

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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

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

Master

En
« Filière : Génie Mécanique »
« Spécialité : Energétique »

THÈME :

**Etude et réalisation d'un refroidisseur de boisson par
l'effet thermoélectrique**

Réalisé par

▪ AKACHA Mohamed Djamel

Encadré par

Dr. BILAL ABDEREZZAK

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements tout d'abord à mon encadreur, Monsieur ABDEREZZAK Bilal pour son suivi, sa patience, sa disponibilité, son génie qui fait qu'à sa tête ses nombreux conseils et ses critiques constructives pour l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie aussi l'ensemble de mon jury de soutenance, président et examinateur, pour le temps consacré pour lire et examiner mon mémoire, et pour leur disponibilité.

Je remercie encore ma famille, pour son soutien indéfectible, et pour m'avoir appris l'endurance, la ténacité en m'encourageant à ne jamais fléchir.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à travers ces lignes, aux personnes qui m'ont aidé et qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Ma gratitude va aussi envers notre université, par son vice rectorat chargé des relations externes, de m'avoir ouvert la possibilité de faire une mobilité Erasmus à l'Université de Sapienza en Italie. Cette expérience a contribué d'une manière très positive non seulement à l'élaboration de ce travail, mais aussi à compléter mon cursus académique par une formation de qualité.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, synonyme de concrétisation de tous mes efforts fournis pendant ces années :

A mes très chers parents en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur dévouement, leur patience et pour tous les sacrifices qu'ils ont consenti à mon égard, sans eux je serais jamais arrivé s'ils n'avaient pas été là pour moi. Qu'ils puissent voir en ce mémoire la marque de ma profonde reconnaissance envers eux, ainsi que tout mon amour.

A mes sœurs, *que j'aime tant, que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens.*

A tous mes proches présents à mes côtés, qui m'ont soutenu lors de mon cursus.

A la mémoire de ceux qui nous ont quittés ce monde et que j'aurais tant aimé qu'ils soient auprès de moi dans cette étape de ma vie «Rebiyerrahmhoum ».

A Rome qui m'a bien appris des choses et a fait revivre tout ce que j'ai pu tuer en moi

A tous mes enseignants ainsi que mes collègues de la promotion 2018.

Sans oublier mes très chers amis qui m'ont aidé et soutenu y compris ceux que j'ai connus durant mes années d'études.

A tous ceux qui m'aiment et me respectent ...

Mohamed Djamel

Sommaire

Dédicaces	
Remerciement	
Sommaire	
Liste des Figures	
Introduction	
Chapitre I : Généralités sur la réfrigération et la production du froid	
I. Introduction	15
II. Naissance de la réfrigération	15
III. Différentes méthodes de production du froid	15
III.1. Procédés thermodynamiques et thermoélectriques	16
III.1.1. Mélanges réfrigérants	16
III.1.2. Détente d'un gaz parfait	16
a- Détente avec production du travail extérieur	16
b- Détente sans production de travail extérieur	16
III.1.3. Évaporation d'un liquide pur	16
III.2. Machines frigorifiques	17
III.2.1. Machines à compression	18
a. Machines à changement de phase	18
b. Machines frigorifiques à gaz	19
III.3. Machines à cycle de Joule	20
III.3.1. Machine de Stirling	20
III.3.2. Machines à sorption	21
- Différents types de sorption	21
- Machine a absorption	21
- Absorption humide	22
- Absorption sèche	22
- Machine a absorption	22
III.4. Réfrigération thermoélectrique	23
- Applications thermoélectriques	24

-Avantage et inconvénients de la thermoélectricité	24
Chapitre II : La production du froid par thermoélectricité	
I.Introduction	26
II. Les effets associés à la thermoélectricité	27
II.1. L'effet Seebeck	27
II.2. L'effet Peltier	28
II.3. L'effet Thomson	30
III. Les coefficients thermoélectriques	30
III.1. Le coefficient Seebeck	30
III.2. Le coefficient Peltier	31
III.3 Le coefficient Thomson	32
III.4 Le facteur de mérite	33
IV. Le module thermoélectrique	34
IV.1. Les équations gouvernantes des modules thermoélectriques	34
IV.2. Le bilan thermique et le COP du module Peltier	36
- Le coefficient de performance COP	37
Chapitre III : Conception et réalisation du Mini-réfrigérateur par TEC	
I. Introduction	40
II. Conception de la machine	40
II.1. Le Test n°1 : Module Peltier sans ventilation forcée	40
II.2. Le Test n°2 : Refroidissement a air	41
II.3. Le test n°3 : Refroidissement par eau	43
III. Dissipation du froid	44
IV. Réalisation de la boîte de réfrigération	45
IV.1. Choix du matériau	45
IV.2. Choix de l'isolant	46
IV.3. Installation du bloc de réfrigération	48
IV.4. Montage final	51
Chapitre IV : Résultats et discussions	
I. Introduction	54
II. Description de la mise en marche du dispositif	54
II.1. Les instruments utilisés et les objectifs des mesures	54
II.1.1. Un thermomètre	54
II.1.2. Objectif des mesures	55
II.1.3. Les calculs à faire	56
III. Résultats et graphes correspondant	56
IV. Bilan énergétique	61
Conclusion générale	66

Liste des figures

Figures	Pages
Chapitre 1	
Figure 1.1 : principe d'une machine frigorifique	17
Figure 1.2 : Schéma d'une machine frigorifique à compression	19
Figure 1.3 : Cycle d'une machine à compression sur le diagramme (T, S)	19
Figure 1.4 : Schéma d'une machine frigorifique à gaz	20
Figure 1.5 : Schéma d'une machine frigorifique à absorption	21
Figure 1.6 : Schéma d'une machine frigorifique à adsorption	23
Figure 1.7 : Principe d'un module Peltier	23
Chapitre 2	
Figure 2.1 : Description de l'effet Seebeck	28
Figure 2.2 : Description de l'effet Peltier	29
Figure 2.3 : Schéma d'une cellule à effet Peltier	29
Figure 2.4 : Schéma de fonctionnement d'effet Thomson	30
Figure 2.5 : L'effet Peltier au niveau de la jonction entre deux conducteurs	31
Figure 2.6 : Description d'un module thermoélectrique	34
Chapitre 3	
Figure 3.1 : Le module Peltier 12706	40
Figure 3.2 : dissipateur de chaleur en aluminium pour CPU d'ordinateur a contact rond	41
Figure 3.3 : ailette avec ventilateur	42
Figure 3.4 : L'aillette en aluminium carré	42
Figure 3.5 : ventilateur centrifuge	43
Figure 3.6 : L'aillette carrée dans un bac a eau	44
Figure 3.7 : Schéma explicatif de la méthode utilisé	45
Figure 3.8 : module Peltier avec deux ailettes	45
Figure 3.9 : méthode de formage de la boîte en aluminium (extérieur de l'Inox)	46
Figure 3.10 : l'utilisation de la mousse expansive Akfix et ses résultats	47
Figure 3.11 : maquette avec isolation avec pvc	48

