8) : la fixation des ventilateurs sur les radiateurs

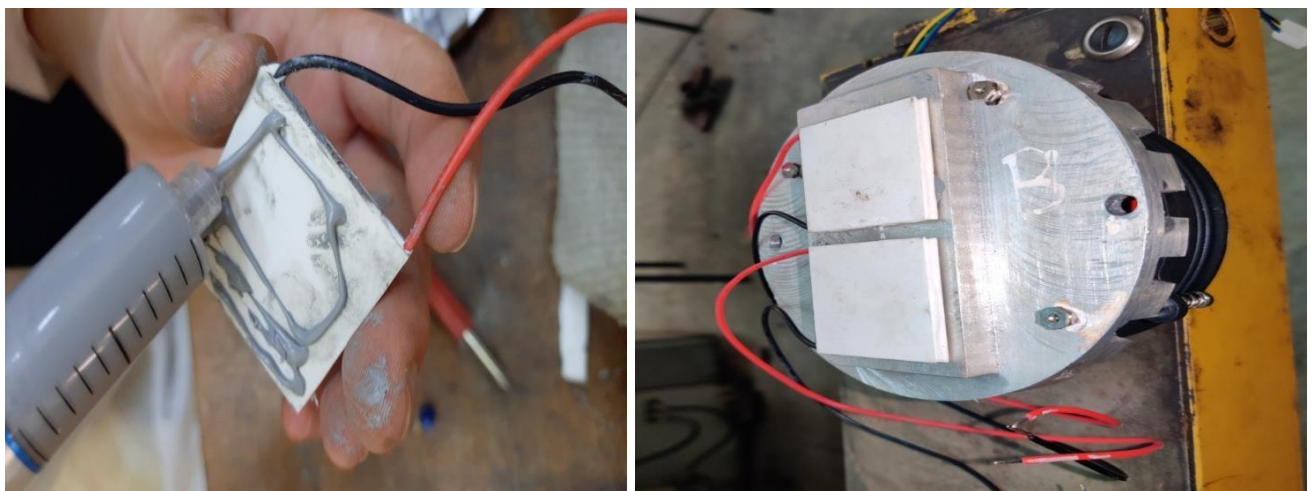


Figure (6.9) : La fixation des Peltier avec la patte thermique

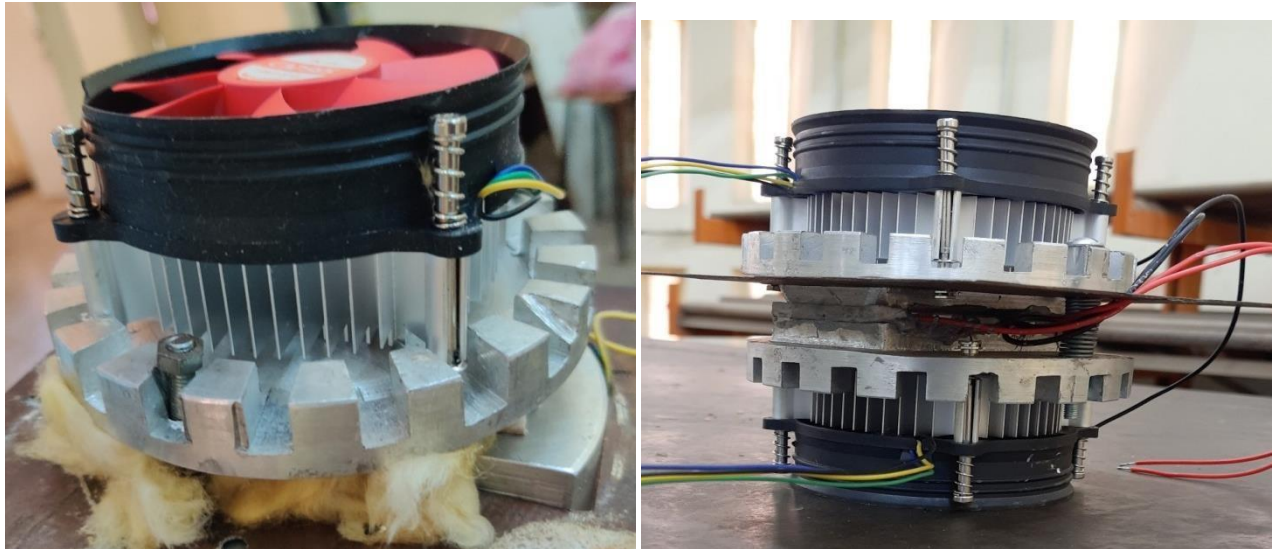


Figure (6.10) : l'assemblage final de module de refroidissement

3.3. Etape 3 : le montage de module sur le frigo :

- On fait sortir les fiches d'alimentation pour faire le câblage électrique après.
- On ouvre le frigo et la plaque du bois avec une tronçonneuse en cercle (D12.5cm) (figure (6.11)).
- Dans la suite, on fait le montage de module refroidissement (figure (6.12)).
- On fait sortir tous les câbles pour faire l'installation électrique.



Figure (6.11) : l'ouverture du frigo et la plaque du bois

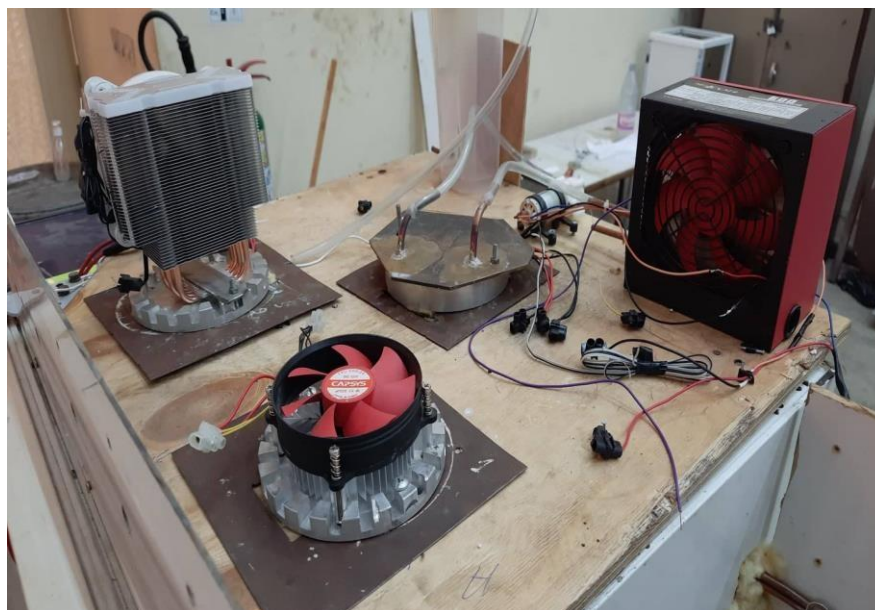
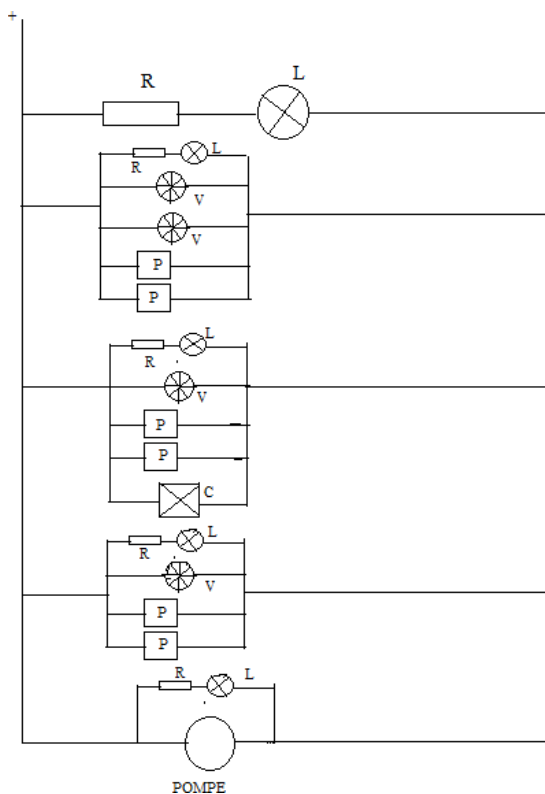


Figure (6.12) : Le montage de module de refroidissement

3.4. Etape 4 : Installation électrique du système :

Nous avons faire installation du système selon le schéma (figure (6.13)).



