

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ de BLIDA 1
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : GENIE CHIMIQUE

Intitulé du mémoire

*ETUDE COMPARATIVE ENTRE DEUX
REFRIGERATEURS
(COMPRESSION DE VAPEUR / THERMOELECTRIQUE)*

Présenté par :

KHELIL SAMIA

Encadré par :

Dr. BENSACIA Nabila

Dr. HADJIA MOUNDJI

Année universitaire 2018/2019

Table Des Matieres

REMERCIEMENT

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATION

INTRODUCTION GENERALE

1

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

4

I.2. Principe de base de production du froid

4

I.2.1. Cycle frigorifique ditherme

4

I.2.2. Cycle frigorifique tritherme

5

I.2.3. Cycle de Carnot

6

I.2.4. Coefficients de Performance (COP)

6

I.3. Théorie des systèmes frigorifiques à compression de vapeur

7

I.3.1. Classification des cycles frigorifiques à compression mécanique

6

I.3.1.1. Cycles à compression à un seul frigorigène pur ou azéotropique

7

I.3.1.1.1. Cycle à compression monoétagée

7

I.3.1.1.2. Cycle à compression polyétagée

7

I.3.1.2. Cycles à compression à plusieurs frigorigènes

8

I.3.2. Description d'un circuit frigorifique monoétagé

8

I.3.3. Fluide frigoporteur (fluide frigorigène)

10

I.3.4. Diagramme enthalpique du cycle frigorifique : diagramme de Mollier

10

I.3.5. La condensation

12

I.4. production du froid par la thermoélectricité

12

I.4.1 . Les effets thermoélectriques

12

I. 4.2.Les semi- conducteurs

14

I. 4.2. 1. Dopage des semi- conducteurs

15

I.4.3. Conception d'un élément Peltier	16
I.4.4. Module Peltier	17
I.4.5. Fonctionnement physique du module thermoélectrique :	18
I.4.6. disposition des éléments Peltier	20
I.4.7. Module à plusieurs étages	20
I.4.8. La condensation	21
I.4.9. paramètres physiques	21
I.4.10. Matériaux thermoélectriques	23
I.5. Réfrigération	24

CHAPITRE II : PARTIE EXPERIMENTALE

II.1. Etude expérimental d'un réfrigérateur à compression de vapeur ménager	25
II.1.1 Description de l'installation	25
II.1.2 composants de l'installation	26
II.3.1.1. Compresseur à piston hermétique	26
II.3.1.2. Condenseur statique à fil	27
II.3.1.3. Evaporateur statique	27
II.3.1.4. Détendeur capillaire	28
II.3.1. 5.Filtre déshydrateur	28
II.3.1. 6. Tuyauterie en cuivre	28
II.3.1.7. Instruments de mesures et de réglage	28
II.3.2. Dégivrage	29
II.3.3. Contrôles préliminaires de l'installation	29
II.3.4. paramètres relevés de l'installation	31
II.4. Etude d'un réfrigérateur thermoélectrique	30
II.4. 1.Principaux composants du réfrigérateur	30

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. réfrigérateur thermoélectrique	34
III.1.1. Les températures	34
III.1.2. La puissance frigorifique	35
III.1.3.La puissance calorifique	38
III.1.4. La puissance électrique consommée par le module	38

III.1.5. Le coefficient de performance réel	38
III.1.6. Le coefficient de performance de Carnot	39
III.1.7. facteur de mérite	40
III.2. réfrigérateur à compression de vapeur	41
III.2.1. 1 tracé du cycle frigorifique	41
III.2.1.1. Interprétation du cycle	43
III.2.1.2. Paramètres relevés du diagramme	43
III.2.1.3. Calcul des paramètres physiques	44
III.3. Tableau récapitulatif des résultats obtenus	45
CONCLUSION	46
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	48

Remerciement :

Je tiens vivement à exprimer mes remerciements à ma promotrice Dr. BENSACI , ainsi qu'aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner et de corriger ce rapport .

Je remercie Dr . HADJIAT , chercheur au CDER de BOUZAREAH pour ces orientations et ces précieuses données concernant le projet effectué.

Enfin j'exprime ma reconnaissance et ma sympathie à l'équipe de la division thermique du CDER ainsi qu'à tout ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو مقارنة ثلاجة ضغط البخار المنزلية بثلاجة كهربائية حرارية داخلية سعة 10 لتر مصنوعة في المختبر ، والغرض من الثلاجات هو الحفاظ على الطعام تحت الشروط المسبقة ، متطلبات التصميم لمبرد الكهرباء الحرارية هي الحفاظ على الفرق في درجة الحرارة بين البيئة الخارجية والمساحة المراد تبريدها إلى 20 درجة مئوية وللحصول على معامل تجريبي للأداء بين 0.4 و 0.7 ، يتم تعيين درجة الحرارة الداخلية للثلاجة ضغط البخار إلى 5 درجات مئوية .

الكلمات المفتاحية: تأثير الحبيبات ، دورة كارنو ، ضغط البخار ، الكهرباء الحرارية ، الوحدة الكهربائية .

Résumé :

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre un réfrigérateur domestique à compression de vapeur et un réfrigérateur thermoélectrique à effet Peltier d'un volume interne de 10 l réalisé en laboratoire , les deux réfrigérateurs sont destinés à la conservation des denrées alimentaires sous des conditions fixées au préalable , les exigences de conception pour le refroidisseur thermoélectrique consistent à maintenir un écart de température entre l'ambiance extérieure et l'espace à refroidir à 20°C et à obtenir un coefficient de performance (COP) expérimental entre 0.4 et 0.7 , la température intérieure du réfrigérateur à compression de vapeur est réglée à 5°C.

mots clés : effet Peletier , cycle de Carnot ,compression de vapeur , thermoélectricité , module électrique .

abstract

The purpose of this study is to compare a domestic vapor compression refrigerator with a 10L internal thermoelectric refrigerator made in the laboratory, both refrigerators are intended for food preservation under pre-conditions, the design requirements for the thermoelectric cooler are to maintain a temperature difference between the outdoor environment and the space to be cooled to 20 °c and to obtain an experimental coefficient of performance (COP) between 0.4 and 0.7 , the internal temperature of the steam compression refrigerator is set at 5°C.

key words: Peletier effect, Carnot cycle, vapor compression, thermoelectricity, electrical module.

LISTE DES ABREVIATION

symbole	définition	unité
Q_F	Puissance frigorifique	W
Q_C	Puissance calorifique	W
W	Energie mécanique	W
q_m	Débit massique	Kg/s
T_C, T_h	Température absolue de la source chaude/ température de condensation	K
T_F	Température absolue de la source froide	K
T_0	Température absolue d'évaporation	K
S	entropie	J/K
COP	Coefficients de performance	
α	Coefficient de Seebeck	V/K
τ_a	Coefficient de Thomson	
K	Conductance thermique	W/K
k	Conductivité thermique	W/mK
I	Intensité du courant	A
R	Resistance électrique	Ω
σ	Conductivité électrique	S/m
Z	Facteur de mérite	K^{-1}
P	Puissance électrique	W
V	tension	V
P_a	Haute pression	Bar
P_b	Basse pression	Bar
h	Enthalpie spécifique	j/kg
CFC	Chloro Fluoro carbone	
HFC	HydroFluoro carbone	
R134a	Réfrigérant 134a	

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1. conditions de conservation de certains denrées alimentaires	24
--	----

CHAPITRE II

Tableau II.I. Caractéristiques du module Peletier expérimental	31
--	----

CHAPITRE III

Tableau III.1 Variation de la température en fonction du temps	36
--	----

Tableau III.2. Variation de la puissance frigorifique en fonction du temps	39
--	----

Tableau III.1. Variation du coefficient de performance réel en fonction du temps	40
--	----

Tableau III.4. Variation du coefficients de performance maximal fonction du temps	41
---	----

Tableau III.5. Paramètres relevés du cycle frigorifique du réfrigérateur	45
--	----

Tableau III.6. Tableau récapitulatif des résultats	47
--	----

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Cycle frigorifique ditherme	4
Figure I.2: Cycle frigorifique tritherme	5
Figure I.3 : Cycle de Carnot sur un diagramme T-S	6
Figure I.4 : Circuit frigorifique à compression de vapeur	8
Figure I.5 : Diagramme de Mollier pour R134a .	11
Figure I.6 : Représentation du cycle frigorifique à compression de vapeur sur le diagramme enthalpique	12
Figure I.7 : Effet Seebeck.	13
Figure I.8 : Effet Peletier	14
Figure I.9 : semi-conducteur dopé n et p	15
Figure I.10 : Thermocouple	16
Figure I.11 : Module Peletier	17
Figure I.12 : Module Peletier avec les ces deux ventilateurs	18
Figure I.13 : Schéma descriptif d'un module Peltier	18
Figure I.14 : Schéma de principe de l'effet Peltier	19
Figure I.15 : Module à plusieurs étages	20
Figure I.16 : Evolution de ZT en fonction de la température pour les matériaux conventionnels de type n et type p .	23

CHAPITRE II

Figure II.1 : Schéma d'un réfrigérateur ménager .	25
Figure II.2 : Boite électrique	25
Figure II.3: Circuit du fluide frigorigène	26
Figure II.4: Condenseur statique à fil	27

Figure II.5 : Evaporateur statique	27
Figure II.6 : Détendeur capillaire	28
Figure II.7 : Filtre	28
Figure II.8 : Module Peltier expérimental	30
Figure II.9: Refroidisseur intérieur du réfrigérateur expérimental	31
Figure II.10 : Refroidisseur extérieur du réfrigérateur expérimental	31
Figure .II.11. : Coupe transversal des éléments assemblés Refroidisseurs et module Peltier par une extension en Aluminium	32
Figure .II.12. : Schéma globale du réfrigérateur thermoélectrique	33

CHAPITRE III

Figure III.1 : Enregistreur de températures	34
Figure III.2 : Variation des températures en fonction du temps	35
Figure III.3 : Variation de la puissance frigorifique en fonction du temps	37
Figure III.4 : Variation du coefficient de performance réel en fonction du temps	39
Figure III.5: Variation du coefficient de performance maximal en fonction du temps	40
Figure III.6: ZT en fonction du coefficient de performance	41
Figure III.7 : Tracé du cycle frigorifique du réfrigérateur	42

Introduction Générale

Un processus de production de froid signifie naturellement une absorption de la chaleur et selon l'énoncé de Clausius, second principe de la thermodynamique « La chaleur ne peut passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud [1].

Les machines frigorifiques permettent d'extraire de la chaleur aux milieux à refroidir et elles la rejettent, accompagnée de l'équivalent thermique de l'énergie reçue, à température plus élevée, dans un milieu ambiant. Ces machines peuvent aussi être utilisées comme systèmes de chauffage, dont le principe de fonctionnement, et souvent la technologie, sont semblables à ceux des machines frigorifiques, on parle des pompes à chaleur, la chaleur rejetée dans ce cas est utilisée.

les réfrigérateurs sont des machines frigorifiques, les plus utilisés actuellement sont les réfrigérateurs à compression de vapeur, le cycle thermodynamique correspondant est basé sur les caractéristiques physico-chimique d'un fluide qu'on nomme fluide frigorigène, fréon ou réfrigérant.

Avant l'invention des réfrigérateurs, on stockait la glace découpée l'hiver sur les étangs dans une glacière. Il s'agissait d'un trou fermé par un couvercle isolant dans lequel on alternait des couches de paille, ou de sciure de bois, et de glace. Comme l'air froid descend, le trou restait froid et la glace se conservait jusqu'à l'été.

Les chercheurs s'efforcent sans cesse de mettre au point d'autres techniques de réfrigération protectrices de l'environnement, la réfrigération thermoélectrique est une alternative intéressante car elle peut convertir l'électricité usée en refroidissement utile et devrait jouer un rôle important dans la résolution des problèmes actuels liés aux énergies fossiles.

Les appareils thermoélectriques sont des appareils à l'état solide, silencieux, robuste, ce sont des convertisseurs d'énergie fiables. ils utilisent des électrons plutôt que du réfrigérant comme porteurs d'énergie.

Les effets thermoélectriques découverts par Seebeck en 1821, Peltier en 1834 et Thomson en 1853,[3] connus depuis plus d'un siècle n'ont réellement été utilisables que depuis les années 1950 avec le développement des semi-conducteurs, ses applications sont, dans le refroidissement (effet Peltier) et dans la production d'électricité (effet Seebeck).

Le but de ce travail est de faire une étude comparative d'un réfrigérateur thermoélectrique expérimental conçu au niveau du centre de recherche des énergies renouvelables de BOUZAREAA (CDER) et un réfrigérateur à compression de vapeur ménager.

le plan du mémoire est réparti comme suit:

- une introduction sur le sujet traité avec la présentation de l'objectif visé de cette étude.
- un premier chapitre pour présenter l'état de l'art du domaine de refroidissement par compression de vapeur est par l'effet Peltier :
- un deuxième chapitre qui aborde l'étape expérimental du projet avec une description des deux types de réfrigérateurs expérimentés .
- Quand au troisième chapitre , il est réservé à la présentation des résultats obtenus ainsi que leurs interprétations .

Je termine par une conclusion sur le travail effectué et une perspective envisagée par le CDER concernant la réfrigération thermoélectrique solaire.

CHAPITRE I

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION :

La chaleur circule dans le sens de la diminution de la température, c'est-à-dire de la température la plus élevée à la plus basse température. Le transfert de chaleur d'une basse température à haute température nécessite une machine frigorifique.

L'énoncé de Clausius postule « qu'il ne peut s'effectuer, sans compensation, de passage de chaleur d'un corps froid à un corps chaud ». L'énoncé de Lord Kelvin, quant à lui, revient à postuler « qu'à l'aide d'un système qui décrit un cycle et qui n'est en contact qu'avec une seule source de chaleur, il est impossible de recueillir du travail »[4].