Figure 3.12 : échangeur de chaleur plat	49
Figure 3.13 : Bloc de réfrigération (avec double module Peltier)	49
Figure 3.14 : Boitier d'essai final	50
Figure 3.15 : Vue de dos de la machine	51
Figure 3.16 : Machine au complet avec bac d'eau	52

Chapitre 4

Figure 4.1 : Thermomètre TPM-10	55
Figure 4.2 : Thermocouple a sonde métallique	55

Chapitre I :
Généralités sur la réfrigération et la
production du froid

I. Introduction

De nos jours, la réfrigération fait partie de notre vie que ce soit pour conserver nos aliments ou nous rafraîchir, ceci est dû aux avancées technologiques qui offrent plusieurs méthodes de produire le froid, mais pour un bon système de production de froid il faut choisir la meilleure façon de le faire et surtout la plus rentable du point de vue économique et aussi environnementale. [1]

Dans cette première partie de cette étude, nous allons citer pour mémoire les différents processus physique et chimique susceptibles d'utilisation dans l'obtention du froid, de façon à mieux cerner les spécialités attachées à la thermoélectricité, sur laquelle a été centré le travail reporté ici.

II. Naissance de la réfrigération

Après avoir constaté que les aliments se conservaient mieux en hiver, l'Homme a longtemps cherché à reproduire les températures hivernales afin de préserver ses denrées même en été. C'est comme cela qu'au fil des siècles, les Hommes furent amenés à créer de la glace et du froid artificiel.

Il aura fallu attendre la découverte du microscope pour s'apercevoir que les températures inférieures à 10°C ne tuaient pas les microbes mais empêchaient leur développement. Ce fut alors évident que conserver les denrées alimentaires en utilisant du froid était beaucoup plus intéressant que d'utiliser des méthodes ancestrales comme le séchage, le fumage ou le salage ; et depuis, les méthodes de fabrication du froid non pas arrêter d'évoluer. [1]

III. Différentes méthodes de production du froid

La production de froid est équivalente à une absorption de chaleur, car refroidir un corps ne consiste pas à lui donner une quantité de froid mais à lui extraire une quantité de chaleur, et cette quantité enlever est ensuite rejetée dans le milieu ambiant (air ou eau).

Parmi les nombreux mécanismes endothermiques, diverses transformations peuvent être citées :

- Procédés thermodynamiques tels que la dissolution de corps solides dans un liquide (eau) ou dans un solide (glace) : la détente isenthalpique ou isentropique d'un gaz, l'évaporation d'une phase liquide par exemple dans un cycle à absorption ou à compression, la fusion ou sublimation d'une phase solide.
- Procédés électrique ou magnétiques tels que le refroidissement thermoélectrique par effet Peltier ou la désaimantation adiabatique. [2]

III.1. Procédés thermodynamiques

Nous avons plusieurs procédés que nous allons citer ci-dessous

III.1.1. Mélanges réfrigérants

La dissolution de certains solides ou liquides dans un solvant en absorbant une quantité de calories équivalente à sa chaleur latente de fusion. Par exemple le mélange de glace avec NaCl(chlorure de sodium) diminue la température de congélation de la solution jusqu' -20°C. [3]

III.1.2. Détente d'un gaz parfait

Dans ce cas, le froid est produit par l'abaissement des températures d'un gaz soumis à une détente avec/ou sans production de travail extérieur. [2]

a- Détente avec production du travail extérieur

Les gaz, en se détendant fournissent de l'énergie mécanique aux dépens de la chaleur qu'ils contiennent, et par ce procédé sa température diminue. Ce principe est appliqué dans les machines frigorifiques utilisées pour la liquéfaction des gaz difficilement liquéfiables tels que l'air ou ses composants.

b- Détente sans production de travail extérieur

La détente s'effectue à partir du travail interne pris sur l'énergie interne. Si un gaz parfait peut se détendre librement sans fournir de l'énergie mécanique, sa température ne varie pas, mais en pratique on peut observer une légère variation des températures intermoléculaires ; c'est l'effet de Joule-Thomson.

III.1.3. Évaporation d'un liquide pur

Il consiste dans le changement d'état d'un corps qui constitue une transformation endothermique, c'est en s'évaporant que le gaz va absorber la chaleur de la substance à refroidir, cette substance lui cède une certaine quantité de chaleur correspondante à la chaleur latente d'évaporation du liquide.

Le procédé de production du froid le plus fréquemment utilisé et basé sur ce principe est celui où le fluide employé n'entre pas en contact direct avec la substance à refroidir et dans lequel le gaz est totalement recyclé.

Ce procédé donne lieu à deux types de machines frigorifiques :

- Machines à compression mécanique.
- Machines à compression thermique.

III.2. Machines frigorifiques

Actuellement il existe plusieurs systèmes de production de froid, leur principe reste le même, il s'agit d'extraire une quantité de chaleur Q_1 d'une source utile a une température T_1 et injecter une quantité Q_2 a un autre niveau de température T_2 .

En peut définir aussi une machine frigorifique comme une machine qui permet de réaliser l'écoulement de chaleur inverse du sens naturel (la chaleur s'effectue toujours du corps froid au corps chaud) du milieu chaud vers le milieu froid, une perte d'énergie est obligatoire pour réaliser ce transfert inverse, on peut distinguer deux grandes catégories de machines :

- Machines à compression mécanique qui utilisent le travail comme énergie, elles fonctionnent entre deux sources de chaleur. À titre d'exemple les machines à changement de phase ou les machines à gaz.
- Machines à énergie thermique qui nécessitent un apport de chaleur comme énergie à un niveau de température T_3 . Ces machines fonctionnent généralement entre trois sources de chaleur (machines tri thermes). À titre d'exemple les machines à sorption. [5]