Légende :

L : LED

R:Resistance

V:Ventilateur

P : Peltier

C : caloduc

Figure (6.13) : schéma électrique du système :

Après la consultation de schéma nous avons faire raccordement des fils et les Switch
Et l'afficheur avec le fer a soudé.

*Câblage des fils (figure (6.14)).

*Câblage de Switch (figure (6.15)).

*Câblage de l'afficheur (figure (6.16)).

*Câblage des boutons et voyants (figure (6.14))



Figure (6.15) : Câblage des Switch

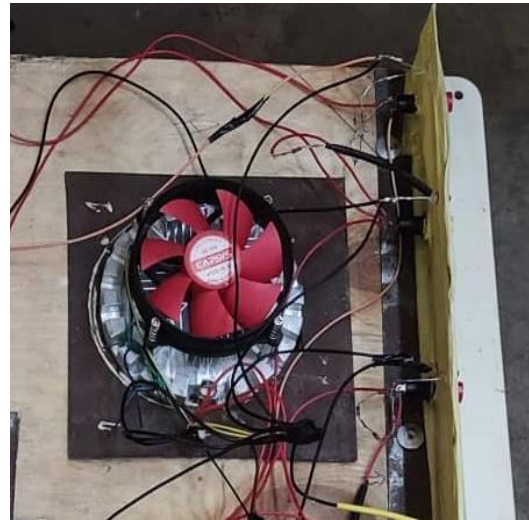


Figure (6.14) : câblage des fils

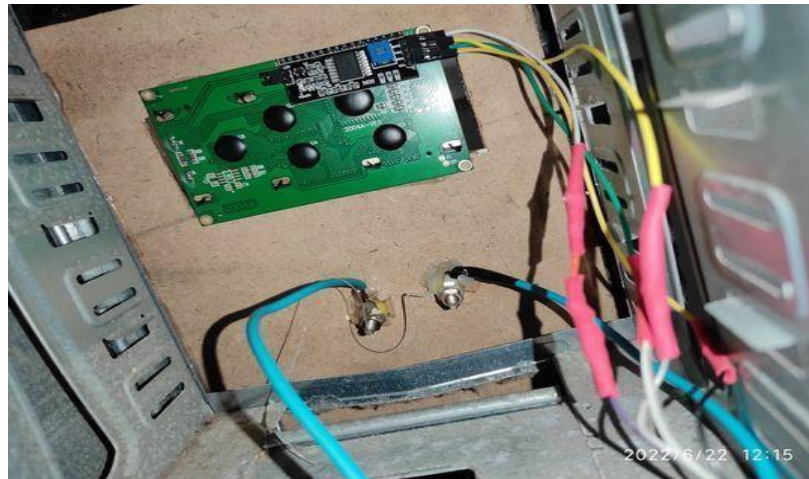


Figure (6.16) : câblage d'afficheur

3.5. Etape 5 : alimentation du système :

*Pour allumé le système nous avons besoin d'une alimentation de 12V (figure (6.17))

Nous avons faire leur câblage et placé dans une unité centrale (figure(6.18)).

*le montage des afficheurs et le fixage (figure(6.19)) (figure(6.20)).

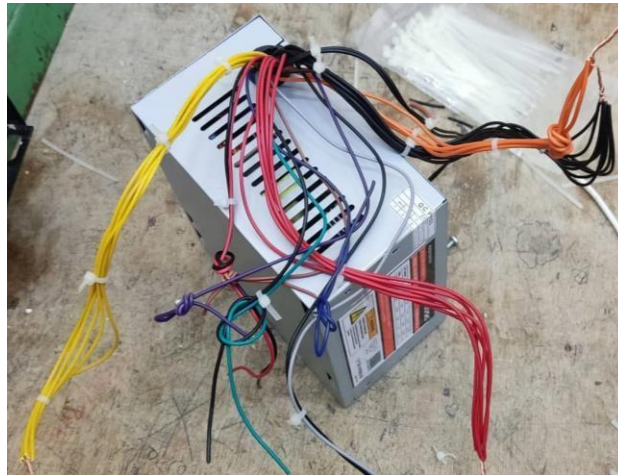


Figure (6.17) : alimentation de 12V

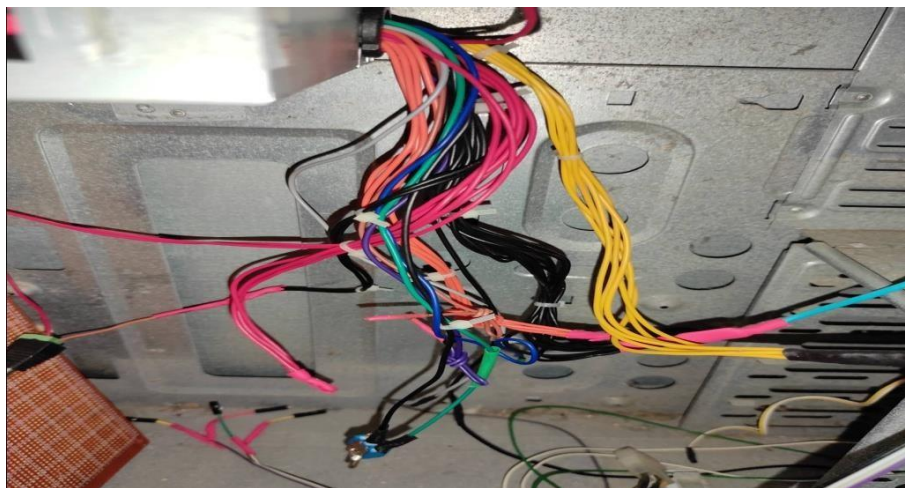


Figure (6.18) : le câblage d'alimentation dans l'unité.



Figure (6.19) : le montage d'afficheur LCD sur l'unité.

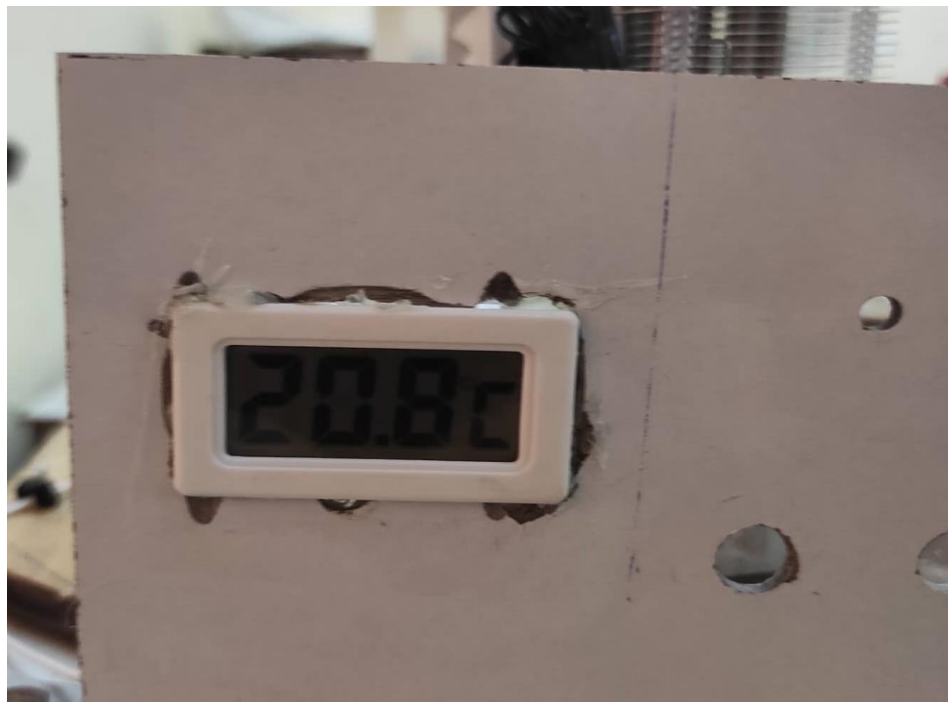


Figure (6.20) : le montage du petit afficheur de température sur la plaque.