I.2. Principe de base de production du froid :

I.2.1. Cycle frigorifique ditherme :

Il n'est pas possible de réaliser un cycle frigorifique monothème. Pour mettre en œuvre un cycle frigorifique, il est donc nécessaire de disposer d'au moins deux sources de chaleur . L'une sera appelée source froide (celle dont on va extraire la chaleur) et l'autre la source chaude (celle où l'on va rejeter la chaleur) [1]. L'expression du premier principe de la thermodynamique pour un cycle décrit entre deux sources de chaleur est comme suit :

$$Q_c + Q_f + W = 0 \quad (\text{I.1})$$

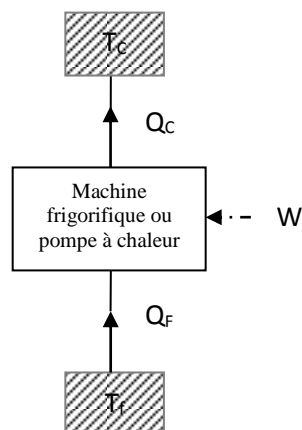


Figure I.1. cycle frigorifique ditherme[1]

où Q_f est la chaleur reçue de la source froide, Q_c la chaleur reçue de la source chaude et l'énergie mécanique reçue W . Le second principe de la thermodynamique permet d'écrire,

pour un cycle réversible et en supposant que les échanges de chaleur se font à la température des sources :

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (\text{I.2})$$

I.2.2. Cycle frigorifique tritherme :

Le principe d'un tel cycle est présenté ci-dessus . Si on note T_h la température de la troisième source, l'application du premier principe mène à :

$$Q_C + Q_F + Q_h = 0 \quad (\text{I.3})$$

Q_h la chaleur reçue par cette source à haute température, Le second principe nous permet d'écrire, pour un cycle réversible et en supposant que les échanges de chaleur se font à la température des sources[1] , l'expression du second principe est :

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_h}{T_h} = 0 \quad (\text{I.4})$$

La figure I.2 schématise un cycle frigorifique tritherme :

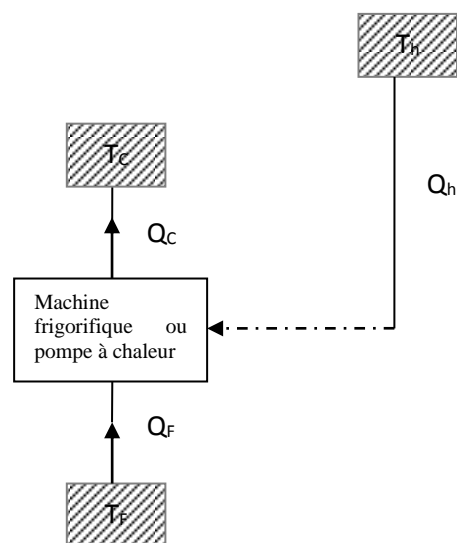


Figure I.2. cycle frigorifique tritherme[1]

I.2.3. Cycle de Carnot :

Sadi Carnot s'est intéressé aux machines idéales, c'est-à-dire réversibles, fonctionnant entre deux sources de chaleur, à deux températures constantes, son théorème stipule que « Toutes les machines thermiques dithermes réversibles évoluant entre deux températures données ont le même rendement » [1].

Un cycle de Carnot est constitué de deux isothermes et de deux isentropes [18] . Ce cycle est décrit dans un diagramme entropique dont les axes de coordonnées sont l'entropie(S) et la température(T) , le cycle est représenté dans la figure I.3 :

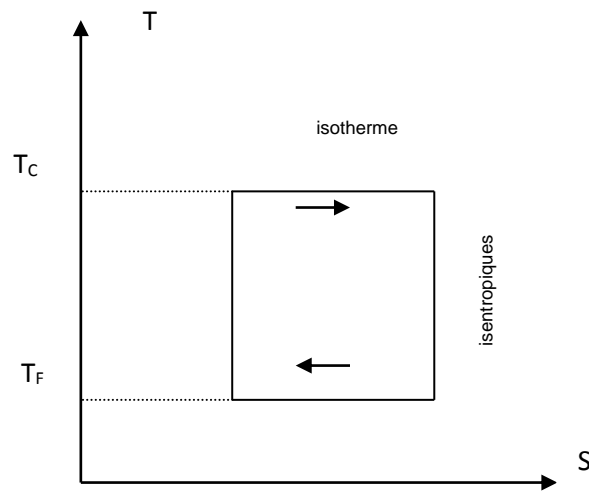


Figure I.3. cycle de Carnot sur un diagramme T-S

Si l'on fait fonctionner ce cycle en sens opposé, on obtient un cycle qui absorbe de la chaleur à la source froide et qui en dégage à la source chaude. Il s'agit donc bien d'un cycle frigorifique, on parle de "cycle inverse".

I.2.4. Coefficients de Performance:

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

- Coefficient de performance frigorifique :

$$\text{COP}_F = \frac{\text{froid produit à la source froide}}{\text{énergie apportée au système}} \quad (\text{I.5})$$

- Coefficient de performance calorifique :

$$\text{COP}_c = \frac{\text{chaleur dégagée}}{\text{énergie apportée au système}} \quad (1.6)$$

Ces rapports adimensionnels ont très souvent des valeurs supérieures à l'unité, contrairement aux rendements des machines thermiques produisant de l'énergie mécanique.

I.3. Théorie des systèmes frigorifiques à compression de vapeur :

La réfrigération à compression de vapeur est le cycle le plus largement utilisé pour les réfrigérateurs, les climatiseurs et pompes à chaleur de petites et grandes puissances, ce cycle comprend principalement trois éléments essentiels : les échangeurs aux sources chaude et froide (condenseurs et évaporateurs), le compresseur et le détendeur.

I.3.1. Classification des cycles frigorifiques à compression mécanique :

On distingue les cycles à compression à un seul frigorigène pur ou azéotropique et ceux à plusieurs frigorigènes.

I.3.1.1. Cycles à compression à un seul frigorigène pur ou azéotropique

I.3.1.1.1. Cycle à compression monoétagée

On utilise un seul étage de compression mécanique pour la production de froid à températures pas trop basses (généralement supérieures à -20°C ou -25°C) [4] et pour la plupart des pompes à chaleur, de tels cycles sont extrêmement répandus.

I.3.1.1.2. Cycle à compression polyétagée

a) Cycle à compression biétagée

Lorsqu'il s'agit de produire du froid à températures plus basses (généralement comprises entre -25 et -45°C), les cycles à compression monoétagé présentent divers inconvénients. On fait alors appel aux cycles mettant en jeu deux étages de compression associés *en série*. Ces cycles à compression biétagée sont très courants.

b) Cycle à plus de deux étages de compression

On utilise de tels cycles pour la production de froid à des températures encore plus basses (par exemple inférieures à -45 ou -50°C) et ne mettant en jeu qu'un seul frigorigène. Ils sont beaucoup plus rares [4].

I.3.1.2. Cycles à compression à plusieurs frigorigènes

I.3.1.2.1. Cycles à plusieurs frigorigènes purs séparés. Cycles en cascade

Le système qui met en œuvre ces cycles comprend plusieurs circuits frigorifiques séparés, à compression mono ou polyétagé, utilisant chacun des frigorigènes différents. Ces circuits élémentaires sont disposés en série et fonctionnent à des températures différentes.

Chacun d'entre eux communique thermiquement avec le circuit plus froid qui le précède et le circuit plus chaud qui le suit.

La chaleur puisée à basse température est ainsi transférée, d'un circuit à l'autre, tandis que sa température s'élève. Elle est finalement rejetée dans les milieux naturels, air ou eau, par le dernier circuit (le plus chaud). On peut ainsi produire du froid à des températures déjà basses ($-90, -120, -150\text{ }^{\circ}\text{C}$) [4].

I.3.1.2.2. Cycle à mélange de plusieurs frigorigènes :

Les fluides actifs de ces cycles sont des mélanges zéotropes, ou non azéotropiques, de deux mélanges binaires ou plus de deux constituants purs. durant la vaporisation ou la condensation, à pression constante, d'un mélange zéotrope, la température varie. Avec ces mélanges, on peut mettre en œuvre :

- ▶ des circuits à un seul étage de compression ;
- ▶ des circuits à plusieurs étages de compression.

I.3.2. Description d'un circuit frigorifique monoétagé :

Le cycle fondamental à compression monoétagée est présenté sur la figure ci-dessous :

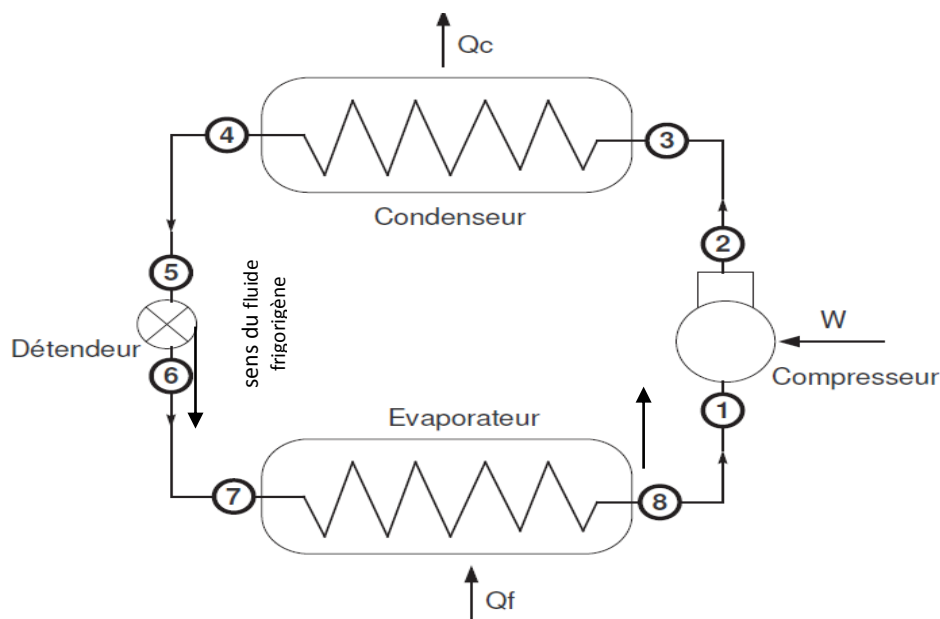


Figure .I.4.circuit frigorifique à compression de vapeur [1]

le fluide frigorigène subit les évolutions suivantes [18] :

► Dans l'évaporateur

Le fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur (air). Dans un deuxième temps, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur, c'est ce qu'on appelle la phase de surchauffe, le bilan énergétique est exprimé par la relation :

$$Q_F = q_m (h_8 - h_7) \quad (I.7)$$

► Dans le compresseur

Le compresseur va tout d'abord aspirer le gaz frigorigène à basse pression et à basse température (point 1). L'énergie mécanique apportée par le compresseur va permettre d'élever la pression et la température du gaz frigorigène. Une augmentation d'enthalpie en résultera.

La puissance frigorifique et la puissance absorbée d'un compresseur varient suivant les températures d'évaporation et de condensation, le travail fourni par le compresseur est exprimé par la relation suivante :

$$W_{\text{comp}} = q_m (h_2 - h_1) \quad (I.8)$$

► Dans le condenseur

Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur au fluide extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent ("désurchauffe"), avant l'apparition de la première goutte de liquide (point 3). Puis la condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur (point 4). Le fluide liquide peut alors se refroidir de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur, son bilan énergétique est :

$$Q_C = q_m (h_3 - h_4) \quad (I.9)$$

► Dans le détendeur

La différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur nécessite d'insérer un dispositif "abaisseur de pression" dans le circuit. c'est le détendeur, le fluide frigorigène se vaporise partiellement dans le détendeur pour abaisser sa température, le bilan enthalpique est :

$$h_6 = h_5 \quad (I.10)$$

I.3.3. Fluide frigoporteur (fluide frigorigène) :

La production du froid par compression de vapeur fait appel à une substance que l'on appelle réfrigérant. C'est une substance chimique dont la température d'ébullition à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante. Les CFC (chlorofluorocarbone) et les HCFC (fluoro chloro carbone) ont dominé l'industrie du froid depuis près de 70 ans jusqu'à aujourd'hui.

L'utilisation de ces fréons est interdite par le protocole de Montréal en raison de leur contribution à l'appauvrissement de la couche d'ozone, les réfrigérants contenant du chlore et du fluor atteignent la haute atmosphère lorsqu'ils s'échappent [1]. Dans la stratosphère, les CFC se décomposent sous l'effet des rayons ultraviolets, libérant leurs radicaux libres chlorés. Ces radicaux libres chlorés agissent comme des catalyseurs dans la décomposition de l'ozone par des réactions en chaîne. Une molécule de CFC peut entraîner la décomposition de milliers de molécules d'ozone, de nouveaux réfrigérants ayant un effet réduit d'appauvrissement de la couche d'ozone, sont utilisés actuellement tels que les HFC (exp :R-134a tétrafluoroéthane [1]) qui ont remplacé la plupart des CFC. Les HCFC sont quant à eux progressivement éliminés et remplacés par des hydro fluoro carbone (HFC), tels que le R-410A, qui ne contiennent pas de chlore.

Ces fluides existent en corps purs, en mélange zéotropes et en mélange azéotropique.

- mélange zéotrope : c'est un mélange de corps purs dont les propriétés dépendent des constituants du mélange et de leurs proportions respectives [18].
- mélange azéotropique : c'est un mélange de corps purs dans des proportions bien définies, il se comporte comme un nouveau corps pur [18].

I.3.4. Diagramme enthalpique du cycle frigorifique : diagramme de Mollier

La figure ci-dessus est un exemple de cycle frigorifique sur le diagramme de Mollier du réfrigérant R134a. Sous la courbe « en cloche » se situe le mélange liquide-vapeur. À gauche de la cloche, le fluide est à l'état liquide (sous-refroidissement). À droite, le fluide est à l'état vapeur (surchauffe)[4], la figure I.5 représente le diagramme enthalpique pour le réfrigérant R134a :

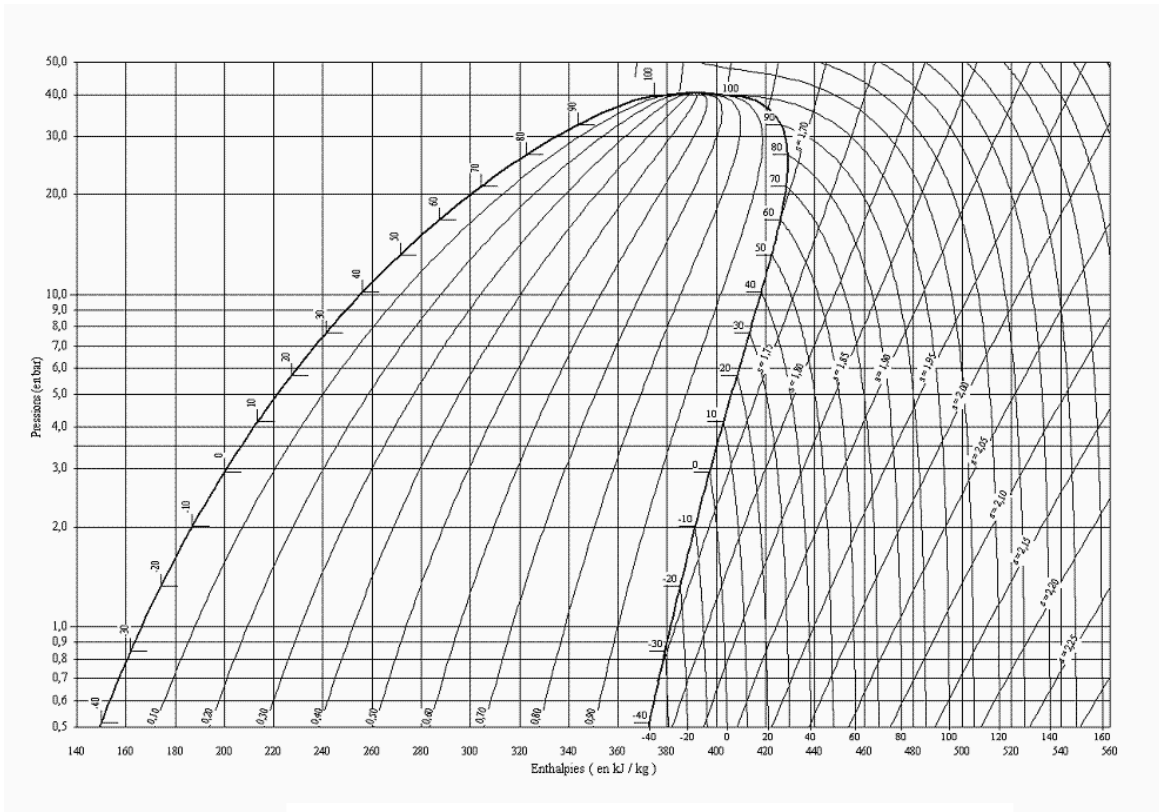


Figure I.5. diagramme de Mollier pour R134a

La courbe de saturation en liquide (enthalpies les plus faibles) se nomme courbe de bulle . La courbe de saturation en gaz (enthalpies les plus élevées) se nomme courbe de rosée .