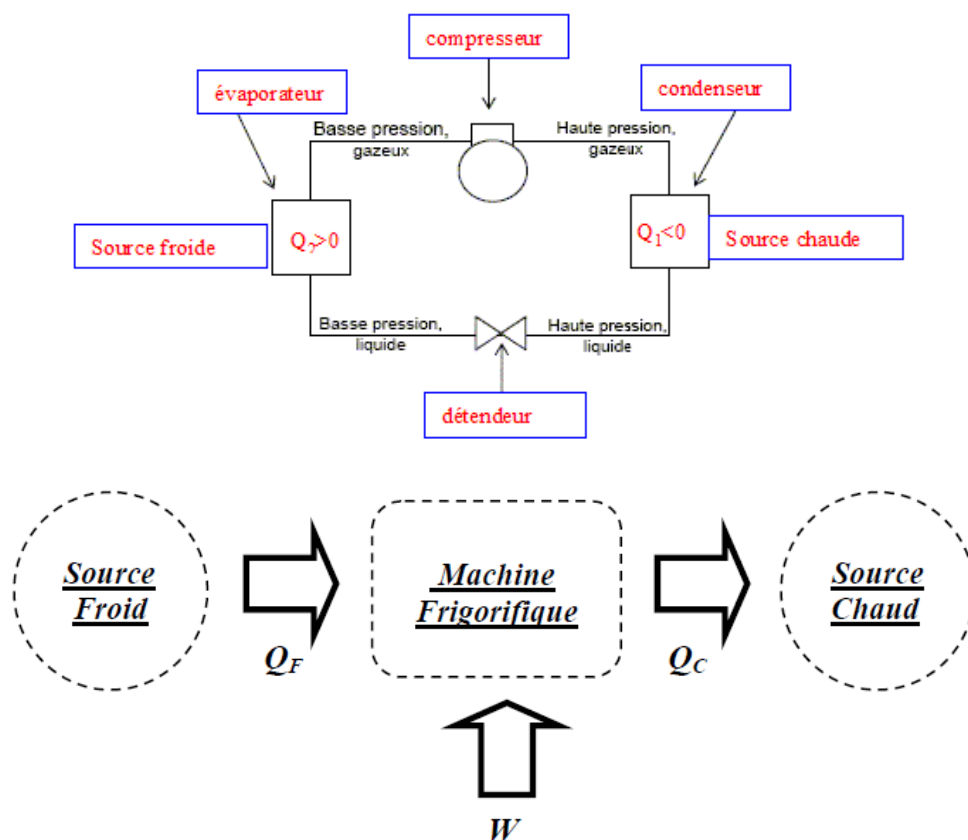


Figure 1.1: principe d'une machine frigorifique

III.2.1 Machines à compression

a. Machines à changement de phase

Ces machines sont les plus souvent rencontrées soit dans l'industrie soit dans les utilisations domestiques. Le schéma de principe de ce type de machines est représenté par la (figure 2). La transformation suivie par le fluide frigorigène est représentée sur le diagramme de Stodola (T, S) (figure 3). Son principe de fonctionnement peut être décrit comme suit :

En partant du point 1, le compresseur aspire de la vapeur provenant de l'évaporateur. La compression est supposée réversible, elle est accompagnée d'une augmentation de température jusqu'au domaine de surchauffe (point 2), où la pression est égale à la tension de vapeur saturante à la température ambiante. La vapeur comprimée est refoulée ensuite vers le condenseur (supposé parfait). Ainsi le fluide se liquéfie en cédant de la chaleur à l'ambiance (Trajet 2→3). Le condensât obtenu est détendu par la suite dans une vanne ou un capillaire. Cette opération est accompagnée d'un abaissement de température (trajet 3→4). Le mélange liquide-vapeur résultant est transféré vers l'évaporateur, où l'évaporation s'effectue en extrayant une quantité de chaleur de la source froide correspondante à la chaleur latente de vaporisation du fluide; c'est l'effet utile (trajet 4→1).

Cette description concerne le cas le plus simple, c'est-à-dire une machine ne comportant qu'un seul étage. Dans l'industrie, on utilise souvent des cycles plus compliqués résultant de l'amélioration des performances, tels que les cycles à compression étagée ou les cascades de machines. Cependant, ces machines manquent encore de rationalité dans l'utilisation, il reste toujours des progrès à réaliser dans leur dimensionnement.

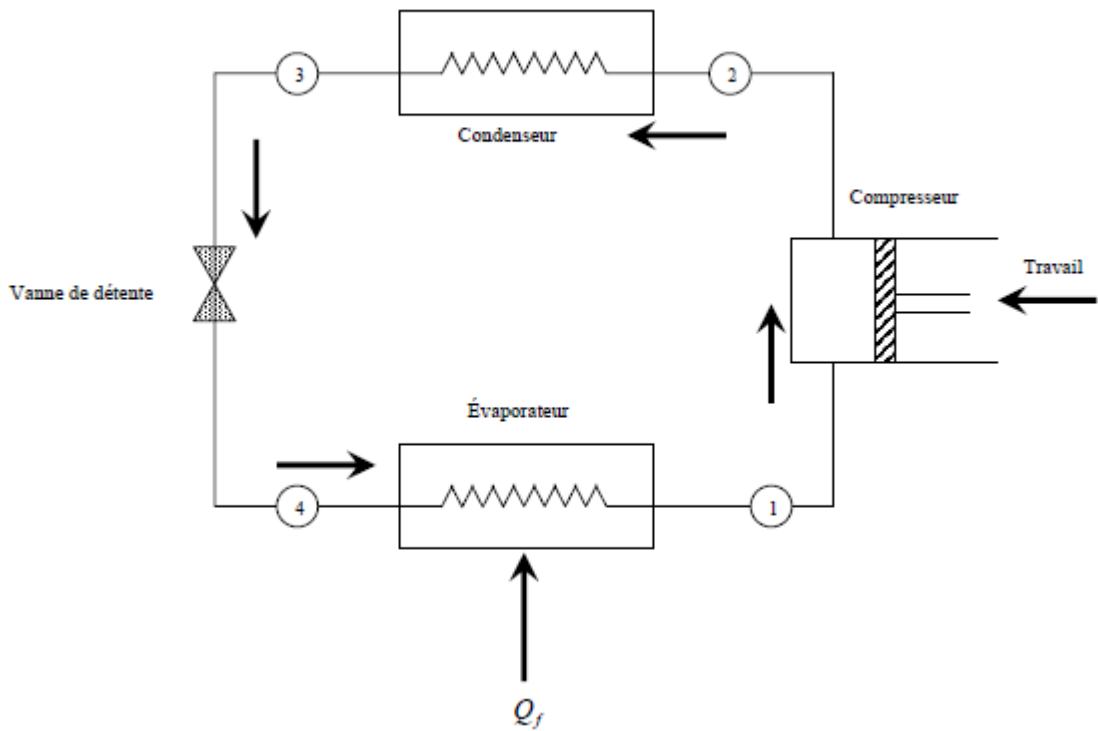


Figure 1.2 : Schéma d'une machine frigorifique à compression

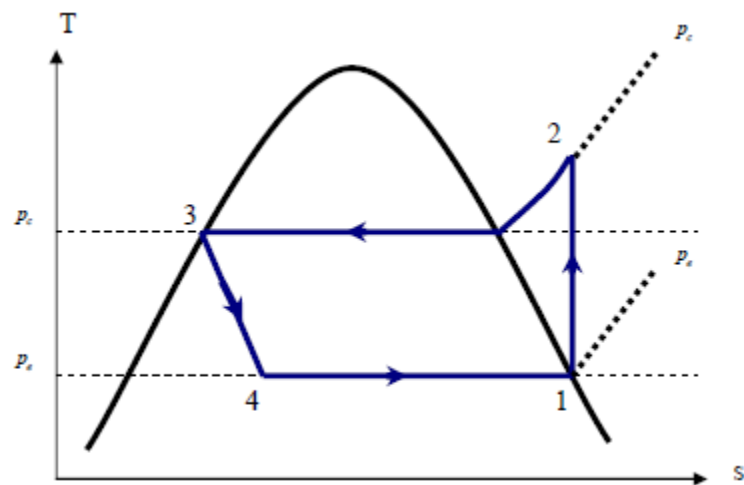


Figure 1.3 : Cycle d'une machine à compression sur le diagramme (T, S)

b. Machines frigorifiques à gaz

Dans ce type de machine, on produit du froid en utilisant la chaleur d'échauffement et de refroidissement générés par la compression et la détente d'un fluide frigorigène sans aucun changement d'état, elles utilisent un cycle inverse soit de Joule ou de Stirling. [6]