La dernière étape : assemblage globale de projet

*A la fin nous avons assemblé le projet global et entré l'échangeur dans le frigo a travers le trou sur le coté de frigo selon la (figure (6.21-22))

*Nous avons ramené un générateur pour augmente la tension et allument le système (figure (6.23)).



Figure (6.21) : le trou sur le coté de frigo



Figure (6.22) : le rentré d'échangeur dans le frigo.



Figure (6.23) : réalisation globale de projet

4. Conclusion :

A la fin de la réalisation du système et la mise marche de tout les éléments nous avons remarqué que la puissance électrique de l'alimentation est faible donc nous avons utilisé un générateur pour augmente la tension et la puissance électrique.

Après l'alimentations et le démarrage du système l'afficheur de température affiche 27°C une heure après elle est diminué jusqu'à 19°C.



Chapitre 07 : Acquisition des données

1. Introduction :

Une équipe de développeurs composée de Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, David Mellis et Nicholas Zambetti a imaginé un projet répondant au doux nom de Arduino et mettant en œuvre une petite carte électronique programmable et un logiciel multiplateforme, qui puisse être accessible à tout un chacun dans le but de créer facilement des systèmes électroniques. Étant donné qu'il y a des débutants parmi nous, commençons par voir un peu le vocabulaire commun propre au domaine de l'électronique et de l'informatique.

Dans ce chapitre nous avons faire un recherche sur le arduino et ces types avec le programme utilisé pour programmé les cartes arduino.

Ensuite nous avons faire une étude sur les captures de température les thermocouples et le DS18B20 et le Bluetooth hc05 et l'afficheur LCD et nous avons faire des schémas de câblage et montage avec carte arduino [40]

2. Arduino:

Le système Arduino est un outil pour fabriquer de petits ordinateurs qui peuvent capter et contrôler davantage de choses du monde matériel que votre ordinateur de bureau. C'est une plateforme open-source d'électronique programmée qui est basée sur une simple carte à microcontrôleur (de la famille AVR), et un logiciel, véritable environnement de développement intégré, pour écrire, compiler et transférer le programme vers la carte à microcontrôleur. Arduino peut être utilisé pour développer des objets interactifs, pouvant recevoir des entrées d'une grande variété d'interrupteurs ou de capteurs, et pouvant contrôler une grande variété de lumières, moteurs ou toutes autres sorties matérielles. Les projets Arduino peuvent être autonomes, ou bien ils peuvent communiquer avec des logiciels tournant sur votre ordinateur (tels que Flash, Processing ou MaxMSP). Les cartes électroniques peuvent être fabriquées manuellement ou bien être achetées pré-assemblées; le logiciel de développement open-source peut être téléchargé gratuitement.

Le langage de programmation Arduino est une implémentation de Wiring, une plateforme de développement similaire, qui est basée sur l'environnement multimédia de programmation Processing.[41]

3. Matériel Arduino :

Il existe plusieurs versions de cartes Arduino. La version courante de base, la Duemilanove (2009 en Italien - les créateurs de l'Arduino sont des Italiens...), utilise le microcontrôleur Atmel ATmega328. La version précédente Diecimila, et les premières versions de la Duemilanove utilisent le microcontrôleur ATmega168, tandis que les cartes plus anciennes utilisent le Microcontrôleur ATmega8. La carte Arduino Mega est basée sur l'ATmega1280.

Il y a trois types de cartes :

* Les dites « officielles » qui sont fabriquées en Italie par le fabricant officiel : Smart Project

* Les dits « compatibles » qui n'est pas fabriqués par Smart Project, mais qui sont totalement compatibles avec les Arduino officielles.

* Les « autres » fabriquées par diverse entreprise et commercialisées sous un nom différent (Freeduino, Seeduino,) [42]

4. Les différentes cartes

Des cartes Arduino il en existe beaucoup ! Peut-être une centaine toutes différentes ! Je vais vous montrer lesquelles on peut utiliser et celle que j'utiliserai dans le TP.

4.1. La carte Arduino Nano

La carte Arduino Nano (Figure 7.1) est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. Sa mémoire de 32 kB et son grand nombre d'E/S font de ce circuit compatible DIL30 un élément idéal pour les systèmes embarqués ou pour des applications robotiques nécessitant du multitâches.

La Nano 3.0 peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega328 contient un boot loader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur. [43]

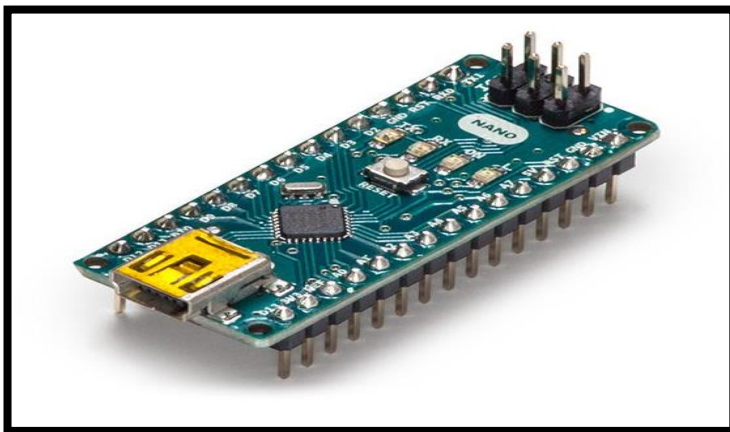


Figure (7.1) : Carte arduino NANO

4.2. La carte ArduinoZero :

La carte ArduinoZero (Figure 7.2) est une simple et puissante 32-bit extension de la plate-forme établie par l'ONU. Le conseil Zéro élargit la famille en fournissant des performances accrues, permettant une variété de possibilités de projets pour les appareils, et agit comme un outil éducatif grand pour apprendre sur le développement d'applications 32 bits.



Figure (7.2) : Carte arduino ZERO

Les applications Zero s'étendent des dispositifs intelligents d'IoT, de la technologie wearable, de l'automatisation high-tech, à la robotique fou. La carte est alimentée par le SAMD21 MCU d'Atmel, qui comporte un noyau ARM Cortex® M0 + de 32 bits. L'une de ses caractéristiques les plus importantes est le débogueur

embarqué Atmel (EDBG), qui fournit une interface de débogage complète sans avoir besoin de matériel supplémentaire, ce qui augmente considérablement la facilité d'utilisation pour le débogage logiciel. EDBG prend également en charge un port COM virtuel qui peut être utilisé pour la programmation de périphériques et de boot loaders. [44]

4.3. Le logiciel Arduino:

Les créateurs d'Arduino ont développé un logiciel pour que la programmation des cartes arduino soit visuelle, simple et complète à la fois.