Le cycle frigorifique idéal comprend une évaporation a pression constante, une compression isentrope, une condensation a pression constante et une détente isotherme du fluide frigorigène, la figure I.6 représente un tracé du cycle frigorifique idéal sur le diagramme P=f(h):

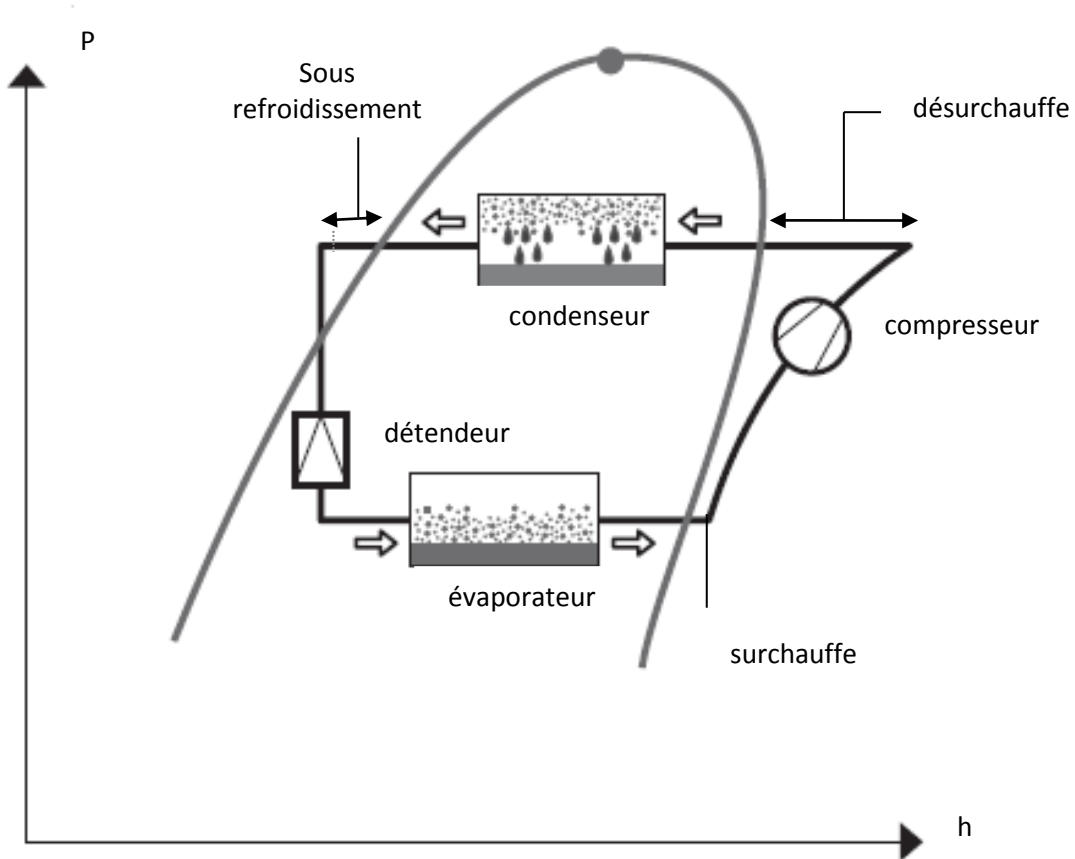


Figure I.6. représentation du cycle frigorifique à compression de vapeur sur le diagramme enthalpique

I.3.5. La condensation :

Les appareils qui ne sont pas équipés d'un congélateur sont automatiquement dégivrés. L'humidité qui se forme sur la paroi arrière du réfrigérateur est évacuée via un orifice d'écoulement de l'eau de dégivrage et recueillie dans un bac d'évaporation situé à l'extérieur du compartiment de réfrigération[19]. L'eau de dégivrage s'évapore sous l'action de la chaleur dissipée par le compresseur. Les gouttes d'eau qui apparaissent sur la paroi arrière du réfrigérateur sont liées au fonctionnement et sont, par conséquent, tout à fait normales.

I.4. Production du froid par la thermoélectricité :

I.4.1. Les effets thermoélectriques :

Les effets de la thermoélectricité ont pu être mis en évidence en premier lieu dans les semi-conducteurs si les effets n'ont pas été mis en évidence au début de l'histoire de l'électricité, c'est qu'ils sont masqués par l'effet joule qui est beaucoup plus apparent.

I.4.1.1. Effet Seebeck :

En 1821, Thomas Seebeck découvrit qu'un courant électrique circulerait de manière continue dans un circuit fermé composé de deux métaux différents, si les jonctions des métaux étaient maintenues à deux températures différentes[8], la figure 1.7 représente l'effet Seebeck :

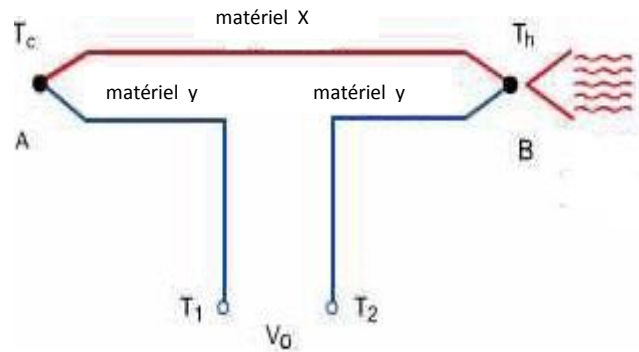


Figure I.7. effet Seebeck.[8]

Coefficient Seebeck: Le coefficient Seebeck (pouvoir thermoélectrique) est défini comme le rapport entre la différence de tension ΔV et le gradient de température ΔT . Si la différence de température ΔT entre les deux extrémités d'un matériau est faible, le coefficient de Seebeck est défini comme suit:

$$\alpha = \Delta V / \Delta T \quad (\text{I.11})$$

I.4.1.2. Effet Peltier

En 1834, Jean Peltier, horloger et physicien français, découvrit qu'un courant électrique produirait un gradient de température à la jonction de deux métaux dissemblables. L'effet Peltier est le principal contributeur à toutes les applications de refroidissement thermoélectrique, il est responsable de l'élimination de la chaleur et de son absorption. Il est dit que lorsqu'un courant électrique traverse deux conducteurs différents, la jonction des conducteurs absorbera ou émettra de la chaleur en fonction du flux de courant électrique. La chaleur absorbée ou libérée à la jonction est proportionnelle au courant électrique d'entrée. La constante de proportionnalité s'appelle le coefficient de Peltier, la figure 1.8 représente l'effet Peltier :

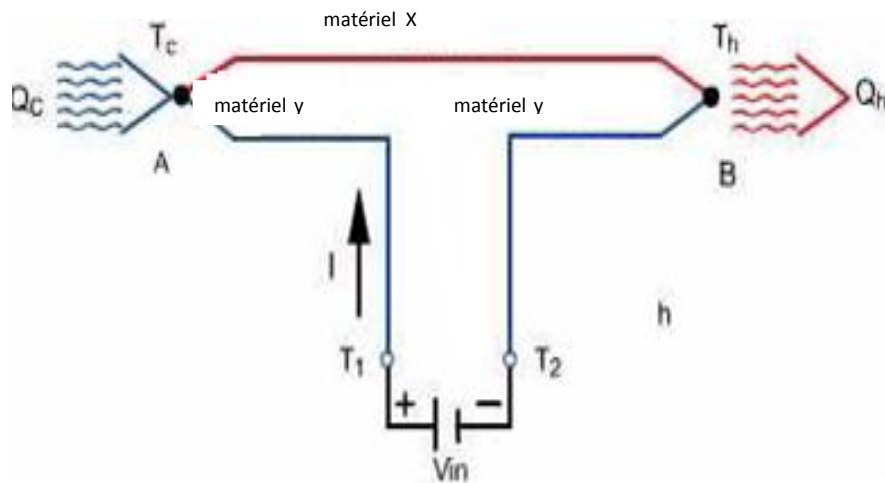


Figure I.8. effet Peletier.[8]

I.4.1.3. Effet Thomson (lord Kelvin) :

Le troisième effet thermoélectrique, l'effet Thomson, a lieu lorsqu'un courant traverse un conducteur soumis à un gradient de température, il dégage ou absorbe, par unité de temps, une quantité de chaleur Q proportionnelle à son intensité I et au gradient de température T [6].

$$Q = \tau_a \cdot \Delta T \cdot I \quad (\text{I.12})$$

τ_a : Coefficient de Thomson

Cet effet existe pour un seul matériau et ne nécessite pas de jonction, il est petit par rapport aux effets cités précédemment.

I.4.2. Les semi-conducteurs

Par son habilité à conduire le courant, un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant à son état pur (intrinsèque), il n'est ni un bon conducteur ni un bon isolant[26].

Les propriétés des semi-conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de porteurs de charge qu'ils contiennent, ils sont 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.

I.4.2.1 Dopage des semi- conducteurs

Le dopage est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité. Le dopage d'un matériau consiste à introduire, dans sa matrice, des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous.

a . Dopage type n :

Les semi-conducteurs dopés au n ont un nombre abondant d'électrons supplémentaires à utiliser comme porteurs de charge. Normalement, un matériau du groupe IV (comme le Si) avec 4 liaisons covalentes (4 électrons de valence) est lié à 4 autres Si. Pour produire un semi-conducteur de type n, le matériau Si est dopé avec un métal du groupe V (P ou As) ayant 5 électrons de valence, de sorte qu'un électron supplémentaire sur le métal du groupe V soit libre de se déplacer et soit porteur de charge[13] ,

la bande de conduction est alors globalement négative : on parle de dopage négatif, ou dopage n .

b. Dopage type p :

les dopants sont du groupe III (In, B) qui ont 3 électrons de valence. Ces matériaux nécessitent un électron supplémentaire pour la liaison, ce qui crée des "trous". Les semi-conducteurs dopés p sont des porteurs de charge positifs. Il semblerait qu'un trou se déplace lorsqu'un courant est appliqué puisqu'un électron se déplace pour combler un trou, créant un nouveau trou à l'origine de l'électron. Les trous et les électrons se déplacent dans des directions opposées [13] ,

Le trou s'est alors déplacé et ceci constitue bien un sorte de déplacement de charges virtuellement positive.

En résumé :

- le dopage de type n, qui consiste à produire un excès d'électrons, qui sont chargés négativement ;
- le dopage de type P, qui consiste à produire un déficit d'électrons, donc un excès de trous considérés comme chargés positivement .

la figure I.9 représente le comportement d'un semi-conducteur dopé n et p ,

- le dopage type n le Si avec le As
- le dopage type p le Si avec le B

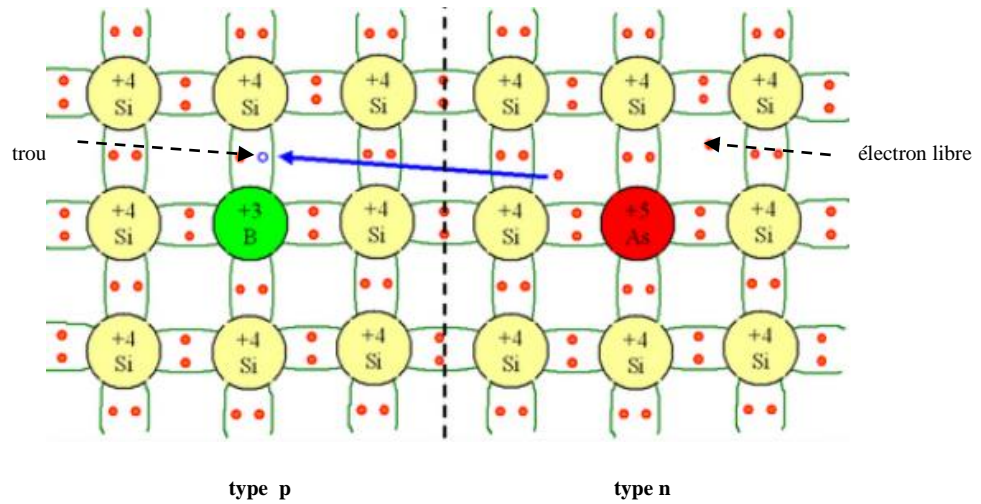


Figure .I.9. semi-conducteur dopé n et p [13]

I.4.3. Conception d'un élément Peltier :

I.4.3.1 Thermocouple :

Le plus petit composant d'un élément thermique est le thermocouple. Il se compose de deux conducteurs électriques de coefficients Seebeck très différents afin de générer une tension thermoélectrique la plus haute possible. Les matériaux utilisés sont généralement des blocs de semi-conducteurs connectés à leurs extrémités avec du cuivre. Jusqu'à présent, le matériau le plus adapté à température ambiante est le tellure de bismuth (Bi_2Te_3) avec dopages de type n et p [7].

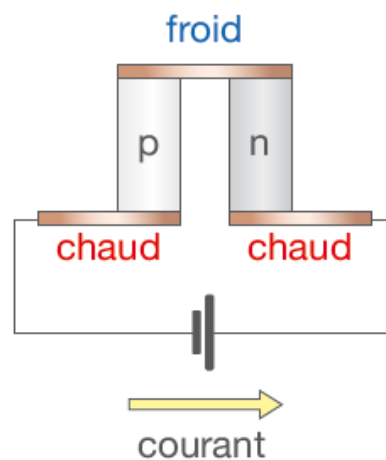


Figure .I.10. : thermocouple[7]

I.4.3.2. Élément thermique :

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.