III.3. Machines à cycle de Joule

Dans le cas le plus simple, ces machines comportent un compresseur entraîné par un moteur, il est souvent couplé à une turbine où on récupère une partie d'énergie résultante de la détente du fluide. Cette énergie est considérée comme auxiliaire pour l'entraînement du compresseur.

Par rapport aux machines à compression de vapeur, le rendement est plus faible, mais l'inconvénient majeur de ces machines vient du fait que l'effet utile est produit à température variable. Donc, ces machines ne peuvent concurrencer les machines à vapeur condensable.

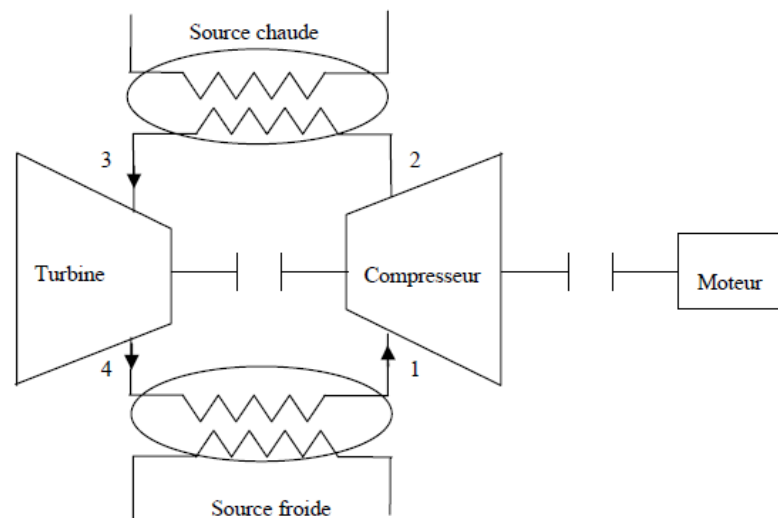


Figure 1.4 : Schéma d'une machine frigorifique à gaz

III.3.1. Machine de Stirling

Elle a pour but de réaliser un transfert de chaleur entre deux sources, froide et chaude, par le biais d'un travail mécanique qu'il faut lui fournir, elles sont caractérisées par un bon rendement qui permet d'atteindre une température de liquéfaction de l'air (-200°C) en un seul étage, mais elles ont un inconvénient qui est leur encombrement et leur cinématique compliquée, elles ne sont pas trop utilisées. Il existe quelques variantes de ces machines, les plus connues sont les machines PHILIPS utilisées dans la production d'azote ou d'air liquide.

On peut dire qu'actuellement, les machines à compression mécanique occupent une situation importante dans la plupart des applications, cependant elles souffrent de la nécessité d'une énergie motrice noble. [7]

III.3.2. Machines à sorption

- Différents types de sorption

Les machines frigorifiques à sorption utilisent des propriétés couplées d'un sorbant et d'un sorbat (fluide frigorigène), suivant la nature du sorbant qu'il soit liquide ou solide, les machines se présentent sous deux formes présentées ci-dessous :

-Machine à absorption :

Le principe des machines frigorifiques à absorption est un phénomène exothermique, basé sur les propriétés chimiques de certains liquides à absorber et à désorber une vapeur, il a été démontré par le français FERDINAND Carré (cycle Carré) à la fin du 19^{ème} siècle (1859).[8]

Les principaux composants pour produire le froid avec le cycle à absorption sont : - générateur (bouilleur), - un condenseur, - un évaporateur, - un absorbeur, - une pompe, comme on peut le distinguer dans la figure (5):

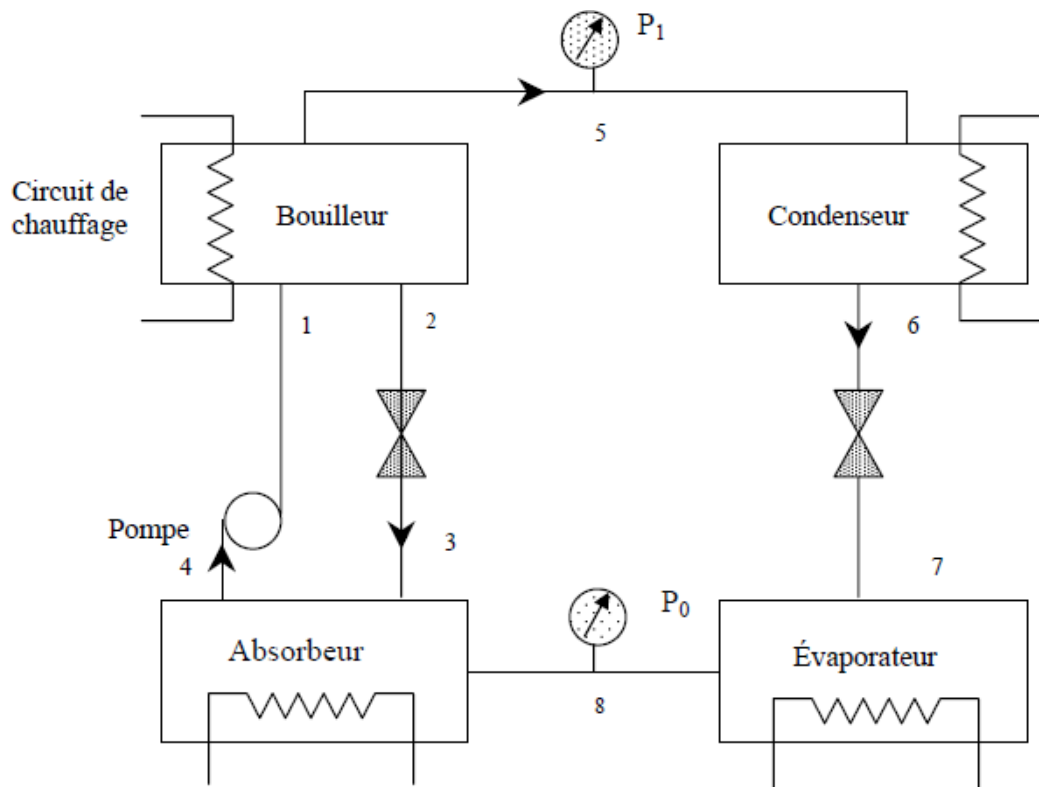


Figure 1.5 :Schéma d'une machine frigorifique à absorption

On peut distinguer deux modes d'absorption :