C'est ce que l'on appelle une IDE, qui signifie *IntegratedDevelopmentEnvironment* ou Environnement de Développement « Intégré » en français (donc EDI).

L'IDE Arduino est le logiciel qui permet de programmer les cartes Arduino.

L'IDE affiche une fenêtre graphique qui contient un éditeur de texte et tous les outils nécessaires à l'activité de programmation.

Vous pouvez donc saisir votre programme, l'enregistrer, le compiler, le vérifier, le transférer sur une carte arduino...

A la date de rédaction de cette page, la version la plus récente de l'IDE Arduino est la *1.8.10*. L'aspect est à peu près identique sur chaque plate-forme (Windows, Mac et Linux). L'image suivante montre l'écran initial qui apparaît au lancement de l'IDE. [45]

5. Les capteurs :

5.1. Thermocouples:

Les thermocouples Figure (7.3) font partie des capteurs de température les plus courants dans l'industrie, leurs avantages certains les rendent largement utilisés.

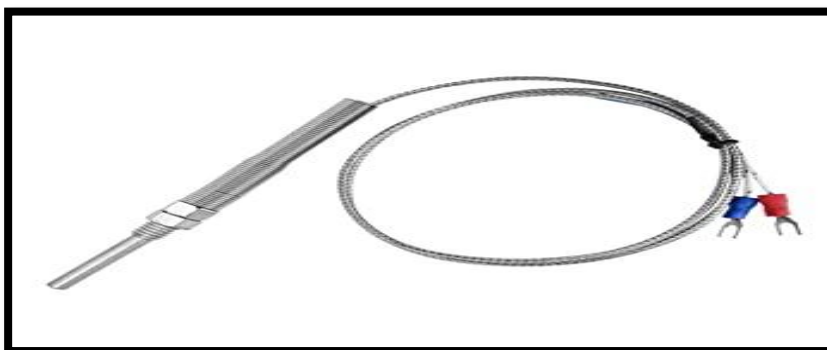


Figure (7.3) : thermocouple La mesure par thermocouple utilise l'effet thermoélectrique.

Le thermocouple est composé de 2 fils métalliques de nature différente, isolés sur toute leur longueur. L'une des extrémités est soudée, c'est la jonction de mesure ou soudure chaude. L'autre extrémité, la jonction de référence ou soudure froide est reliée au circuit de mesure. Une différence de température entre la soudure chaude et la soudure froide provoque une différence de potentiel (force électromotrice) proportionnelle à l'écart de température. La température du point de mesure est alors déduite à partir de la connaissance de la température de la jonction de référence Figure (7.4.).

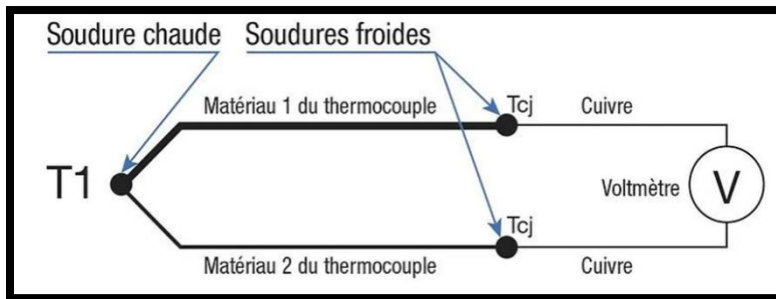
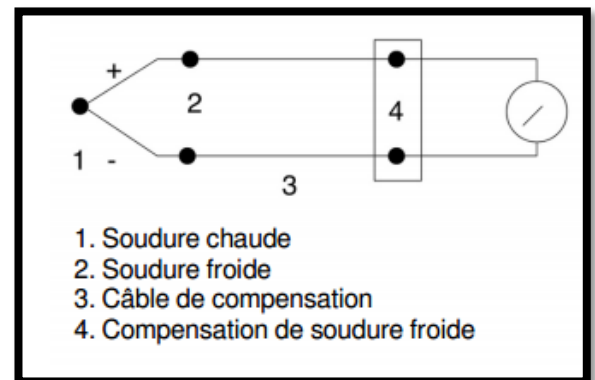


Figure (7.4.) : Schéma Simplifié d'un thermocouple

Ce module est un capteur de température avec une résolution de 0.25°C qui peut mesurer la température de -20°C à +80°C. Ce module comprend un thermocouple de type K, un driver et un amplificateur MAX6675. La sortie du MAX6675 est 3 signaux avec le protocole de communication SPI pour rapporter la température mesurée. [46]



5.1.1. MAX6675 Thermocouple :

Ce capteur possède 7 broches;

- **VCC:** Module power supply 3 to 5.5 V
- **GND:** Ground
- **SCK:** Clock pin
- **CS:** Chip Select
- **SO:** Serial output
- **TH-:** Négative side input
- **TH+:** Positive side input

Vous pouvez voir le brochage de ce module dans l'image ci-dessous Figure (7.5). [47]

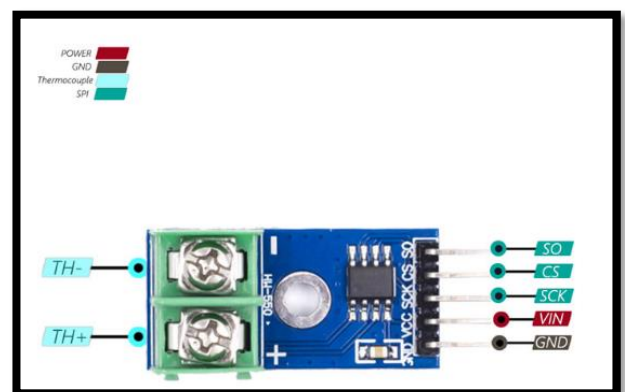


Figure (7.5) : Brochage de module MAX6675

Branchement d'un thermocouple avec arduino

- **Composants utilisé :**
 - 1 Module thermocouple de type K avec amplificateur/convertisseur MAX 6675
- 1 carte Arduino UNO
- Câbles de branchement Dupont mâle / femelle (x5).
- 1 Alimentation 9V
- 1 écran 1602 I2C à 2 lignes 16 caractères (Figure (7.6)).