I.4.4. Module Peltier :



Figure .I.11. module Peletier [13]

La figure .I.11 représente le module Peltier commercial , il 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 situés de chaque côté de l'élément Peltier. Des ventilateurs sont utilisés pour chasser l'air chaud ou refroidi[8] comme le montre la Figure I.12.

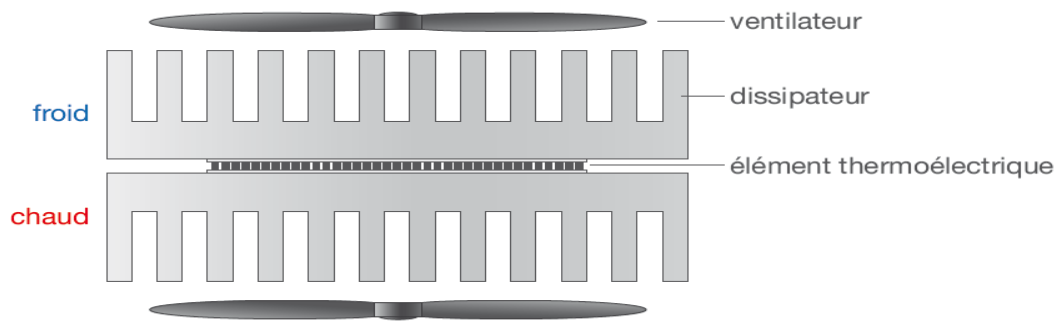


Figure .I.12. module Peletier avec ces deux ventilateurs [8]

Un isolant électrique , la céramique en général , doit exister afin d'éviter tout court-circuit électrique entre le module et la source de chaleur ; l'isolant doit avoir une conductivité thermique élevée afin que le gradient de température entre la source et le conducteur soit faible [8] , la figure I.13 représente les composants d'un élément Peltier :

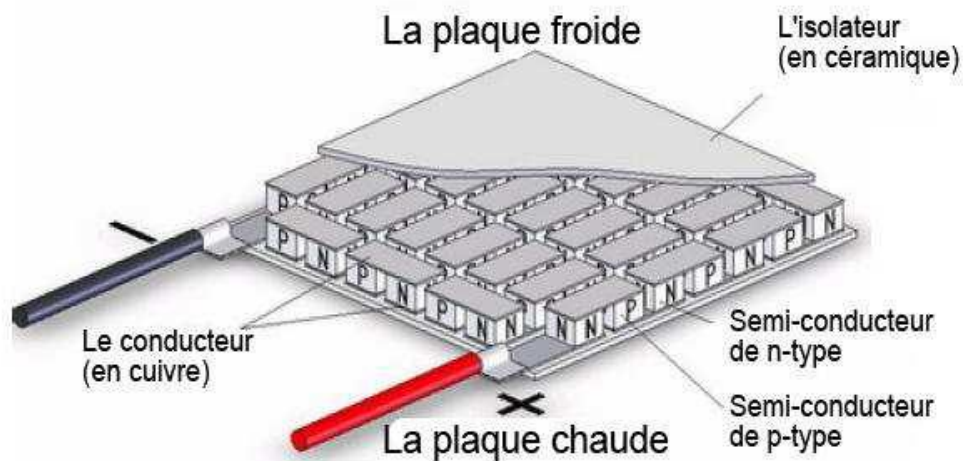


Figure .I.13. schéma descriptif d'un module Peltier [29]

I.4.5.Fonctionnement physique du module thermoélectrique :

Le principe de l'effet thermoélectrique est montré dans la figure I.14 :

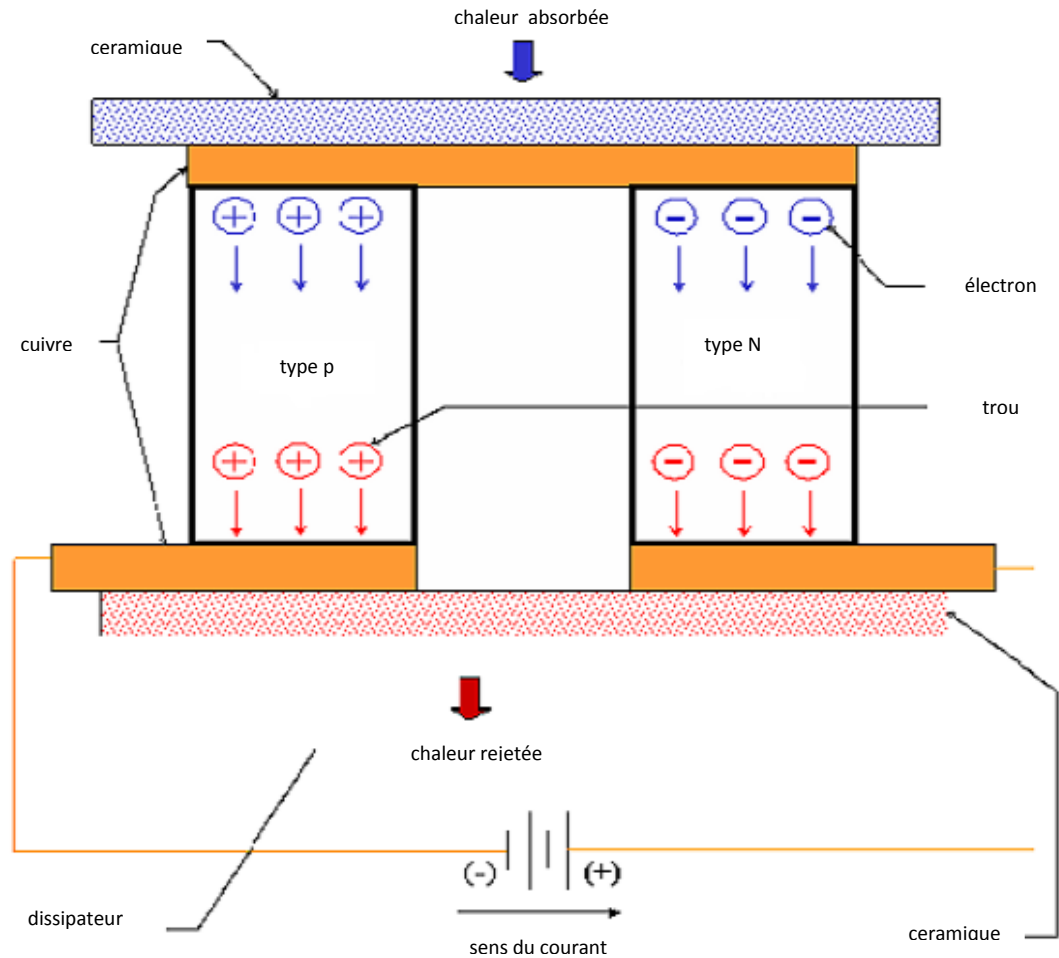


Figure I.14. Schéma de principe de l'effet Peltier [9]

Les électrons peuvent circuler librement dans les conducteurs en cuivre mais pas aussi librement dans le semi-conducteur. Lorsque les électrons quittent le cuivre et entrent dans la partie chaude du type p, ils doivent remplir un "trou" pour pouvoir se déplacer à travers le type p, lorsque les électrons remplissent un trou, ils tombent à un niveau d'énergie inférieur et libèrent de la chaleur au cours du processus[9]. Ensuite, lorsque les électrons passent du type p au conducteur en cuivre du côté froid, ils retournent à un niveau d'énergie supérieur et absorbent de la chaleur. Ensuite, les électrons se déplacent librement dans le cuivre jusqu'à atteindre le côté froid du semi-conducteur de type n. Lorsque les électrons entrent dans le type n, ils doivent augmenter le niveau d'énergie pour se déplacer dans le semi-conducteur. La chaleur est absorbée lorsque cela se produit. Enfin, lorsque les électrons quittent le côté chaud du type n, ils peuvent se déplacer librement dans le cuivre. Ils tombent à

un niveau d'énergie inférieur et libèrent de la chaleur au cours du processus. Le côté faisant face à la source de chaleur est considéré comme le côté froid et le côté faisant face à la chaleur rejetée est le côté chaud [9].

I.4.6. disposition des éléments Peltier :

a) plusieurs composants thermoélectriques électriquement et thermiquement parallèles

Pour augmenter le transfert de chaleur, plusieurs composants thermoélectriques de type p ou de type n peuvent être connectés en parallèle.

Cependant, l'appareil nécessite une basse tension et par conséquent un courant important, trop important pour être utilisé dans le commerce.

b) plusieurs composants thermiquement parallèles et électriquement en série

Les composants thermoélectriques peuvent être mis en série mais les capacités de transfert de chaleur sont réduites car les interconnexions entre le semi-conducteur créent un court-circuit thermique.

La configuration la plus efficace est celle où un composant thermoélectrique p et n est mis en série électriquement et thermiquement en parallèle.

I.4.7. Module à plusieurs étages :

Lorsque le différentiel de température souhaité entre le côté froid et le côté chaud ne peut pas être obtenu avec un module à un étage ou lorsque la température du côté froid doit être inférieure à celle qu'un refroidisseur à un étage permet, il peut être nécessaire d'appliquer un module à plusieurs étages [5]. Les modules à plusieurs étages (N) sont essentiellement des modules empilés dans un réseau vertical en forme de pyramide. à mesure que le nombre d'étages augmente, la température minimale du côté froid diminue. La figure I.15 représente des modules à plusieurs étages.

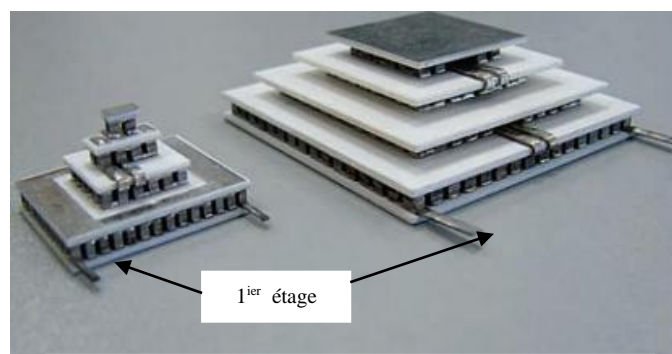


Figure . I.15. module à plusieurs étages [5]

L'augmentation du nombre d'étages augmente le coefficient de performance pour une température donnée du côté froid.

I.4.8. La condensation

Un des problèmes courants avec le refroidissement thermoélectrique est la condensation, en effet, il est courant que la face froide de l'élément ait une température inférieure à la température ambiante, de ce fait il se produit une condensation sur la plaque froide, ce qui entraîne une corrosion et une diminution de la fiabilité inhérente de l'élément. Dans la mesure où les refroidisseurs thermoélectriques peuvent refroidir trop bas et même en dessous de la température ambiante, la condensation est un problème, quand le module est utilisé dans un milieu électrique car il peut occasionner des courts-circuits [6].

Le mastic le plus couramment utilisé est le caoutchouc silicone. Des recherches ont été menées pour déterminer l'agent d'étanchéité le plus efficace pour protéger le copeau de l'eau.

I.4.9. paramètres physiques :

a) Coefficient de performance :

Le coefficient de performance COP est le rapport entre la capacité de refroidissement Q_c et la consommation électrique P [11].

$$\text{COP} = \frac{Q_F}{P} \quad (\text{I.13})$$

La puissance électrique P s'exprime en fonction de l'effet Seebeck et de la différence de température ΔT , selon l'équation I.14 [11] :

$$P = R I^2 + \alpha I \Delta T \quad (\text{I.14})$$

b) La capacité de réfrigération :(puissance frigorifique)

La capacité de réfrigération Q_F résulte du bilan énergétique exprimé à partir du premier principe de la thermodynamique [11]:

$$Q_g = Q_F + Q_d + \frac{1}{2} Q_j \quad (\text{I.15})$$

$$Q_F = \underbrace{\alpha I T_F}_{Q_g} - \underbrace{K \Delta T}_{Q_d} - \underbrace{1/2 R I^2}_{\frac{1}{2} Q_j} \quad (\text{I.16})$$

$$\Delta T = T_C - T_F \quad (\text{I.17})$$

Q_g : puissance thermique absorbée (w) à la soudure froide en fonction de l'effet Seebeck.

Q_d : flux de chaleur de la jonction chaude à la jonction froide (w).

Q_j : chaleur dégagée par effet joule (w), qui dépend de la résistance électrique R des éléments thermoélectriques en série et du courant d'entrée I.

c) Facteur de mérite :

Le facteur de mérite thermoélectrique Z indique si un matériau est un bon refroidisseur thermoélectrique. Il dépend de trois paramètres:

- résistivité électrique ρ (ou la conductivité électrique $\sigma = 1/\rho$)
- Coefficient de Seebeck α
- conductivité thermique totale k entre côté froid et côté chaud

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} - \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \quad [\text{11}] \quad (\text{I.18})$$

Une autre expression de Z prend en compte la résistance R des thermo éléments en série et de la conductance thermique K en parallèle:

$$Z = \frac{\alpha^2}{RK} \quad (\text{I.19})$$

Considérant la température absolue T (qui représente la température moyenne entre le côté froid et le côté chaud du module thermoélectrique), un paramètre largement utilisé est le produit sans dimension ZT.

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho k} - \frac{\alpha^2 \sigma T}{k} \quad (\text{I.20})$$

le terme $k = k_{\epsilon} + k_{\phi}$ est la conductivité thermique totale, composée du composant phonon (ou réseau) k_{ϕ} et du composant électronique k_{ϵ} ; le produit $\alpha^2 \sigma$ est appelé facteur de la puissance électrique, il dépend du coefficient de Seebeck α et de la conductivité électrique σ [11].

I.4.10. Matériaux thermoélectriques :

Un matériau est bon quand il a un pouvoir thermoélectrique élevé soit une conductivité électrique haute et une conductivité thermique faible.

Les meilleurs matériaux actuels présentent des ZT légèrement supérieur à 1 car il peuvent produire une plus grande puissance de refroidissement, en pratique, ZT représente l'efficacité du matériaux du type n et p qui composent un thermo élément.

Au cours du siècle dernier, un grand nombre de matériaux ont été étudiés. Les alliages bismuth-antimoine, la famille des tellures de bismuth et de plomb ainsi que les alliages silicium-germanium constituent l'essentiel des matériaux de référence. Comme la figure(I-18) le montre, chacune de ces familles n'est efficace que sur une plage de température restreinte.

Pour les basses températures, le matériau le plus utilisé actuellement en réfrigération thermoélectrique est à base de bismuth et de tellure Bi_2Te_3 [10].