- Absorption humide :

Cette machine utilise les propriétés de dissolution d'un frigorigène gazeux dans un solvant liquide. La solution la plus couramment utilisée est le couple $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ (ammoniac/eau) qui est aussi la plus étudiée, la réaction mise en jeu entre le sorbant et le sorbat est de nature chimique, la solution retenue la plupart du temps dans ses machines aboutie à un cycle continu.[9]

-Absorption sèche :

Dans cette machine le sorbant utilisé n'est pas liquide mais solide, et la réaction reste toujours de nature chimique. Les couples d'absorbant/absorbé les plus utilisés en absorption sèche sont le $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ (eau/Bromure de lithium)et le $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$ (eau/Chlorure de lithium).). Les systèmes à absorption sèche connaissent de ce fait quelques utilisations en réfrigération, plus particulièrement en climatisation. Leur principal défaut provient d'une limitation de la température de la source utile (température d'évaporation). En effet, pour des températures d'évaporation inférieures à 0°C , il y a un risque d'obstruction des circuits de la machine par cristallisation du sorbat.[6]

-Machine à adsorption :

Ses machines sont apparues dans le début du 20^{ème} siècle,et reste encore peu étudié comparé aux deux types précédents qui utilisent le principe de l'absorption humide et sèche, leur principe de fonctionnement est basé sur l'effets thermique de la sorption ou la désorption physique d'un gaz sur un solide (le gaz est fixé sur la surface poreuse du solide), les couples les plus utilisés sont les zéolithes-eau, charbon actif-méthanol et charbon actif-ammoniac.

Son principe de fonctionnement est presque le même qu'une machine à absorption juste avec deux caractères différents : l'adsorbant est un solide poreux et le cycle peut être intermédiaire ou semi-continue. [6]

Dans une machine à adsorption, le compresseur de la machine à compression est remplacé par un adsorbant ou un réacteur (compresseur thermique) où se déroulent les réactions d'adsorption entre le fluide frigorigène et l'adsorbant. Le reste de la machine n'est pas trop modifié.Le schéma de principe d'une machine frigorifique à adsorption est représenté dans la figure (6).

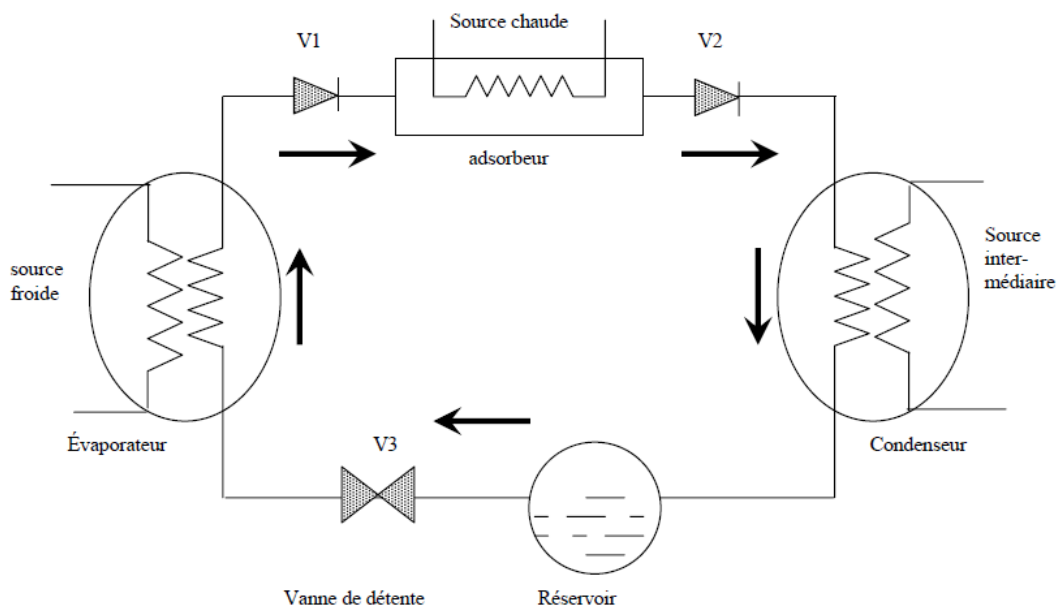


Figure 1.6 : Schéma d'une machine frigorifique à adsorption

III.4. Réfrigération thermoélectrique

Cette technique de refroidissement repose sur l'effet Peltier. Ce procédé consiste à faire passer un courant électrique dans des jonction conductrices (semiconducteur), en créant un phénomène thermique (effet de joule). Ce qui résulte un refroidissement d'un côté des jonctions tout en faisant chauffer l'autre cotés. C'est un moyen très simple à faible rendement, utilisé dans plusieurs domaines tels que les mini réfrigérateurs. [4]

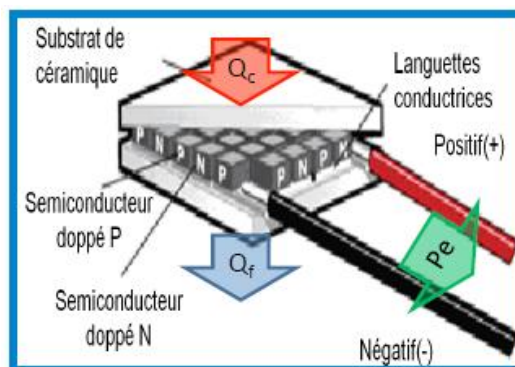


Figure 1.7 : Principe d'un module Peltier

- **Applications thermoélectriques**

- Secteur médical, utilisé dans les glacières pour transport d'organe, appareils d'analyse et biomédical
- Industrie automobile
- Refroidissement de puce et d'appareils informatique
- Refroidisseur, plaque froide, échangeur de chaleur, installations de refroidissement contrôlé comme les refroidisseurs de boissons. [10]

- **Avantage et inconvénients de la thermoélectricité**

-**Avantage :**

- Conversion directe de l'énergie, dispositif à l'état solide, sans partie mobile, pas de vibration (silencieux)
- Longue durée de vie et peu d'entretien (fiable)
- Compact, un fonctionnement indépendant de la position
- Simple installation
- Pas d'utilisation de gaz nocif
- Réversibilité (chaud et froid)
- Récupération de la chaleur perdue
- Temps de réaction rapide

-**Inconvénient :**

- Faibles performances
- Faible rendement
- Contrôle de température difficile

ChapitreII :
La production de froid par
thermoélectricité

I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons parler sur la thermoélectricité et ces modes d'utilisation que ce soit dans la production de courant (TEG) ou dans la production de froid (TEC) qui est le thème de ce mémoire.