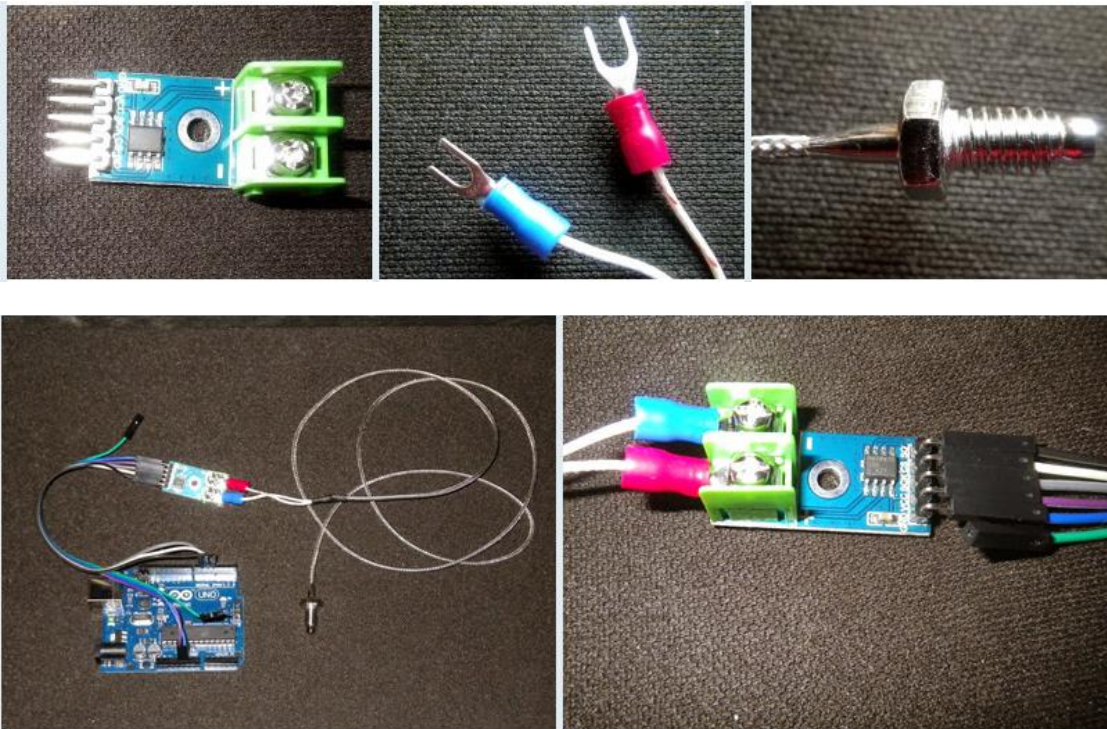


Figure (7.6) : Composants utilisé pour le branchement

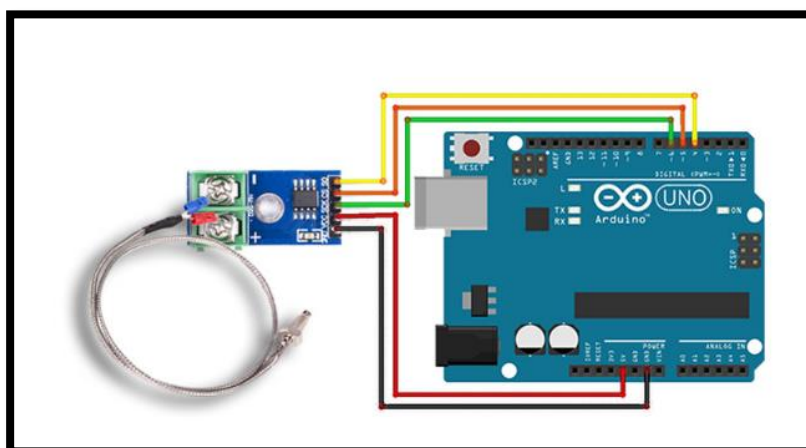


Figure (7.7) : Montage D'un thermocouple avec arduino

5.1.2. Programmation exemple ;

```
#include "Adafruit_MAX31855.h"

int thermoDO = 3;
int thermoCS = 4;
int thermoCLK = 5;

Adafruit_MAX31855 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("MAX31855 test");
  // Attendre que le circuit MAX se stabilise.
  delay(500);
}

void loop() {
  // Test de lecture basique, afficher simplement la température courante
  Serial.print("Internal Temp = ");
  Serial.println(thermocouple.readInternal());

  // Lecture en degrés Celcius
  double c = thermocouple.readCelsius();

  if (isnan(c)) {
    Serial.println("Quelque chose ne fonctionne pas avec le thermocouple!");
  } else {
    Serial.print("C = ");
    Serial.println(c);
  }

  // Décommenter les lignes suivante pour afficher la température
  // en degrés Farenheit (unité qui à cours au USA)
  //Serial.print("F = ");
  //Serial.println(thermocouple.readFahrenheit());

  // Attendre une seconde
  delay(1000);
}
```

5.2. Les captures DS18B20:

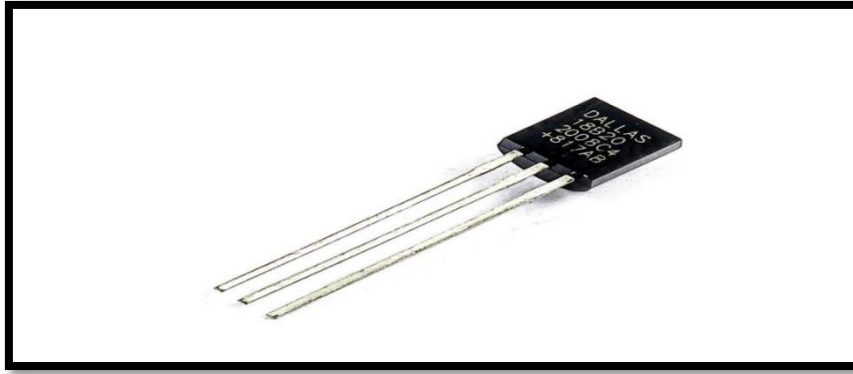


Figure (7.8) : Capteur DS18B20 en boîtier TO-92

Le capteur [DS18B20](#) Figure (7.8) : du fabricant Maxim (anciennement Dallas Semi-conducteur) est un capteur de température numérique intégrant tout le nécessaire requis pour faire la mesure : capteur analogique, convertisseur analogique / numérique, électronique de communication et alimentation.

Il communique via [un bus 1-Wire](#) et possède une résolution numérique de 12 bits (programmable, voir chapitre bonus) avec une plage de mesure de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$. La précision analogique du capteur est de $0,5^{\circ}\text{C}$ entre -10°C et $+85^{\circ}\text{C}$, ce qui rend ce capteur très intéressant pour une utilisation "normale".



Figure (7.9) : Capteur DS18B20 sonde étanche

Le capteur DS18B20 Figure (7.9) existe dans le commerce en deux versions : en boîtier TO-92 (format transistor, en photo un peu plus haut) pour des utilisations standards en intérieur, ou en format "sonde étanche" pour des applications en milieu humide / extérieur. [48]

5.2.1. Câblage de la capture:

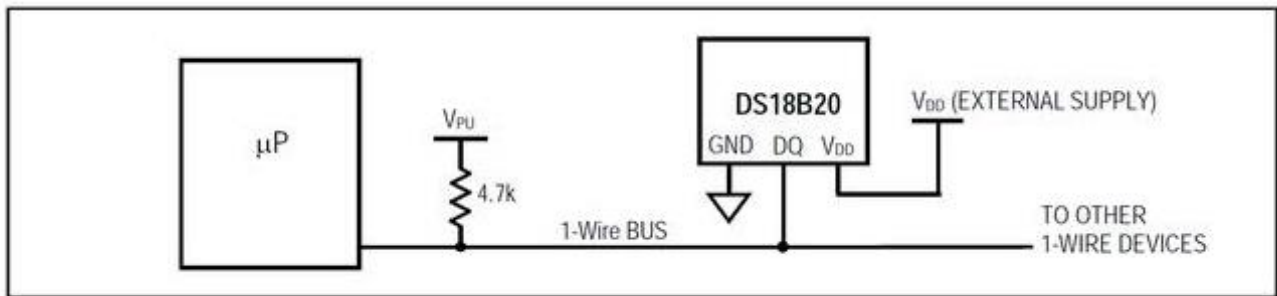


Figure (7.10) : Schéma de câblage d'un capteur

5.2.2. Le montage:

Le montage du capteur avec une carte Arduino est relativement simple à mettre en œuvre (Figure (7.11)).