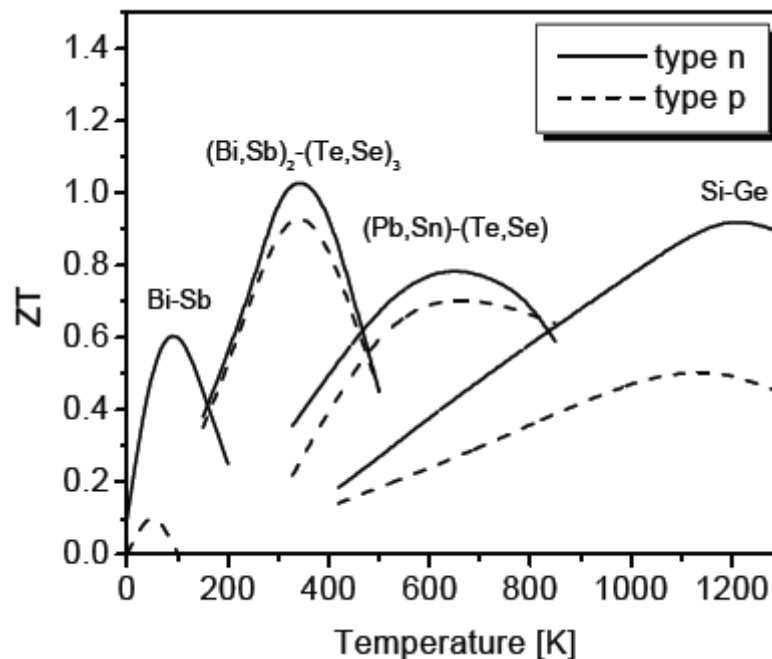


Figure . I.16. Evolution de ZT en fonction de la température pour les matériaux conventionnels de type n et type p [26]

I.5 Réfrigération :

La réfrigération est le moyen de conservation des aliments et tous autres produits pouvant être altérés ou détruit par la chaleur , les denrées à réfrigérer sont soumises à des températures positives (températures négatives en cas de congélation ou de surgélation)[2] sans pour cela atteindre la solidification des tissus , elle ralentit considérablement l'évolution microbienne des aliments .

La réfrigération contribue non seulement à la préservation de la qualité des aliments mais aussi , au stockage convenable des quantités en période d'abondance a fin d'éviter des pertes importantes pendant leur conservation.

- la congélation consiste à faire abaisser la température (entre -10 et -30 °c) d'un aliment jusqu'à ce que la majeure partie de son eau soit transformée en cristaux de glace .
- la surgélation est la congélation rapide des denrées à fin de provoquer la cristallisation rapide de son eau sous l'action du froid à basse température (en général entre -18 et -20 °c).
- **Conditions de conservation de certains aliments :**

La durée de conservation est en fonction de la nature du produit et de la température à laquelle il est conservé.

Tableau. I.1. conditions de conservation de certains denrées alimentaires [2]

Nature des denrées	Degré Hygrométrique %	Températures recommandées °c	
		Courte durée ou détail	Longue durée ou gros
dattes	85/90	+12	+6/+8
Figues fraîches	85	+6/+8	0/-1
Poires	82	+4	+2
Pommes	80/85	+4	0/+1
Carottes	80	+4/+6	+1/+3
Epinard	80	+6/+8	0/+1
Légumes divers	85	+8/+10	+2/+4
Bœuf frais	83	+2/+4	0/+2
Mouton frais	82	+1/+5	0/+2
Poisson frais	90	0/+1	
Lait frais		+4/+6	0/+2

CHAPITRE II
PARTIE EXPERIMENTALE

II.1. Etude expérimental d'un réfrigérateur à compression de vapeur ménager :

II.1.1 . Description de l'installation :

L' étude a été effectuée sur un réfrigérateur ménager didactique , il est représenté dans la figure II .1 , L'installation de réfrigération, muni de roulettes, est projetée pour refroidir un compartiment frigorifique muni d'une porte à une température de +5°C

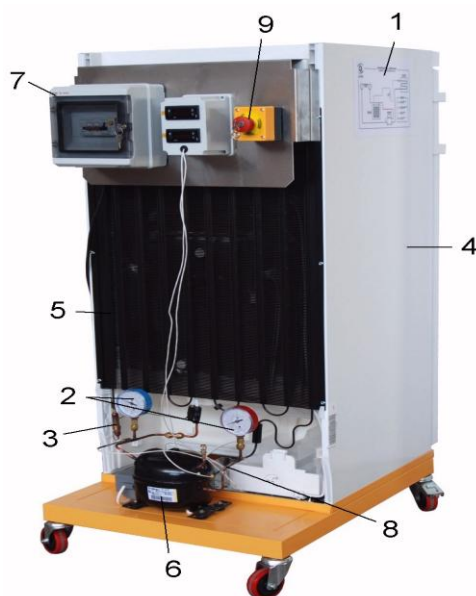
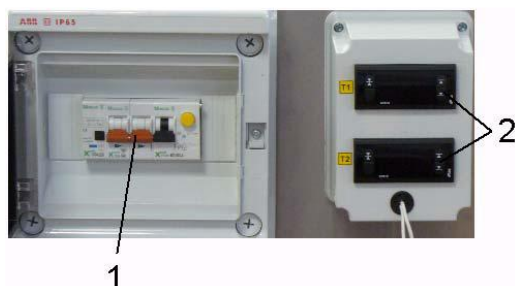


Figure II.1.: schéma du réfrigérateur ménager

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Tableau synoptique | 6. Compresseur |
| 2. Manomètres pour haute et basse pression | 7. boîte électrique |
| 3. Filtre de déshydratation | 8. Sondes de température |
| 4. enceinte à refroidir | 9. Bouton d'arrêt d'urgence |
| 5. Condenseur | |

la boîte électrique du réfrigérateur est représenté dans la figure II.2 :



1. Interrupteur
2. Thermomètres

Figure II.2.: boîte électrique

Le schéma du circuit du fluide frigopporteur est schématisé ci-dessous :

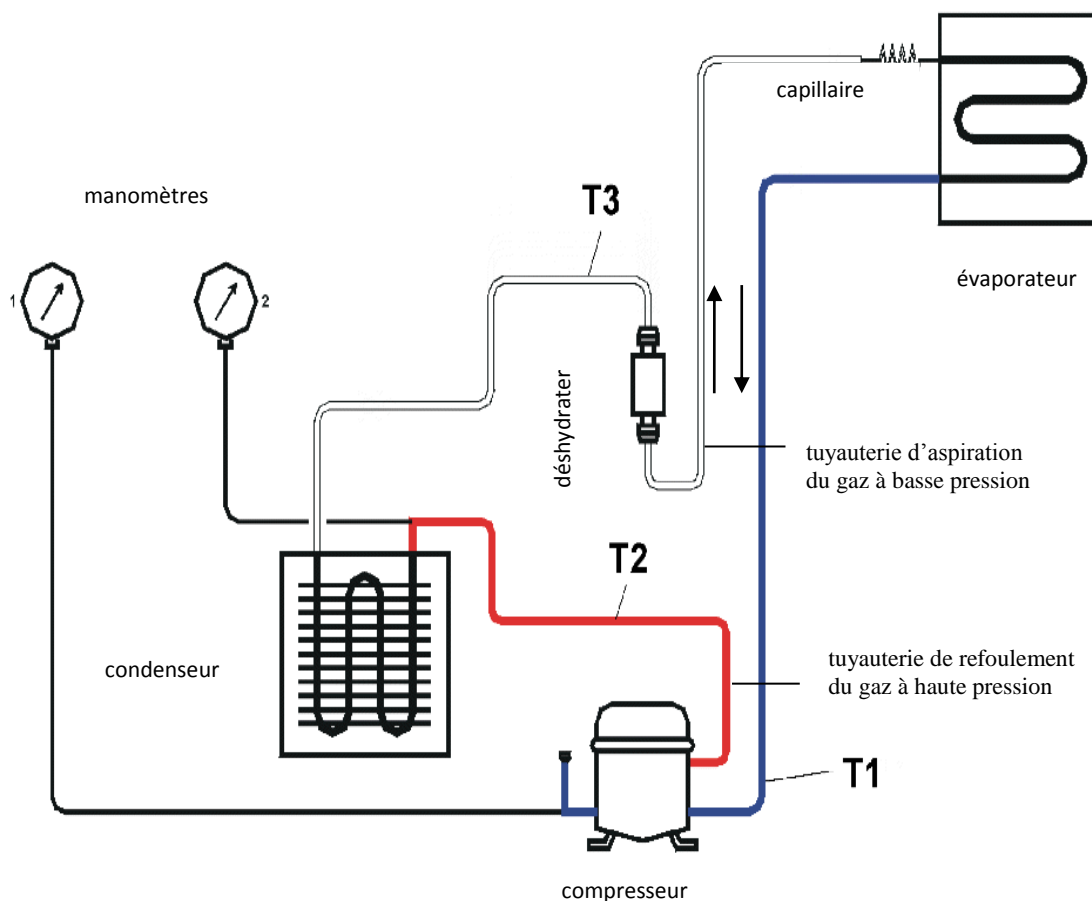


Figure II.3.: circuit du fluide frigorigène

II.1.2. Composants du réfrigérateur :

II.3.1.1. Compresseur à piston hermétique :

Il assure la compression du fluide frigorigène de la basse pression à la haute pression, La partie mécanique du compresseur et le moteur électrique sont enfermés dans une même enveloppe, le refroidissement du moteur est réalisé par le fluide frigorigène lui-même. Cet échauffement est préjudiciable au cycle frigorifique puisque la température à l'aspiration du compresseur augmente, un organe de sécurité contre la surchauffe (Klixon) est incorporé.

II.3.1.2. Condenseur statique à fil :

C'est un échangeur de chaleur qui a le rôle de condenser le fluide frigorigène, il est constitué

d'un serpentin appliqué sur un treillis de fils métalliques (ou sur une tôle perforée) et placé verticalement, il faut une distance de 5 à 6 cm pour assurer la circulation de l'air. Afin d'éviter toute augmentation excessive de la pression de condensation du fluide réfrigérant dans l'installation frigorifique, il faudra maintenir le condenseur propre.

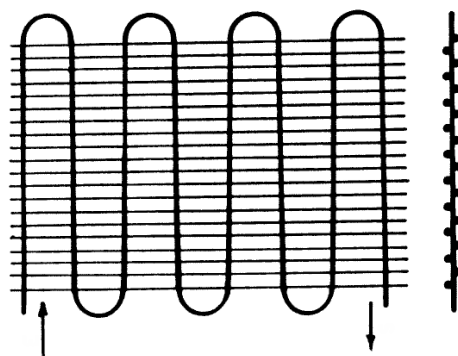


Figure II.4. condenseur statique à fil

II.3.1.3. Evaporateur statique:

c'est un autre échangeur de chaleur dans le circuit, il est constitué par une plaque d'évaporation réalisée selon le système "ROLL-BOND" (liaison à rouleaux).

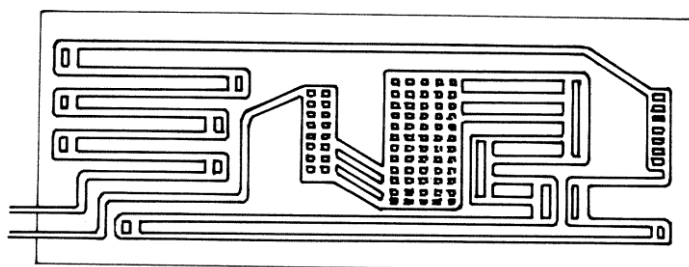


Figure II.5.: Evaporateur

Ce système consiste à tracer sur une plaque métallique le circuit désiré en utilisant une pâte non adhésive spéciale. Après avoir posé sur cette plaque une autre plaque, on lamine l'ensemble de façon à former un corps unique.

Ensuite, si l'on introduit une pression hydraulique entre les deux plaques, là où se trouve la pâte, on assistera à un gonflement tubulaire qui formera le circuit destiné à recevoir le liquide et la vapeur en expansion.

II.3.1.4. Détendeur capillaire :

Dans de petites installations, tels les appareils frigorifiques ou les petits climatiseurs, on se contente, comme dispositif de réglage, d'un étranglement dans la conduite du réfrigérant avant l'évaporateur. L'étranglement est assuré par un tube capillaire (de très faible diamètre) dans lequel la détente du fluide est obtenue par la perte de charge dans le tube.



Figure II.6.: Détendeur capillaire

II.3.1.5. Filtre déshydrateur :

Il est composé d'adsorbant (silica-gel) son rôle est de retirer l'humidité contenue dans le fluide frigorigène .



Figure II.7. Filtre

II.3.1.6. Tuyauterie en cuivre :

L'installation frigorifique présente trois tuyauteries principale qui sont la tuyauterie d'aspiration au compresseur, la tuyauterie de refoulement et la tuyauterie du liquide a l'évaporateur. le HFC 134 a est le fluide frigorigène utilisé dans l'installation.

II.3.1.7. Instruments de mesures et de réglage :

Sur le réfrigérateur on trouvera aussi un tableau synoptique reproduisant fidèlement tous les composants de l'installation.

- deux manomètres métalliques sont placés pour mesurer les pressions de fonctionnement, à savoir:
 - manomètre pour mesurer la pression d'aspiration;
 - manomètre pour mesurer la pression de refoulement.

- deux thermomètres digitaux et deux sondes, sont utilisés pour relever et contrôler les températures de l'ensemble de cette installation.

Il y a aussi un thermostat à deux positions(marche/arrêt du compresseur) pour régler la la température intérieure du réfrigérateur .

II.3.2.Dégivrage

L'humidité qui se forme sur la paroi arrière du réfrigérateur est évacuée via un orifice d'écoulement de l'eau de dégivrage et recueillie dans un bac d'évaporation situé à l'extérieur du compartiment de réfrigération.

L'eau de dégivrage s'évapore sous l'action de la chaleur dissipée par le compresseur. Les gouttes d'eau qui apparaissent sur la paroi arrière du réfrigérateur sont liées au fonctionnement et sont, par conséquent, tout à fait normales.

II.3.3.Contrôles préliminaires de l'installation

Avant de mettre en marche l'installation, les contrôles suivants sont effectués :

a) vérification préliminaire de la pression du réfrigérant dans le circuit frigorifique.

La pression du réfrigérant à l'intérieur du circuit frigorifique - quand la machine est froide et à une température ambiante d'environ 20 °C - doit être égale au moins à 2 bars ; dans le cas contraire, il est probable qu'il y ait une fuite de gaz dans le circuit.

b) contrôle des connexions électriques et des dispositifs de protection du moteur électrique, ainsi que de la tension d'alimentation.

II.3.4.paramètres relevés de l'installation :

Ces données ont été relevées à une température ambiante de 20 °C et après une heure de mise en service , les instruments du banc ont indiqué les valeurs suivantes:

- Manomètre de la haute pression $P_a = 11,0 \text{ bar} = 12,0 \text{ bar absolus}$
- Manomètre de la basse pression $P_b = 0,7 = 1,7 \text{ bar absolus}$
- Température d'aspiration $T_1 = 9,0^\circ\text{C}$
- Température du liquide $T_3 = 35,5^\circ\text{C}$.