Découverte au cours du XIX^{ème} siècle par le physicien français Jean-Charles-Athanase PELTIER qui a démontré que quand un courant parcourant deux métaux différents soudés ensemble génère pour l'un des métaux une élévation de température et pour l'autre une baisse de température et cela en dépendance du sens de circulation du courant.[12]

La première mention relative aux effets thermoélectriques est faite dans les rapports de l'Académie des sciences de Prusse en 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. En 1838, Lenz explique la nature de l'effet Peltier. 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 et 1911 Altenkirch 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's, 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 (tellure de bismuth) qui associé à Sb_2Te_3 (Tellure d'antimoine) présentent de performances thermoélectriques intéressantes.

Le développement des oxydes thermoélectriques est lié aux travaux de Terasaki en 1997, qui rapportent des propriétés remarquables dans le composé Na_xCoO_2 .

Les cobaltites à structure lamellaire désaccordée (découvertes au laboratoire CRISMAT) ont ensuite été étudiées du point de vue de leurs propriétés thermoélectriques. Notamment le composé $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ qui présente un pouvoir thermoélectrique de 125 $\mu\text{V/K}$ et une résistivité de type métallique à l'ambiante. [13]

II. Les effets associés à la thermoélectricité

Nous avons plusieurs effets thermoélectriques que nous allons citer et expliquer leur mode de fonctionnement.

II.1.L'effet Seebeck

Découvert par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck, en 1821, qui remarqua que l'aiguille d'une boussole est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de différente nature liés à leur extrémité par des jonctions dont elles n'ont pas la même température T .

Ce phénomène fut expliqué par l'apparition d'un champ magnétique, et crut même à fournir une explication de l'existence du champ magnétique terrestre. Ce n'est que plus tard que l'on comprit l'origine électrique du phénomène :

Soit 2 matériaux A et B de nature différente reliés entre eux par 2 jonctions de température T . Une des jonctions est portée à la température T_1 tel que $T_1 > T$. Une différence de tension apparaît alors entre les jonctions froide et chaude.

Considérons maintenant A et B comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p. L'effet Seebeck s'explique par la diffusion de porteur de charge, e^- (électrons) ou e^+ (trou) du côté chaud vers le côté froid. Pour un circuit ouvert les e^- (électrons) se massent dans la partie froide du matériau de type n alors que les e^+ (trou) se massent dans la partie froide du matériau de type p. La partie froide du semi-conducteur n sera donc polarisée négativement et celle du semi-conducteur p positivement. Nous sommes donc en présence d'une différence de charges qui a pour effet de créer une différence de potentiel entre les 2 extrémités froides de ces matériaux.

Son application la plus connue est la mesure de température (thermocouples), et sa deuxième application et qui semble pas très intéressantes, est celle du thermo-générateur. [14]

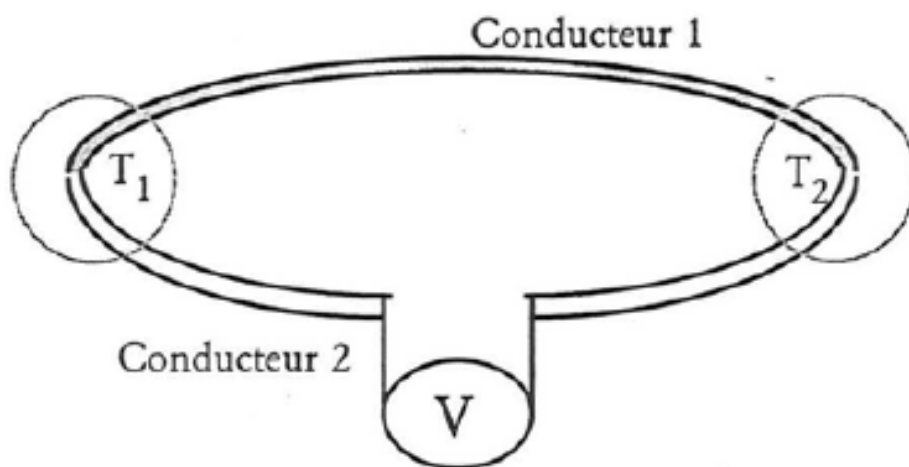


Figure 2.1 : Description de l'effet Seebeck

II.2. L'effet Peltier

Découvert par le physicien français Jean-Charles **Peltier** en 1834, qui un peu l'oppose de l'effet **Seebeck**, en imposant un courant électrique (une différence de potentiel) on constate l'apparition d'un flux de chaleur (une différence (ou gradient) de température).

Après avoir relié les extrémités d'un fil de bismuth à un accumulateur par l'intermédiaire de deux fils de cuivre, il a en effet constaté que l'une des jonctions cuivre/bismuth s'échauffait et que l'autre se refroidissait. Plus généralement, l'effet Peltier se manifeste lorsque l'on soumet deux types de conducteurs à une tension continue. Le sens du déplacement de la chaleur est fonction du sens de circulation du courant dans les conducteurs, ce qui assure la réversibilité du système.

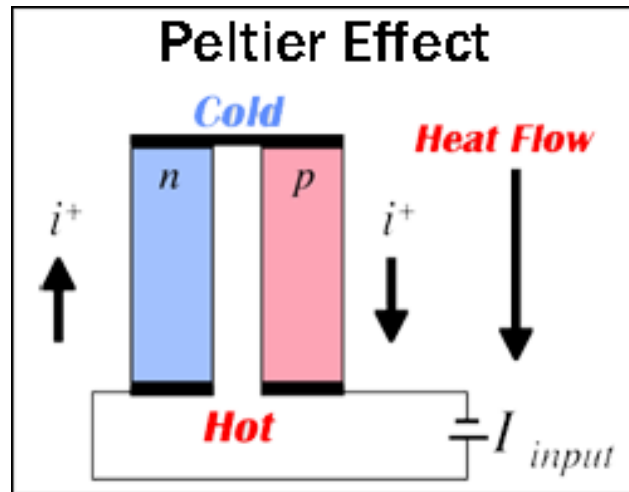


Figure 2.2 : Description de l'effet Peltier

L'effet Peltier est utilisé au cœur de modules ou cellules Peltier, un courant continu passe dans une succession de semi-conducteurs reliés entre eux, l'ensemble est pris en sandwich entre deux plaques d'un matériau conducteur de chaleur, l'une se charge positivement et s'échauffe, quant à l'autre se charge négativement et se refroidit.