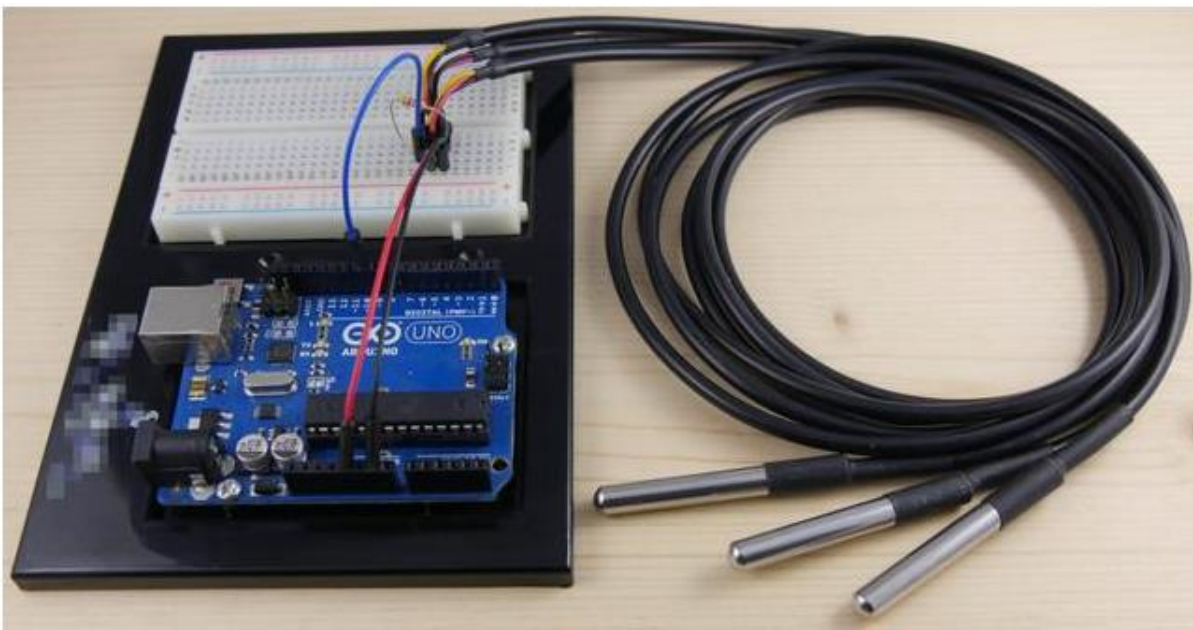


Figure (7.11) : Le montage de capteur avec la carte arduino

5.2.3. Les Composants utilisé :

- Une carte Arduino UNO (et son câble USB),
- Une résistance de 4.7K ohms, code couleur jaune – violet – rouge,
- Un ou plusieurs capteurs DS18B20,
- Une plaque d'essai et des fils pour câbler notre montage.

5.2.4. Schéma du montage :

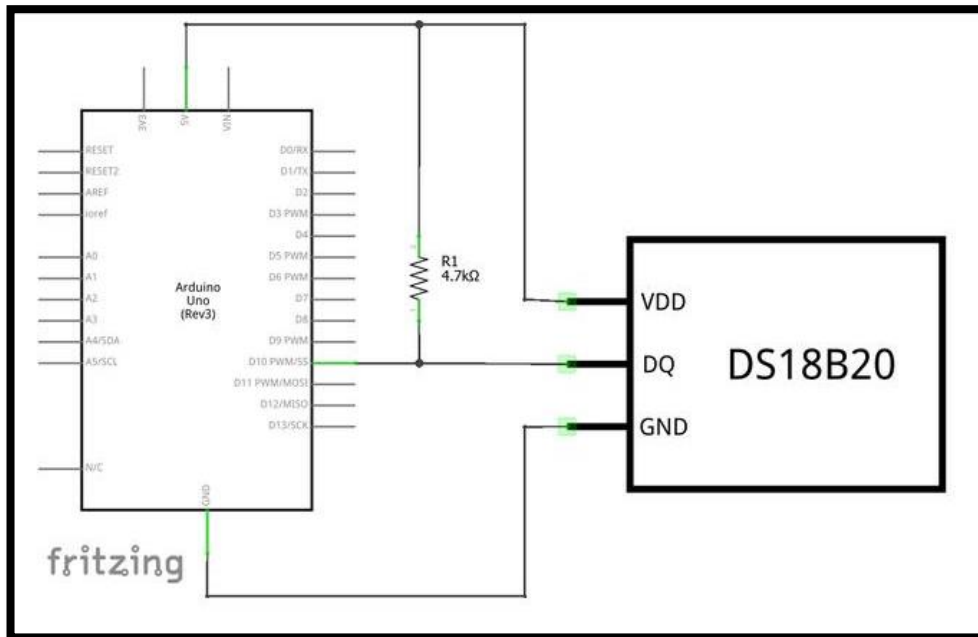


Figure (7.12) : schéma du montage capture DS18B20

5.2.5. Programmation exemple:

```

1  /* Résolution disponibles */
2  const byte RESOLUTION_12_BITS = 0b01111111;
3  const byte RESOLUTION_11_BITS = 0b01011111;
4  const byte RESOLUTION_10_BITS = 0b00111111;
5  const byte RESOLUTION_9_BITS = 0b00011111;
6
7  /** Change la résolution du capteur spécifié */
8  void changeResolution(const byte addr[], byte resolution) {
9
10     /* Reset le bus 1-Wire, sélectionne le capteur et envoie une demande d'écriture du scratchpad */
11     ds.reset();
12     ds.select(addr);
13     ds.write(0x4E);
14
15     /* Ecrit dans le scratchpad */
16     ds.write(0x00);
17     ds.write(0x00);
18     ds.write(resolution);
19
20     /* Fin d'écriture */
21     ds.reset();
22 }

```

Figure (7.13) : Un afficheur cristaux liquide de 20 car. x 4 lignes sur bus I2C.

Les afficheurs standards HD44780 sont vraiment utiles pour créer des projets autonomes. Ils peuvent facilement s'interfacer avec de nombreuses plateformes microcontrôleur tels qu'Arduino, Micro Python, etc.

Nous proposons ici un écran LCD 20x4 blanc sur fond bleu accompagné d'un contrôleur LCD I2C (un *back pack*)

Le back pack I2C permet de contrôler facilement un écran LCD en utilisant uniquement deux broches SDA et SCL du bus I2C (communément A4 et A5 sur Arduino). C'est un outil très appréciable étant donné le nombre de broches nécessaires pour faire fonctionner ces afficheurs. Si vous avez déjà connecté plusieurs capteurs sur votre plateformes, la connexion d'un afficheur LCD directement sur votre plateforme peut devenir un véritable casse tête... le break out I2C qui accompagne l'afficheur sera votre sauveur.

Ce qui est génial avec le bus I2C, c'est que vous pouvez avoir d'autres périphériques I2C sur le même bus (sans consommer plus de broches). Vous pourrez même utiliser plusieurs afficheurs LCD I2C sur un même microcontrôleur en modifiant son adresse sur le bus (voir les broches/cavalier d'adresse le bus I2C).

Utiliser un écran LCD I2C est un excellent projet pour Arduino/Micro Python, une bonne introduction à I2C et un outil utile pour vos futurs projets.

Grâce à la bibliothèque LiquidCrystal_I2C Arduino ou lcdi2c Micro Python, prendre le contrôle de cet écran est vraiment un jeu d'enfant (*voir section Tutoriel*). La bibliothèque prend en charge l'interface I2C. Testé et approuvé par MC Hobby.

Contenu

Pour chaque commande, vous recevrez:

- Le contrôleur LCD I2C assemblé et monté (le back pack)
- Un écran LCD 4 lignes de 20 caractères

Détails techniques du back pack

- Interface: I2C
- Adresse I2C: 0x27 (par défaut, tous les cavaliers d'adresse enlevés)
- Identification des broches Pin: VCC, GND, SDA, SCL
- Contrôle d'écran LCD 16 broches à base de contrôleur HD44780 (identique à celui de l'[écran 2 Lignes blanc/bleu](#) ou écran 4 lignes)
- Rétro-éclairage
- Tension d'alimentation: 5V
- Logique: 5V (le microcontrôleur Micro Python doit être tolérant 5V).
- Ajustement du contraste: avec potentiomètre
- Interface I2C: seulement deux signaux SDA/SCL.
- Identique pour les écrans LCD 16x20 ou 20x4
- Connecteur à empattement 2.54 (facile à utiliser avec fils Dupont)

Détails techniques du LCD [49]

- 4 lignes de 20 caractères chacune
- Texte en Blanc, Fond Bleu
- Contient le "character set" permettant de rendre des textes anglais/japonais, voir la fiche technique du HD44780 pour la totalité des "character set" disponibles.
- Dispose de 8 caractères extra permettant de créer facilement des Glyphs (mini-images), symboles ou caractères internationaux. Voir implémentation MicroPython.