Le volume intérieur du réfrigérateur est : 256 l

II.4. Etude d'un réfrigérateur thermoélectrique :

L'équipe des chercheurs de la division thermique du CDER ont entrepris des recherches sur le développement d'un petit réfrigérateur thermoélectrique afin de répondre aux besoins d'utilisation dans des régions reculées en Algérie comme le Sahara,

Le réfrigérateur est testé expérimentalement après la réalisation, le volume intérieur du prototype est de 10 litres, de dimensions 20cm.25cm.25 cm.

II.4.1. Principaux composants du réfrigérateur :

II.4.1.1 un module thermoélectrique(module Peltier) :



Figure II.8.module Peltier expérimental

Les modules Peltier les plus couramment utilisés dans toutes les applications sont TEC1-12706, TEC1-12704, TEC1-12708.

Dans cette étude, le module thermoélectrique TEC1-12706 a été utilisé dans la conception du réfrigérateur comme le montre la figure II.8.

Les caractéristiques du module sont données dans le tableau II.2

Tableau .II.2. Caractéristiques du module Peletier expérimental

Type	Nombre de couples (N)	I_{\max} A	V_{\max} V	$Q_{F \max}$ W	ΔT_{\max} K
TEC1-12706	127	6	15.2	56.5	68

I_{\max} est le courant d'entrée maximal à $Q_F = 0$

V_{\max} est la tension continue maximale à $Q_c = 0$

ΔT_{\max} est la différence de température entre le côté chaud et le côté froid du module Peltier quand $Q_F=0W$. $Q_{F \max}$ est la puissance de réfrigération quand ΔT est inférieure à $0^\circ C$.

II.4.1.2. Refroidisseurs ou dissipateurs de chaleur :

Deux refroidisseurs à ailettes sont montés sur le prototype, l'un à l'intérieur du réfrigérateur (Figure .II.9) et l'autre à l'extérieur réfrigérateur (Figure.II.10), a fin d' améliorer et d'augmenter le transfert de chaleur des surfaces, froid et chaude du module vers l'air environnent.

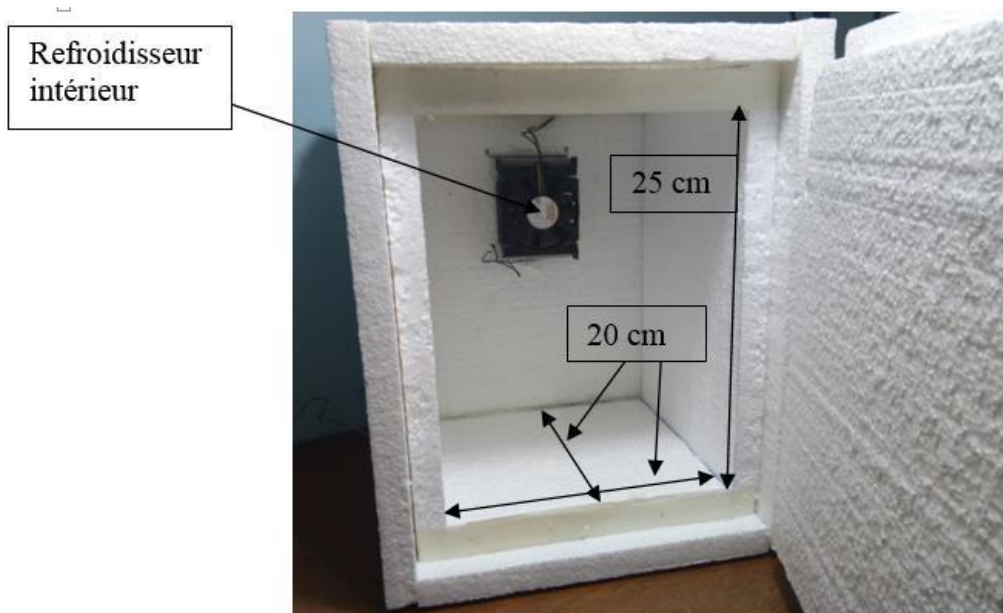


Figure .II.9. : Refroidisseur intérieur du réfrigérateur expérimental

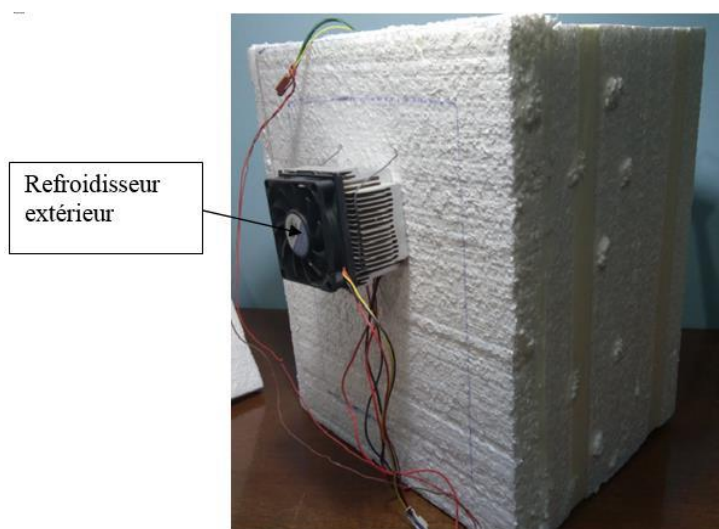


Figure .II.10. Refroidisseur extérieur du réfrigérateur expérimental

II.4.1.3. Ventilateurs:

Afin d'améliorer l'efficacité du module thermique, Un ventilateur a été utilisé du côté chaud du module pour rejeter la chaleur vers le milieu ambiant et un autre à l'intérieur du réfrigérateur, pour répartir uniformément le froid et créer une température uniforme.

II.4.1.4. plaques de polystyrènes :

Les plaques de polystyrène ont été utilisées comme isolant thermique. Ils permettent de minimiser le flux de chaleur venant de l'extérieure et qui est important lorsque le réfrigérateur est utilisé par temps chaud.

II.4.1.5. Extension en Aluminium :

Une plaque en Aluminium est utilisé comme un moyen d'extension entre les différents composants comme le montre la figure II.11.

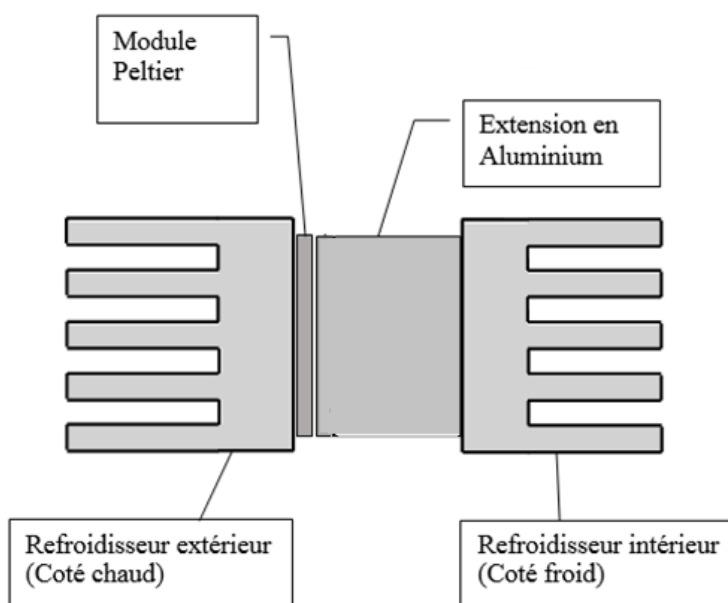


Figure .II.11. : Coupe transversal des éléments assemblés
Refroidisseurs et module Peltier par une
extension en Aluminium

- Schéma global du réfrigérateur thermoélectrique :

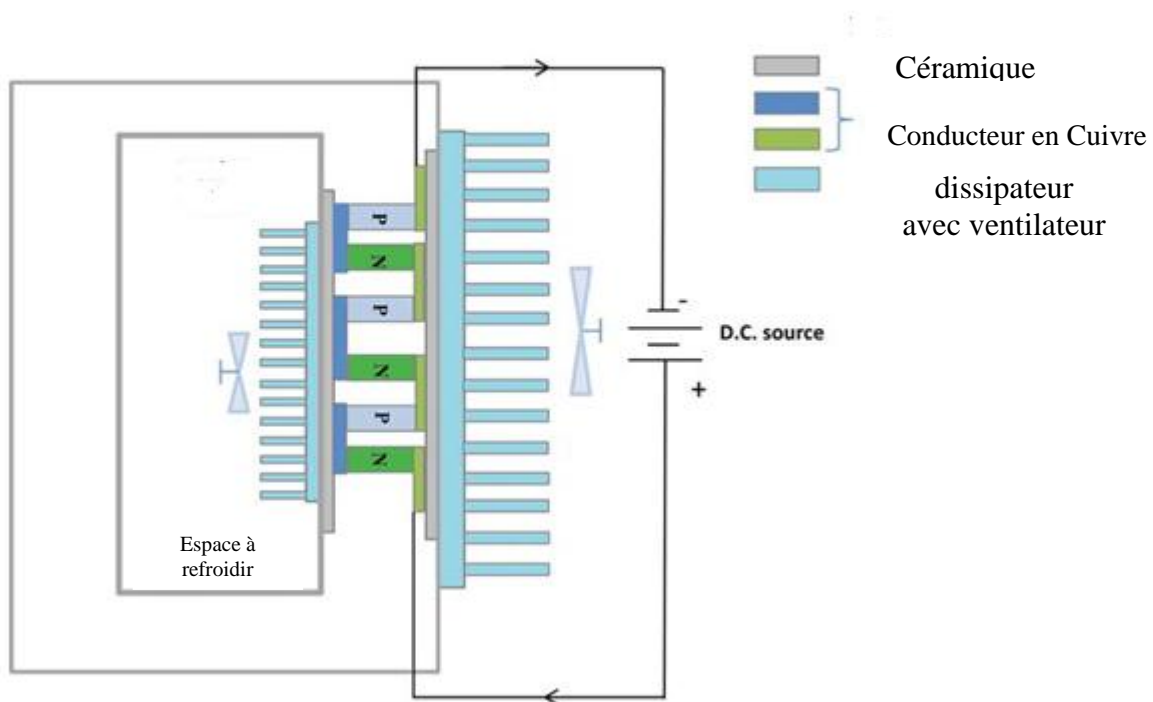


Figure .II.12. : Schéma globale du réfrigérateur thermoélectrique

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. réfrigérateur thermoélectrique :

III.1.1. Les températures :

Les températures enregistrées dans l'essai en fonction du temps en heures sont les suivantes

- température du côté froid (T_F),
- température du côté chaud (T_C)
- température à l'intérieur du réfrigérateur (T_{int}).
- température ambiante (T_{amb}),

Un enregistreur de données EXTECH SD200 et des thermocouples de type K sont utilisés .



Figure III.1. Enregistreur de températures

La tension appliquée au niveau du dispositif est de 12 Volt. L'ORIGIN 6.0 est le logiciel utilisé pour la représentation graphique. Le Tableau III.1 regroupe les températures relevées en fonction du temps .

Tableau III.1. Variation de la température en fonction du temps

temps (heures)	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,3
T_F °C	19,9	8,5	6,8	6,4	5,9	5,9	5,8	5,8	5,7	5,6	5,6	5,6
T_C °C	29,5	30	30,1	29,7	29,6	29,8	29,8	29,7	29,7	29,7	29,7	29,6
T_{amb} °C	28											
$T_C - T_F$ °C	5,4	16,2	17,7	18,2	18,6	18,5	18,9	18,7	19,1	18,7	18,7	18,7
T_{int} °C	22,2	11,5	9,7	9,7	9,2	9,2	9,1	9	8,9	8,9	8,8	8,8

Représentation graphique :

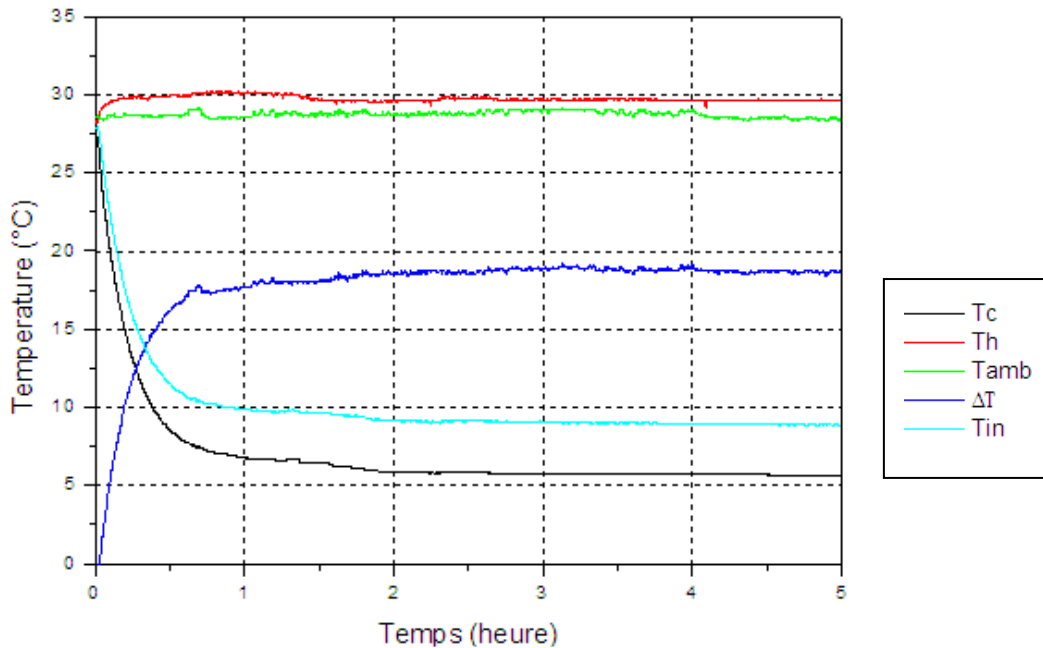


Figure III.2. Variation des températures en fonction du temps

La figure III.2 représente la variation des températures (T_F , T_C , T_{int}) en fonction du temps , la température ambiante est à 28°C . l'expérience a montré qu' après une heure de fonctionnement, la température à l'intérieure du réfrigérateur devient inférieure à 10°C(8.8°C),

III.1.2. La puissance frigorifique :[14]

La puissance frigorifique est déterminée par la formule suivante :

$$Q_F = \alpha_m I T_F - K_m(T_C - T_F) - 1/2 R_m I^2 \dots\dots\dots(III.1)$$

T_C et T_F sont les températures du coté chaud et coté froid du module respectivement. Q_F est la chaleur absorbé du coté froid du module et Q_C et la chaleur dissipé du coté chaud vers le milieu ambiant.

Le module de Peltier contient N couple thermoélectrique , il est caractérisé par sa résistance électrique R , sa conductance thermique K et son coefficient de Seebeck α .

$$\alpha_m = \alpha N \quad (III.2)$$

$$R_m = RN \quad (III.3)$$

$$K_m = KN \quad (III.4)$$

Cependant, ces coefficients peuvent être calculé on utilisant des paramètres V_{\max} , I_{\max} et ΔT_{\max} qui sont donnés par le fabricant du module Peltier [17].