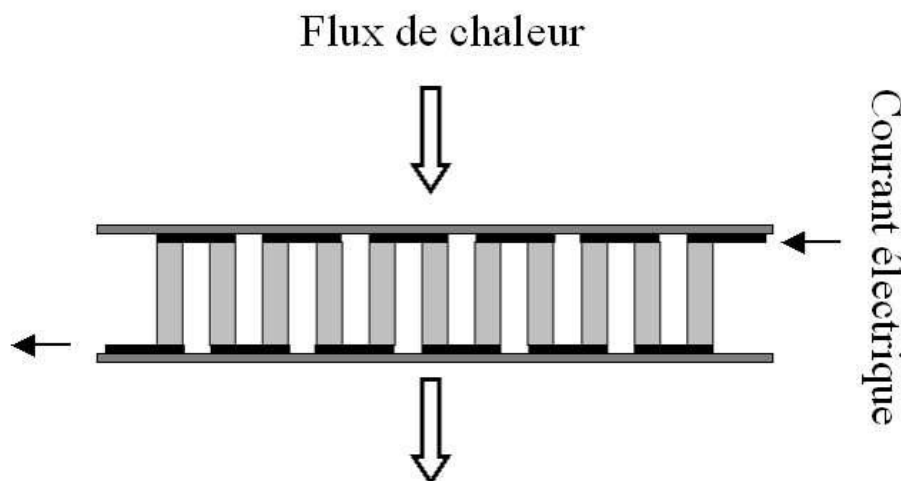


Figure 2.3 : Schéma d'une cellule à effet Peltier

L'application la plus courante de ses modules est dans la réfrigération comme dans les laboratoires et hôpitaux qui les utilisent pour le refroidissement d'analyse et transport d'organes, aussi dans les systèmes de refroidissement pour les processeurs informatiques et dans l'aéronautique et le domaine spatial exploite ce phénomène pour leur précision et fiabilité. [15]

II.3. L'effet Thomson

Découvert par le baron Kelvin William Thomson en 1851, il est très similaire à l'effet Peltier. La seule différence entre les deux réside dans le fait que l'effet Thomson existe pour un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction. Le matériau est soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique échange de la chaleur avec le milieu extérieur, ça signifie que lorsque le courant est fourni et qu'il y'a un gradient de température la chaleur est soit absorbée ou rejetée en fonction de la direction du courant fourni [16]

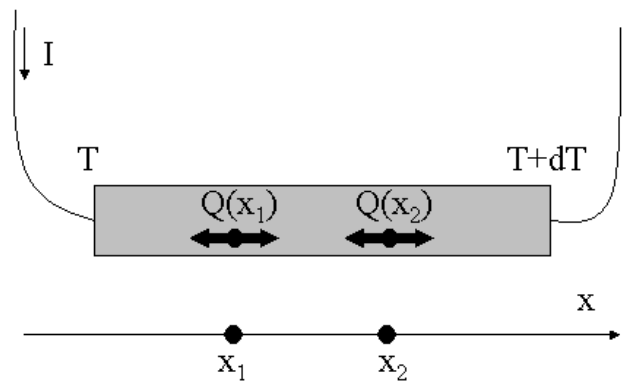


Figure 2.4 : Schéma de fonctionnement d'effet Thomson

III. Les coefficients thermoélectriques

Cette partie regroupe les différents coefficients qui se présentent dans l'étude des modules thermoélectriques.

III.1. Le coefficient Seebeck :

Le principe de la détermination du coefficient Seebeck repose sur la détermination d'une différence de température ΔT aux jonctions de deux matériaux a et b impliquant une différence de potentiel électrique ΔV selon la loi d'Ohm ($\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$) on obtient :

$$E = \varepsilon \cdot \vec{\nabla} T \quad (1)$$

Qui devient le long des files :

$$dv = -E \cdot dl = -\Delta T \cdot dl = -\alpha \cdot dT \quad (2)$$

La mesure de la différence de potentiel ΔV est effectuée avec un voltmètre classique qui n'intervient pas dans l'effet Seebeck car ces contacts avec le conducteur sont de la même température.

$$\Delta V = V_1 - V_2 = - \int_1^2 dV = \int_1^2 \varepsilon dT = \int_1^2 (\varepsilon_A - \varepsilon_B) dT \quad (3)$$

Si les deux pouvoirs thermoélectriques ε_A et ε_B des deux conducteurs A et B dépendent peu de la température elle-même, on obtient la relation suivante :

$$\Delta V = (\varepsilon_A - \varepsilon_B) \Delta T = \alpha \Delta T \quad (4)$$

Et de là on peut conclure le coefficient Seebeck :

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (5)$$

Avec α qui représente le coefficient Seebeck. [17]

III.2. Le coefficient Peltier

Cette fois-ci on fait passer un courant électrique I dans un circuit composé de deux matériaux qui va entraîner une libération d'une quantité de chaleur Q à une jonction et une absorption dans l'autre. [16]

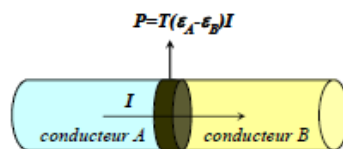


Figure 2.5 : L'effet Peltier au niveau de la jonction entre deux conducteurs

D'après la loi de Fourier on obtient : $\vec{q} = -\lambda_0 \vec{\nabla} T$; en situation isotherme dans une seule jonction $\vec{\nabla} T = 0$; pour obtenir :

$$\vec{q} = T \varepsilon \vec{j} \quad (6)$$

Pour les deux conducteurs on aura :

$$\vec{q}_A = T \varepsilon_A \vec{j} \quad (7)$$

$$\vec{q}_B = T \varepsilon_B \vec{j} \quad (8)$$

Le courant $I=j.S$ est le même dans les deux conducteurs, il en résulte donc que $\vec{q}_A \neq \vec{q}_B$ et donc la puissance thermique P qui traverse les jonctions n'est pas nul et dépend du sens du courant qui la traverse :

$$P = (q_A - q_B)S = T(\varepsilon_A - \varepsilon_B)I \quad (9)$$

Dans un module Peltier cet effet est augmenté en mettant en série N soudures :

$$P = NT(\varepsilon_A - \varepsilon_B)I \quad (10)$$

Et pour des raisons pratiques, on introduit le coefficient Peltier $\pi(T)$ dépendant de la température et caractérisant le type de jonction.

$$\pi(T) = NT(\varepsilon_A(T) + \varepsilon_B(T)) \quad (11)$$

Ce qui nous permet de calculer directement la puissance thermique absorbée (P_1) ou dégagée (P_2) au niveau des deux soudures :

$$P_1 = \pi(T_1)I \quad (12)$$

$$P_2 = -\pi(T_2)I \quad (13)$$

Le courant (I) circule de A vers B dans la soudure à T_1 et de B vers A dans la soudure à T_2 .
Et de là on conclut le coefficient Peltier :

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad (14)$$

III.3. Le coefficient Thomson

Le coefficient Thomson peut être défini directement pour un seul matériau, lorsque sont présents simultanément un gradient de température et un courant électrique, il y'a génération ou absorption de chaleur dans chaque segment de matériau pris individuellement.
[11] [16]

Le flux thermique au sein du matériau est donné par :

$$Q = \tau I \Delta T \quad (15)$$

Avec (τ) qui est le coefficient Thomson du matériau.