Figure (7.14) : Afficheur LCD 22*4

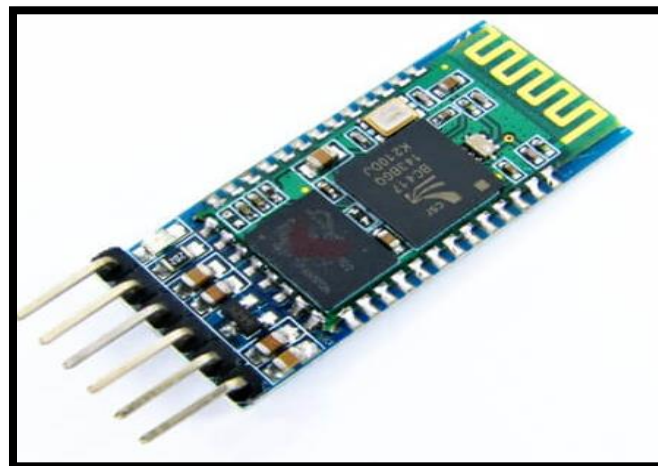


Figure (7.15) : Le module Bluetooth HC-05

Le module Bluetooth HC-05 présente 6 broches pour permettre d'établir la connexion.

- VCC broche d'alimentation. Typiquement connectée à la broche 5V de l'Arduino.
- GND masse. Typiquement connectée à la broche GND de l'Arduino
- RX broche de réception. Typiquement connecté à la broche de transmission (TX) de l'Arduino
- TX broche de transmission. Typiquement connecté à la broche de réception (RX) de l'Arduino
- State retourne 1 lorsque le module est connecté

- Key ou EN doit être alimentée pour entrer dans le mode de configuration et ne doit pas être connecté pour être en mode communication.
- La particularité du module Bluetooth HC-05 est qu'il peut être utilisé en mode esclave (dans ce cas il est équivalent à un module HC-06 et s'utilise de la même manière) ou en mode maître, ce qui veut dire qu'il peut de manière autonome se connecter à un autre module Bluetooth (HC-06, HC-05 en mode esclave ou autre) sans action extérieure.

Matériel utilisé :

- Ordinateur
- Arduino UNO x2
- câble USB pour connecter l'Arduino à l'ordinateur x2
- Module Bluetooth HC-05 ZS-040 x2 (ou 1x HC-06 et 1x HC-05)
- Câbles Dupont M/F

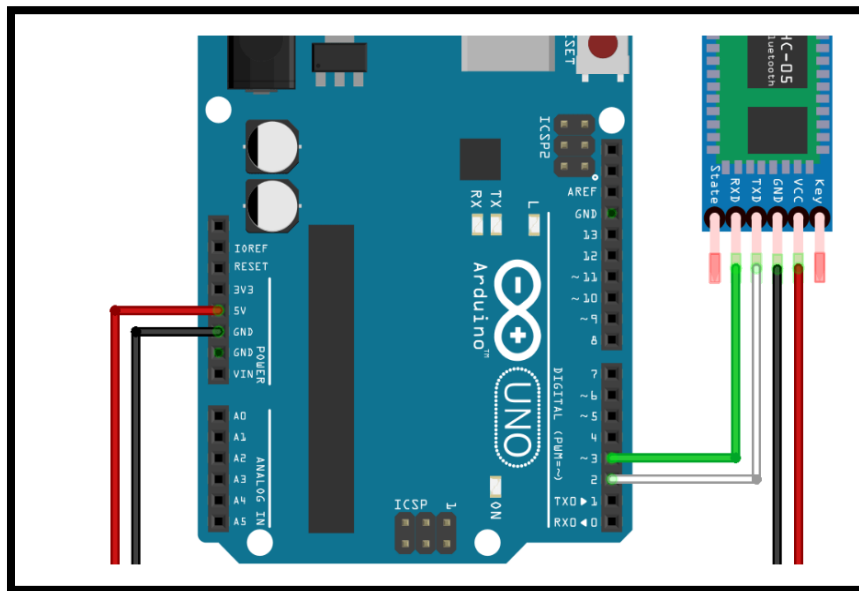


Figure (7.16) : Schéma de Câblage adruino avec le module HC05

6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu notre capteurs de température avec l'afficheur LCD et leur Montage et câblage et principe de fonctionnement dans le programme de la carte Arduino.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis la réalisation d'un système de réfrigération hybride compression avec thermoélectrique refroidi par la convection forcée ainsi que le Choix du module Peltier adopté.

La réalisation du module de base a enrichi nos connaissances pratiques dans les différents domaines de production du froid.

En concertation avec les autres étudiants qui travaillent sur le projet global, on a obtenu les configurations finales et la liste définitive des composants et du matériel nécessaires de la réalisation.

Ensuite, on a entamé la réalisation pratique de banc à partir de ces configurations finales et des schémas électriques obtenus lors de la conception.

On remarque que le budget estimé au début du projet est inférieur au budget réel à cause de l'achat de composants supplémentaires et le manque de connaissance des prix sur le marché.

En conclusion, on peut dire que ce modeste travail est très intéressant et enrichissant apportera un plus à notre département. Il doit clairement être poursuivi par les promotions à venir.

Nous recommandons aux futurs étudiants qui vont continuer à travailler sur le projet de faire le réglage finales, d'améliorer le côté esthétique de banc , élaborer le protocole expérimental pour la réalisation de projet.