Après une heure de fonctionnement les températures se sont stabilisées .

$$T_C = 29.7 + 273 = 302.7 \text{ K}$$

$$T_F = 5.6 + 273 = 248.6 \text{ K}$$

$$\alpha_m = \frac{V_{\max}}{T_C} = \frac{15.2}{302.7} = 0.0502 \text{ v/K} \quad (III.5)$$

$$R_m = \frac{V_{\max}(T_C - \Delta T_{\max})}{I_{\max} T_C} = \frac{15.2(302.7 - 68)}{6.302.7} = 1.964 \text{ } \Omega \quad (III.6)$$

$$\begin{aligned} 1/K_m &= \frac{T_C}{I_{\max} V_{\max}} - \frac{2 \Delta T_{\max}}{T_C - \Delta T_{\max}} \\ &= \frac{302.7}{6 \cdot 15.2} - \frac{2 \cdot 68}{302.7 - 68} = 1.923 \text{ m}^2 \text{ K/W} \end{aligned} \quad (III.7)$$

$$K_m = 0.52 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$I = \frac{V - \alpha_m (T_C - T_F)}{R_m} = \frac{12 - 0.0502 (302.7 - 248.6)}{1.964} \quad (\text{III.8})$$

$$= 4.727 \text{ A}$$

La variation de la puissance frigorifique en fonction du temps est récapitulée sur le tableau Tableau III.2.

Tableau. III.2. Variation de la puissance frigorifique en fonction du temps

Temps (heures)	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Puissance Frigorifique (Q_F) W	46,077	35,49	33,90	33,91	33,56	33,38	33,29	33,38	33,29	33,21	33,21	33,21

représentation graphique :

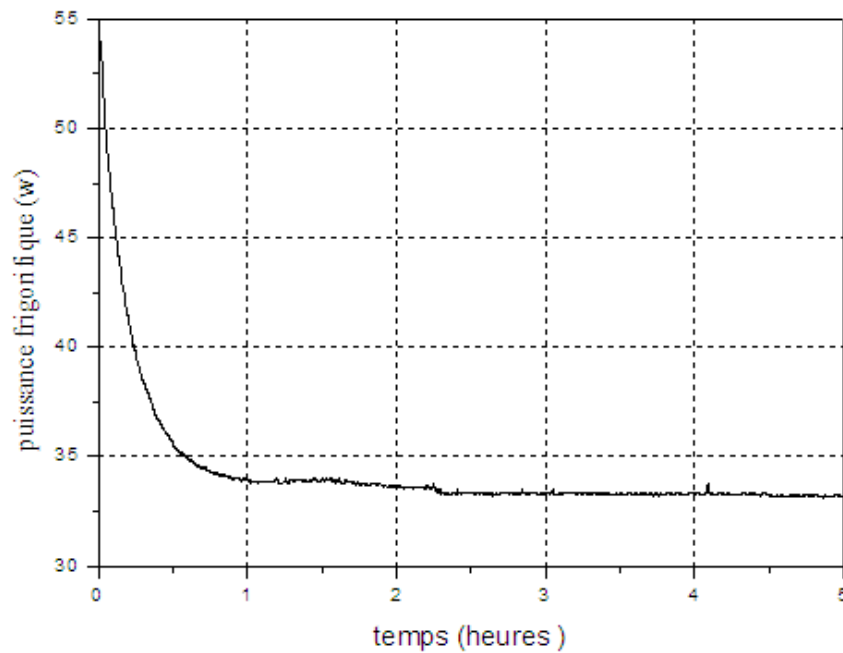


Figure III.3. Variation de la puissance frigorifique en fonction du temps

La quantité de chaleur absorbée à l'intérieur du réfrigérateur (Q_F) est de 33W , elle est inférieure à la puissance que le module thermoélectrique peut avoir (56.5) , la puissance frigorifique est directement proportionnelle au courant électrique I , c'est adire quelle d'autant plus grande que le courant mis en jeu est élevée .

III.1.3. La puissance calorifique:

La chaleur dissipée du coté chaud du module de Peletier est exprimée par la relation III.10 [11]:

$$\begin{aligned} Q_c &= \alpha_m I T_C - K_m(T_C - T_F) + \frac{1}{2} R_m I^2 \\ &= 0.0502 (4.727) (302.7) - 0.52 (302.7 - 248.6) + \frac{1}{2} (1.964) (4.727)^2 \\ &= 68.2 \text{ W} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

III.1.4. La puissance électrique consommée par le module :

La puissance électrique est donnée par la formule suivante [11] :

$$\begin{aligned} P &= \alpha_m I (T_C - T_F) + I^2 R_m \\ &= 0.0502 \cdot (4.727) (302.7 - 281.9) + 4.727^2 \cdot 1.964 = 56.71 \text{ w} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

III.1.5. Le coefficient de performance réel :

$$\text{COP} = \frac{Q_F}{P} \quad (\text{III.11})$$

Le tableau III.3 .variation du coefficient de performance en fonction du temps

temps (heures)	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
coefficient de performance	0,75393	0,6152	0,59306	0,59304	0,58807	0,58559	0,58435	0,5831

représentation graphique

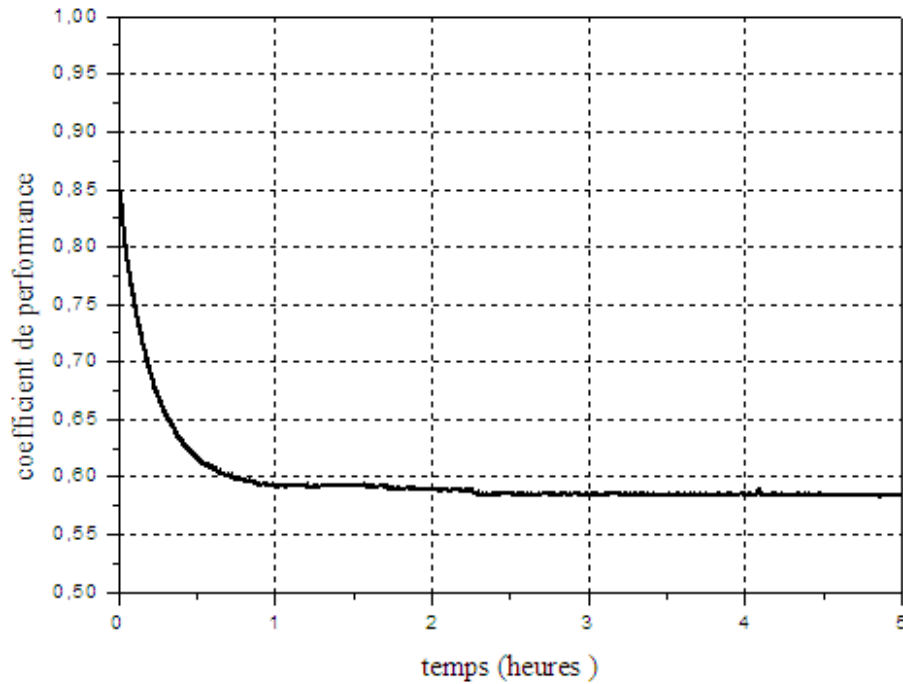


Figure III.4. Variation du coefficient de performance réel en fonction du temps

Les résultats expérimentaux montrent que le coefficient de performance réel du système de réfrigération thermoélectrique étudié est de 0,58, c'est une valeur améliorée par rapport à celle obtenue dans la dernière étude (0,27) [9] ce qui est satisfaisant, d'autant plus, le COP théorique d'un refroidisseur thermoélectrique se situe entre 0,4 et 0,7, donc c'est une valeur qui prouve une certaine performance du réfrigérateur.

III.1.6. Le coefficient de performance de Carnot :

le COP_{max} correspond au COP de Carnot [11] :

$$COP_{max} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (III.12)$$

Tableau III.4. Variation des coefficients de performance maximal fonction du temps

Temps (heures)	0,5	1	1,5	2	3	4	5
COP max	13,1	12,01	11,99	11,77	11,62	11,61	11,56

Représentation graphique :

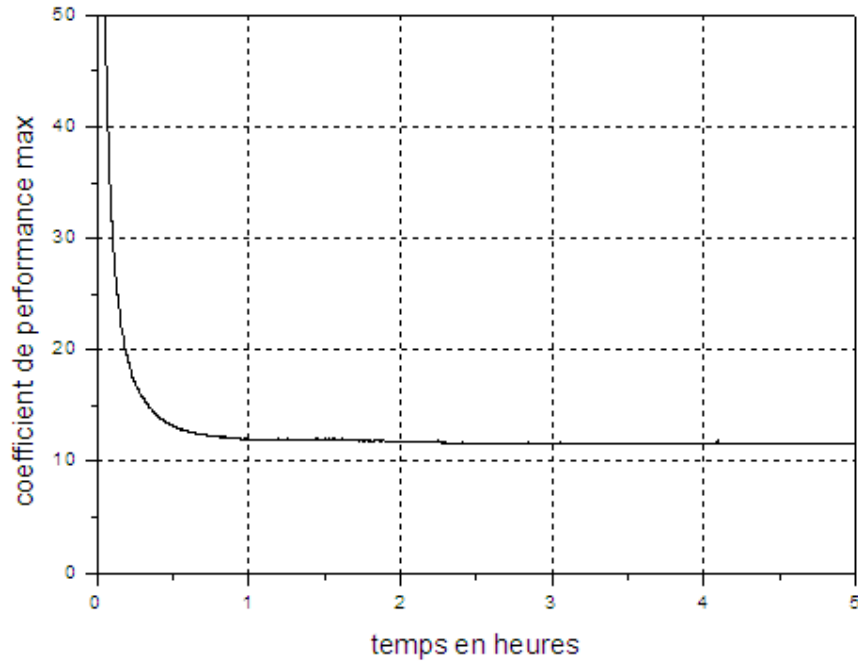


Figure III.5. Variation du coefficient de performance maximal en fonction du temps

III.1.7.facteur de mérite :

$$Z = \frac{2 \Delta T_{\max}}{(T_C - \Delta T_{\max})^2} = \frac{2 \cdot 68}{(302.7 - 68)^2} \quad (\text{III.13})$$

$$= 0.0024\text{K}^{-1}$$

$$ZT = Z (T_C + T_F)/2 \quad (\text{III.14})$$

$$= 0.0024 \cdot (302.7 + 281.9) / 2 = 0.701$$

La valeur de ZT paraît acceptable vu qu'elle est proche à 1. si ZT est augmenté à 2 ou 3, le dispositif de refroidissement thermoélectrique sera compétitif par rapport aux systèmes de refroidissement à compression de vapeur.

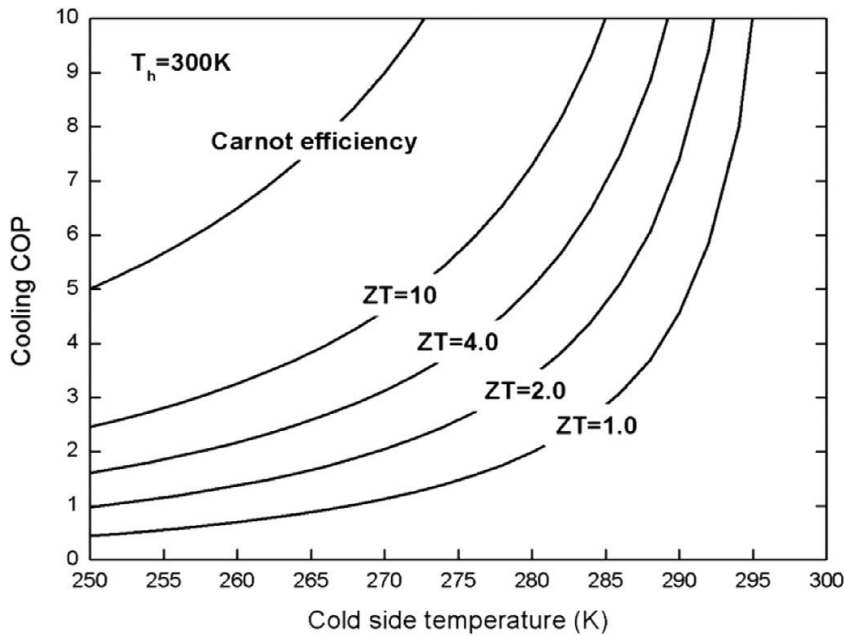


Figure III.6.ZT en fonction du coefficient de performance [10]

III.2. réfrigérateur à compression de vapeur :

III.2.1.le tracé du cycle frigorifique :

La représentation du cycle frigorifique sur le diagramme de Mollier du fluide frigorigène R134a s'effectue après avoir relevé dans l'installation, les températures du gaz lors de l'aspiration (T_1), de refoulement (T_2) et la température du liquide frigorigène avant qu'il ne traverse le tuyau capillaire (T_3).

- Étapes du tracé :

- 1- On trace les droites $P_a = \text{constante} = 12,0 \text{ bar}$ et $P_b = \text{constante} = 1,7 \text{ bar}$ absolus.
- 2- En partant du point 3 qui correspond à l'intersection entre la droite $P_a = 12,0 \text{ bar}$ et $T_3 = 35,5 \text{ °C}$
- 3- On trace une ligne verticale jusqu'à rencontrer la droite $P_b = 1,7 \text{ bar}$ au point 4.
- 4- En partant du point 1, qui correspond à l'intersection entre les droites $P_b = \text{constante} = 1,7 \text{ bar}$ et $T_1 = \text{constante} = 9 \text{ °C}$, on trace la parallèle aux lignes adiabatiques afin de croiser la droite $P_a = \text{constante} = 12,0 \text{ bar}$ au point 2.