Référence bibliographiques

- [1] DELAIRE, Etienne. Le froid dans la conservation des produits de la mer. 2012.
- [2] SALIM, AMROUNE. Etude des performances d'un réfrigérateursolaire a adsorption couple (zéolite-eau). 2019. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
- [3] FARID, BELFODIL. Élaboration d'un Programme pour le Calcul des Paramètres Thermodynamiques et Énergétiques des Nouveaux Fluides Frigorigènes et Application au Calcul des Cycles Frigorifiques. 2007. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret.
- [4] BYRNE, Paul, MIRIEL, Jacques, SERRES, Laurent, et al. Etude simulée d'un système de dessalement d'eau de mer et de production de froid par thermofrigopompe couplée à des panneaux solaires. In : 2ème Colloque International Francophone en Énergie et Mécanique, CIFEM 2012. 2012. p. ART-1-48.
- [5] GIBOUT, Stéphane, BÉDÉCARRATS, Jean-Pierre, et CASTAING-LASVIGNOTTES, Jean. Application de la méthode nodale à la simulation dynamique d'une machine frigorifique à compression mécanique de vapeur.
- [6] ZOHAR, A., JELINEK, M., LEVY, A., et al. Numerical investigation of a diffusion absorption refrigeration cycle. International Journal of Refrigeration, 2005, vol. 28, no 4, p. 515-525.
- [7] ABD ELDJALIL REHAMNIA, Mohamed Aymen Débbihi. Transformateur à circuit magnétique ouvert.
- [8] AMINE, GOUTAL Mohamed et YOUCEF, RALEM AHMED. Amélioration des performances d'un système de refroidissement à effet Peltier. 2021.
- [9] ROY, Jean L. Désaimantation thermique et analyse statistique des directions de sédiments carbonifères et permians de l'est du Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 1966, vol. 3, no 2, p. 139-161.
- [10] DJIMAOU, T., ZIDANI, M., BOUZIDI, A. Kistrane, et al. ETUDE DE COMPORTEMENT AU TREFILAGE DES FILS EN ACIER DOUX DESTINES POUR DES APPLICATIONS INDUSTRIELS. Revue Science des Matériaux, 2017, no 09, p. 36.
- [11] DINY, Mouad. Etude du fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption: modélisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation du fonctionnement de la machine. 1996. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- [12] ROBINSON, Douglas M. et GROLL, Eckhard A. Efficiencies of transcritical CO2 cycles with and without an expansion turbine: Rendement de cycles transcritiques au CO2 avec et sans turbine d'expansion. International Journal of Refrigeration, 1998, vol. 21, no 7, p. 577-589.
- [13] PAU, Massimiliano, LOI, Andrea, et PEZZOTTA, Maria Cristina. Does sensorimotor training improve the static balance of young volleyball players?. Sports biomechanics, 2012, vol. 11, no 1, p. 97-107.
- [14] VRINAT, Georges. Machines frigorifiques industrielles-Exemples de calculs de machines. 2010.
- [15] AUGUSTE, Patrick, AVERBOUH, A., BODU, P., et al. Retouchoirs, compresseurs, perceurs, os à impressions et éraillures. Société préhistorique française, 2002.
- [16] NOUREDDINE, REBAHI. ETUDE ENERGETIQUE DES CONDENSEURS A TUBES COAXIAUX. UTILISATION Du FREON R-134a AMI DE L'OZONE. 2017. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
- [17] TAMAINOT-TELTO, Z., OUTTAGARTS, A., HABERSCHILL, P., et al. Comportement dynamique de détendeurs thermostatiques de machines frigorifiques. International journal of refrigeration, 1996, vol. 19, no 2, p. 124-131.
- [18] MARC, Olivier, DANET, Guillaume, SINAMA, Frantz, et al. Modélisation dans l'environnement EnergyPlus et éléments de validation expérimentale d'une installation de rafraîchissement solaire couplée au bâtiment.
- [19] WEARN, P. L., RICHARDS, H. J., et ROWE, P. C. Water movement in the unsaturated zone of high and low permeability strata by measuring natural tritium. Proc. Syrup. Isotope Hydrology, 1970, p. 73-87.
- [20] OLIVIER, Jérémy. Etudes des filtres à bandes pour la déshydratation mécanique des boues résiduaires urbaines. 2003. Thèse de doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- [21] SEDDIKI, Omar. Dépôt d'un film mince métallique sur un liquide par le procédé d'évaporation sous vide: une nouvelle méthode pour réaliser le miroir liquide lunaire. 2010.

- [22] FRIEDMAN, Avner et JIANG, Li-Shang. Periodic solutions for a thermostat control problem. *Communications in Partial Differential Equations*, 1988, vol. 13, no 5, p. 515-550.
- [23] MACHADO, L., HABERSCHILL, P., et LALLEMAND, M. Masse du fluide frigorigène dans un évaporateur en fonctionnement permanent ou transitoire: Refrigerant mass inside an evaporator in a steady or non-steady state. *International journal of refrigeration*, 1998, vol. 21, no 6, p. 430-439.
- [24] MERMOND, Yannick. Transferts de chaleur dans un mélange constitué de fluide frigorigène et d'huile. 1999. Thèse de doctorat. Nancy 1.
- [25] VAGHELA, Jignesh K. Comparative evaluation of an automobile air-conditioning system using R134a and its alternative refrigerants. *Energy Procedia*, 2017, vol. 109, p. 153-160.
- [26] Bourgués, C. (2017). Synthèses, analyses structurales et propriétés thermoélectriques de matériaux sulfures (Doctoral dissertation, Normandie Université).
- [27] GARABEDIAN, M., & BOUTROS, R. Rapport Scientifique.
- [28] AKACHA Mohamed Djamel, B. (2018). Etude et réalisation d'un refroidisseur de boisson par l'effet thermoélectrique.
- [29] Matthieu COSNIER (2008), Etude expérimentale d'un système thermoélectrique destiné au rafraîchissement des bâtiments, thèse, Ecole doctorale de l'Université de Savoie SISEO; YANG et al, 2008].
- [30] Propriétés Electroniques du YVO₃, CaVO₃ Et Leur Composé Y1-XCa_xVO₃, Djamel TRARI, 2010
- [31] CONVERSION DE LA CHALEUR EN ELECTRICITE : Etude du module thermoélectrique à effet Peltier, STPI/P6-3/2008 – Conversion de la chaleur en électricité.
- [32] COLLARD, É., d'Auvergne, É. S. P. É., & MENECHIER, S. Les modules Peltier.
- [33] Zély, D. (1992). *Modélisation des thermoéléments à effet Peltier. Application à l'analyse thermique d'un instrument pour expérimentations en conditions spatiales* (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- [34] Eddine, A. N. (2017). *Modélisation et optimisation d'un système de récupération d'énergie à l'échappement des moteurs de navires en utilisant la thermoélectricité (effet Seebeck)* (Doctoral dissertation, École centrale de Nantes).
- [35] SGORLON, D., FRAISSE, G., & RAMOUSSE, J. Conditions théoriques optimales de fonctionnement d'un élément thermoélectrique en mode refroidissement, incluant l'effet Thomson.
- [36] Fromy, E. (1926). Relation entre l'effet wiedemann et l'effet Joule de magnétostriktion. *Journal de Physique et le Radium*, 7(1), 13-24.
- [37] Eddine, A. N. (2017). *Modélisation et optimisation d'un système de récupération d'énergie à l'échappement des moteurs de navires en utilisant la thermoélectricité (effet Seebeck)* (Doctoral dissertation, École centrale de Nantes).
- [38] Lee, H., A.M. Attar, and S.L. Weera, *Performance Prediction of Commercial Thermoelectric Cooler Modules using the Effective Material Properties*. *Journal of Electronic Materials*, 2015. **44**(6): p. 2157-2165.
- [39] AUGUSTE, Patrick, AVERBOUH, A., BODU, P., et al. Retouchoirs, compresseurs, perceurs, os à impressions et éraillures. Société préhistorique française, 2002.
- [40] Nabil, L. (2016). *Réalisation d'une commande d'un robot mobile* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [41] Ahmed, B. O. U. C. H. E. R. I. T., & Mouloud, M. E. R. A. I. M. I. (2018). Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Android.
- [42] Affagard, B., Géridan, J. M., & Lafargue, J. N. (2014). *Projets créatifs avec Arduino*. Pearson Education France.
- [43] Abbas, N. (2018). *Conception et réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino nano* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOULOUUD MAMMERI TIZI-OUZOU).
- [44] Cottenceau, B. (2016). Carte ARDUINO UNO Microcontrôleur ATmega328. *Microcontrôleurs EI3 AGI. On*, 2017.
- [45] khodja Nassim, A. (2018). *Etude et réalisation d'une alarme de température à base d'une carte arduino* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [46] Heitor, M. V., & Moreira, A. L. N. (1993). Thermocouples and sample probes for combustion

studies. *Progress in energy and combustion science*, 19(3), 259-278.

[47] Nalavade, S. P., Patange, A. D., Prabhune, C. L., Mulik, S. S., & Shewale, M. S. (2019). Development of 12 Channel Temperature Acquisition System for Heat Exchanger Using MAX6675 and Arduino Interface. In *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)* (pp. 119-125). Springer, Singapore.

[48] Rizal, S. (2018, July). Using CRC in DS18B20. In *Proceeding of International Symposium for Sustainable Humanosphere* (pp. 192-203).

[49] BRUNAUD, C., FOURRE, A., & LEQUEU, T. Carte électronique avec afficheur LCD.