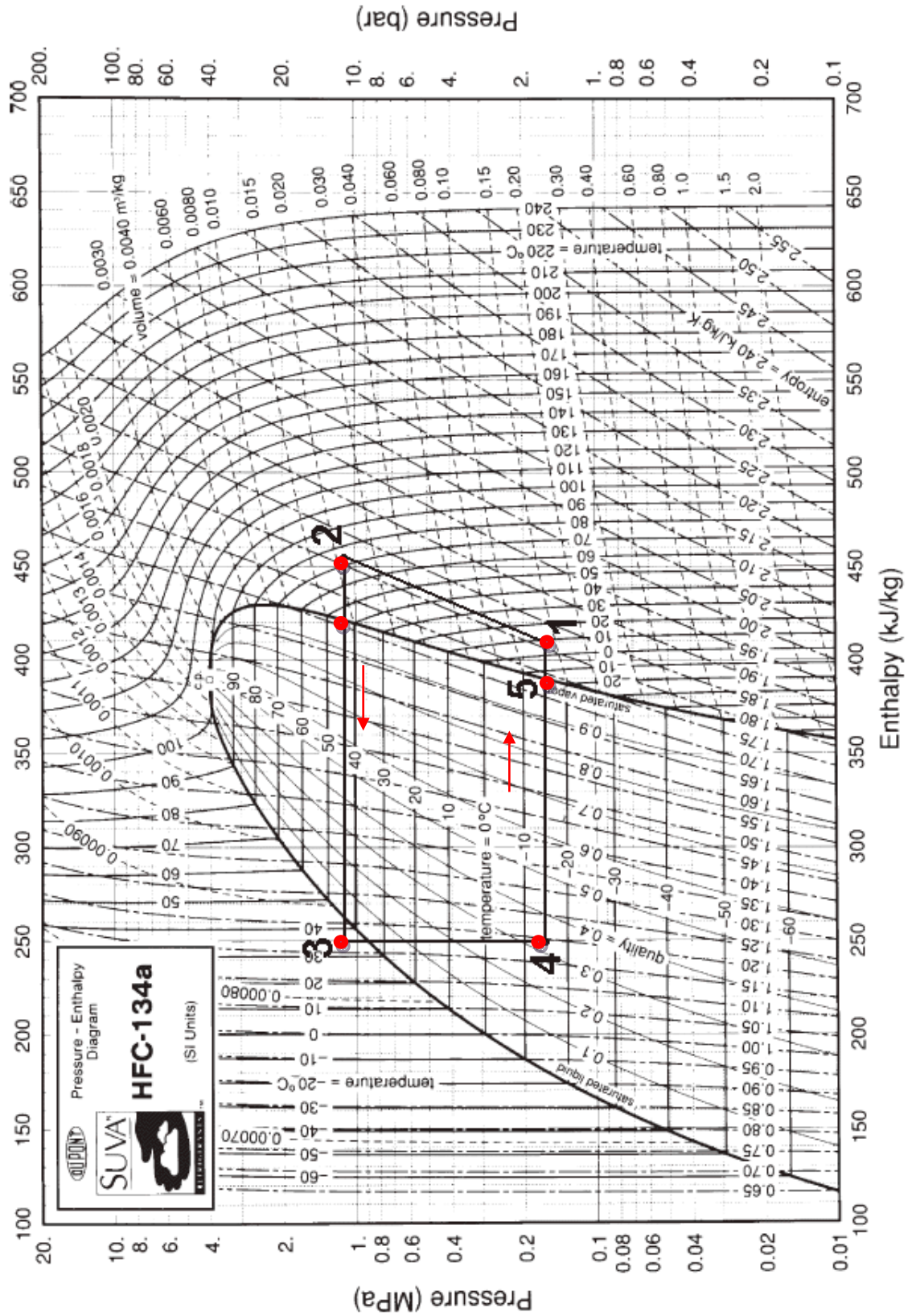


Figure III.7. Tracé du cycle frigorifique du réfrigérateur

III.2.1.1. Interprétation du cycle :

- Segment 1-2 , le fluide réfrigérant sort de l'évaporateur pour être aspiré par le compresseur qui en augmente la pression et la surchauffe avant de l'envoyer au condenseur , On remarquera que le point 2 présente une température supérieure à la température relevée par le thermomètre, dans la position T_2 , cela est dû à l'échange thermique avec l'ambiance extérieure.
- Segment 2-3 , représente la quantité de chaleur (par kg de frigorigène) que le gaz surchauffé doit perdre pour se liquéfier, le gaz réfrigérant est d'abord désurchauffé, condensé puis sous refroidi , un sous refroidissement convenable est compris entre 4°c à 7°c [15] , alors que le sous refroidissement dans ce cas est : $\Delta T = 44 - 35.5 = 8.5^{\circ}\text{c}$,
- Segment 3-4 , représente la détente du fluide liquide .
- Segment 4-5, relevé sur l'échelle de l'enthalpie, représente la chaleur en kJ/kg que le liquide absorbe de l'espace intérieur du réfrigérateur afin de le transformer en vapeur.
- Segment 5-1 représente la surchauffe de la vapeur dans la portion du circuit allant de la sortie de l'évaporateur jusqu'au compresseur, ΔT de la surchauffe est ;
 $T_1 - T_5 = 9 - (-15) = 24^{\circ}\text{c}$, une surchauffe convenable est comprise entre 5°c à 8°c [15], ce qui signifie que la valeur trouvée est supérieure à la norme ,il y a un manque de liquide dans l'évaporateur.

III.2.1.2. Paramètres relevés du diagramme:

Tableau III.5. Paramètres relevés du cycle frigorifique du réfrigérateur

temperature d'évaporation $^{\circ}\text{c}$	temperature de condensation $^{\circ}\text{c}$	h_1 kJ/kg	h_2 kJ/kg	h_3 kJ/kg	h_4 kJ/kg	h_5 kJ/kg
-15	44	410	455	250	250	390

III.2.2.3. Calcul des paramètres physiques :

Les calculs sont effectués pour 1kg du R134a après une heure de fonctionnement .

a) puissance frigorifique Q_F (évaporateur):

$$\begin{aligned} Q_F &= q_m (h_1 - h_4) & \text{(III.15)} \\ &= 1(410 - 250)/3600 = 0.044 \text{ kw} = 44 \text{ w} \end{aligned}$$

b) puissance calorifique Q_C (condenseur):

$$\begin{aligned} Q_C &= q_m (h_2 - h_3) & \text{(III.16)} \\ &= 1(455 - 250)/3600 = 0.056 \text{ kw} = 56 \text{ w} \end{aligned}$$

c) puissance absorbée par le compresseur (W) :

$$\begin{aligned} W &= q_m (h_2 - h_1) & \text{(III.17)} \\ &= 455 - 410 = 0.0125 \text{ kw} = 12.5 \text{ w} \end{aligned}$$

d) coefficient de performance reel:

$$\text{COP} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{160}{45} = 3.55 \quad \text{(III.18)}$$

e) coefficient de performance de carnot:

$$\text{COP}_c = \frac{T_0}{T_C - T_0} = \frac{258}{317 - 258} = 4.37 \quad \text{(III.19)}$$

T_0 : température d'évaporation (K) $\longrightarrow T_0 = -15 + 273$

T_C : temperature de condensation (K) $\longrightarrow T_C = 44 + 273$

III.3. Tableau récapitulatif des résultats obtenus :

Tableau III.6. Tableau récapitulatif des résultats

Paramètres	Réfrigérateur thermoélectrique	Réfrigérateur à compression de vapeur
$T_{amb} - T_{int}$	20°C	15°C
Puissance frigorifique w	33	44
Puissance calorifique	68.2 W	56
Puissance absorbée	56.71 w	12.5
COP_{EXP}	0.58	3.55
COP_{Carnot}	11.56	4.37

La différence entre l'intérieur et l'extérieur du dispositif a atteint 20°C, tandis que l'écart de températures $T_{amb} - T_{int}$ dans le cas d'un réfrigérateur à compression de vapeur est de 15°C. Cela signifie que ce refroidissement est moins rapide par rapport à la réfrigération thermoélectrique, le réfrigérateur thermoélectrique a pris moins de temps pour atteindre la température de refroidissement.

Pour abaisser la température intérieure du réfrigérateur, il nous faut une température d'évaporation de R 134a de -15°C dans le réfrigérateur à vapeur et une température de la surface froide de 5.6°C dans le réfrigérateur thermoélectrique.

Le COP expérimental du réfrigérateur à compression (3.55) est nettement supérieur à 0.58, cela signifie que le froid produit est quasiment plus grand que la puissance électrique consommée dans le cas d'un réfrigérateur à vapeur.

Le $COP_{max (Carnot)}$ (11.5) du réfrigérateur thermoélectrique est très inférieur au COP réel, ça s'explique par la présence des pertes d'énergie pour plusieurs causes :

- perte par conduction à travers le module Peltier
- perte par rayonnement et convection due à une mauvaise isolation du système
- perte par effet joule due à la résistance interne du module

Conclusion

Cette étude montre la comparaison expérimentale entre un réfrigérateur à compression de vapeur domestique et un réfrigérateur thermoélectrique construit en laboratoire. Les tests ont été effectués pour déterminer principalement le COP et les températures de refroidissement en fonction du temps.

Sous l'image des résultats obtenus, un réfrigérateur est d'autant plus performant que la quantité de froid qu'il produit est maximale pour une dépense de travail minimal, autrement dit, il est plus rentable que son coefficient de performance est élevé malgré que le COP réel d'un réfrigérateur à vapeur reste plus grand que celui d'un réfrigérateur thermoélectrique, les températures de réfrigération consignées sont atteintes et maintenues, cela veut dire, que l'interprétation des valeurs de COP sont différentes d'un cas à l'autre. La performance thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique dépend des valeurs du COP du module thermoélectrique (type de semi-conducteur) et de la conception du dissipateur thermique, tandis que le COP d'un réfrigérateur à vapeur est liée essentiellement aux paramètres thermodynamiques et chimiques de son fluide frigorigène,

Le coefficient de performance réel du système de réfrigération thermoélectrique expérimental est de 0.58, qui est plus grand que le COP (0.27) obtenu par la dernière étude [9], ce qui est considéré comme un progrès et une réussite atteinte par le CDER.

En vu des investigations engagées sur ce sujet, des réalisations prometteuses sont en cours à fin de concevoir des réfrigérateurs thermoélectriques de plus grande capacité (L) avec des puissances frigorifiques plus élevées. Des études sur le refroidissement thermoélectriques ont conduit à l'intégration de panneaux solaires comme source de courant pour alimenter les modules à effet Peltier.

L'énergie solaire peut être utilisée comme source d'énergie pour le système car il s'agit d'une source d'énergie renouvelable. Cela réduit énormément le coût de fonctionnement du réfrigérateur et donc la consommation électrique, la réfrigération thermoélectrique par un module Peltier à plusieurs étages peut être utilisé pour augmenter la puissance de refroidissement ainsi que la température de l'enceinte à refroidir.

Des recherches sur le développement d'un réfrigérateur thermoélectrique alimenté par des cellules solaires et à deux étages sont entrepris au niveau du CDER, afin de répondre

aux besoins de stockage frigorifique des aliments , des vaccins , dans les régions rurales ou saharienne où l'alimentation électrique est non disponible.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : D. LEDUCQ, Froid et Environnement , Cemagref , 2009.
- [2] : P.Rapin , P . Jacquard , Formulaire du froid , DUNOD , 1999.
- [3] : J.Roux-Briffaud, La Thermoélectricité, Etude bibliographique , 2008.
- [4] : G. VRINAT, production de froid , exemples de calcul de machines , techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique ,2010.
- [5] : J.Patel, M. Patel, J. Patel, H. Modi, improvement In the Cop Of Thermoelectric Cooler, International journal of scientific & technology research , vol 5 , 2016.
- [6] : P. Chapoul , P. Gallais, C. dom , K. guerineau , J.baptiste moussard , étude du module thermoélectrique à effet Peltier, rapport P6-3 , , institut national des sciences appliquées ,ROUEN, 2008.
- [7] : J. Thielmann , Les technologies de refroidissement (les éléments Peltier vont-ils remplacés les compresseurs) , white paper BINDER ,2006.
- [8] : G.B .Salunke. . Bhadane Sanket Keda , Dhus Sudhir Raosaheb , Shinde Pallavi Kishor , Davkhar Pramod Shankar, " Thermoelectric Refrigerator System" , International Journal for Scientific Research & Development , Vol 4, 2017.
- [9] : S. Sreenatha Reddy, G. Naveen Kumar, K. Sridhar, M. Sai Siri , Design and Fabrication of Thermo Electric Refrigerator, International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) ,Vol 3 , 2019.
- [10] : D. Zhao, Gang Tan ," thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications" , Applied Thermal Engineering ,Vol.66 , 2014.
- [11] : D. Enescu , E. OtiliaVirjoghe , thermoelectric cooling parameters and performance ,Renewa bleand Sustainable Energy Reviews ,Vol 38 , 2014.
- [12] : réfrigérateur domestique Didactique, support pédagogique ECODIME, 2009.
- [13] : C. Ngo , H. Ngo , Introduction à la physique des semi-conducteurs, 2ième cycle école d'ingénieurs , Dunod .
- [14] : M. Hadjiata, S. Oualia, A. Ait-Oualia, K. Salhia, M. Hazmounea. A. Gamab , Etude expérimentale d'un réfrigérateur thermoélectrique solaire , CDER ,2019

- [15]: M. Berdja, M .laidi, A .Benhabiles, S. Geurs, I .Abbad, Etude et dimensionnement d'un système frigorifique photovoltaïque Fonctionne en courant continu pour le site de BouIsmaïl (UDES) , journée internationale des énergies nouvelles renouvelables ,2010.
- [16]: M. Duminil, Théorie des machines frigorifiques (Machine à compression mécanique) Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique.,2012.
- [17] : K .Dongare V, V. Kinare R , H. Parkar M, P. Salunke R , Design and Development of Thermoelectric Refrigerator, International Research Journal of Engineering and Technology , Vol 05, 2018.
- [18] : P.Rapin , P.Jackard , Installation frigorifiques , édition Pyc , 1996.
- [19]: P. Kotzaoglanian , Le froid et la clim expliqués aux débutants (du réfrigérateur au split inveter réversible) , manuel frigobase 2ieme édidion , Kotza international., 2007.
- [20] : N. Yadav . N. Mehta , Review on Thermoelectric materials and applications, International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 1, 2013.
- [21] : D. Champier , Thermoélectricité ,généralités, applications et conception des générateurs thermoélectriques, congrès national des professeurs de physique et de chimie , 27 au 30 octobre 2015 .
- [22] : Nilesh Yadav , Nirvesh Mehta , Review on Thermoelectric materials and applications IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 1, 2013.
- [23]: K. Manohar , A. Anthony Adeyanju, comparison of the experimental performance of a thermoelectric refrigerator with a vapour compression refrigerator , International Journal of Technical Research and Applications, Vol 2 , 2014.
- [24] : D.S. Kima , C.A. Infante Ferreira , Solar refrigeration options – a state-of-the-art review, international journal of refrigeration Vol 31 ,2008.
- [25]: V.D.ROS , Les skutterudites : matériaux thermoélectriques performants pour la génération d'électricité matériaux 13-17 Novembre, Dijon, France, 2006.
- [26]: B.ZOUAK , Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité, mémoire de Magister , Université de TIZI OUZOU , 2012.

[27] : A.S. Bounouioua, Modélisation d'une machine frigorifique a compression mécanique, mémoire de magistère en génie civil (option : installations et thermique de bâtiment , université OUM EL BOUAGHI ,2008.

[28] :T. Mohit Pravinchandra , Peltier cooling module, mémoire de master , Pandit Deendayal Petroleum University. , 2015.

[29] : Y. Kim , Etude numérique et expérimentale d'une pompe à chaleur thermoélectrique innovante basée sur une conception intégrée et la technique du jet impactant , thèse de doctorat, France,2013.