William Thomson a montré qu'il existe un lien entre l'effet Seebeck, Peltier et Thomson et à établi les relations suivantes entre α , π , τ :

$$\pi = \alpha T \quad (16)$$

$$\tau_A - \tau_B = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (17)$$

III.4. Le facteur de mérite

Le facteur de mérite ZT est un nombre adimensionnel utilisé pour définir la performance d'un dispositif thermoélectrique, il peut être calculé par l'équation suivante :

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho K} = \frac{\alpha^2 \sigma}{K} T \quad (18)$$

Où T est la température absolue en Kelvin, α est le coefficient Seebeck (V/K), ρ est la résistivité électrique (Ωm), K est la conductivité thermique (W/mK) et σ est la conductivité électrique (mK/W).

Pour obtenir un bon système thermoélectrique il faut avoir un facteur de mérite supérieur à 1, soit le coefficient Seebeck et la conductivité électrique doivent être élevées tandis que la conductivité thermique doit être faible. Les valeurs de ces paramètres sont les points déterminants dans la performance du système. Les meilleurs matériaux actuels présentent des ZT légèrement supérieur à 1, les rendements de conversion des modules thermoélectrique se limitent à des valeurs de 7 à 15%. Pour récapituler, l'électricité passant dans le module sert à réfrigérer ou la chaleur traversante est convertie en électricité. [19]

IV. Le module thermoélectrique

Un module thermoélectrique est un dispositif électrique qui permet d'obtenir une différence de température entre deux points. Il est composé d'un semi-conducteur de type P et d'un autre de type N et du cuivre pour connecter les semi-conducteurs et consiste en un certain nombre de jonction selon l'application. Le semi-conducteur le plus utilisé est le Tellurure de bismuth et maintenu entre deux plaques de céramique qui assurent l'isolation thermique. Selon le module soit il est refroidisseur thermoélectrique s'il reçoit du courant ou

un générateur électrique s'il reçoit une chaleur. Dans un refroidisseur thermoélectrique lorsqu'un courant passe dans le semi-conducteur de type N la chaleur est absorbée et transportée vers l'autre semi-conducteur de type P qui se fera rejeter, et quand on inverse le sens du courant on observera un effet inverse et le module donnera un effet de chauffage.[18]

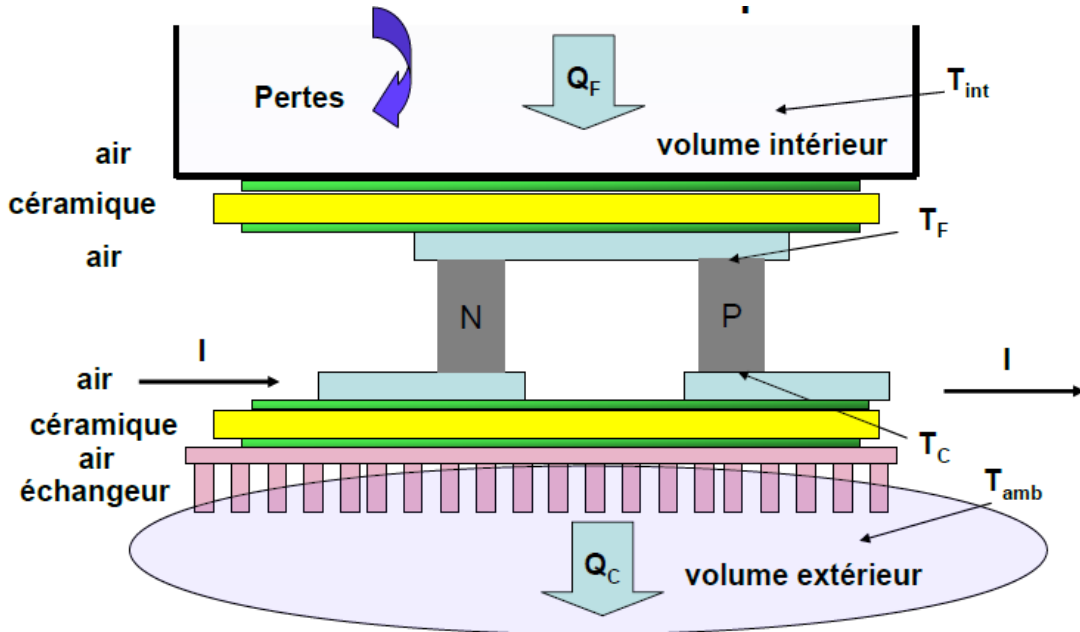


Figure 2.6 : Description d'un module thermoélectrique

IV.1. Les équations gouvernantes des modules thermoélectriques

Considérant un module thermoélectrique non uniformément chauffé pour des propriétés isentropiques, l'équation de continuité est donnée par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (19)$$

Avec $\vec{\nabla}$ est l'opérateur différentiel par rapport à la longueur et \vec{j} est la densité du courant.

Le champ électrique \vec{E} est affecté par \vec{j} et le gradient de température $\vec{\nabla}T$, les coefficients ont des contributions avec la loi d'Ohm et de l'effet Seebeck :

$$\vec{E} = \vec{j}\rho + \alpha\vec{\nabla}T \quad (20)$$

Le flux de chaleur est donné :

$$\vec{q} = \alpha T \vec{j} - k\alpha\vec{\nabla}T \quad (21)$$

L'équation général de diffusion de chaleur est exprimée par :

$$-\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (22)$$

\dot{q} : est la chaleur générée par unité de volume, ρ est la masse volumique, c_p est la chaleur spécifique et $\frac{\partial T}{\partial t}$ est le rapport de température par rapport au temps.

En remplaçant dans l'équation (21) en aura :

$$-\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \dot{q} = 0 \quad (23)$$

Où (\dot{q}) est définie par :

$$\dot{q} = \vec{E} \cdot \vec{j} = J^2 \rho + \vec{j} \cdot \alpha \vec{\nabla} T \quad (24)$$

En introduisant l'équation (21) et (24) dans l'équation (23) on aura :

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + J^2 \rho - T \frac{d\alpha}{dT} \vec{j} \cdot \vec{\nabla} T = 0 \quad (25)$$

Avec $\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T)$ est la conductivité thermique, $J^2 \rho$ est l'effet de Joule et $T \frac{d\alpha}{dT}$ est le coefficient Thomson qu'on pourra négliger.

IV.2. Le bilan thermique et le COP du module Peltier

Le bilan thermique à l'état stable à T_f est :

$$\dot{Q}_f = q_P + q_N \quad (26)$$

Où (q_P) et (q_N) sont les flux de chaleur pour les semi-conducteurs. Les flux thermiques peuvent être définis par :

$$q_P = \alpha_P T_F I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{k_p A_p}{L_p} (T_F - T_C) \quad (27)$$

$$q_N = -\alpha_N T_F I - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho_N L_N}{A_N} + \frac{k_N A_N}{L_N} (T_F - T_C) \quad (28)$$

Avec A est la section du semi-conducteur, L est l'épaisseur du semi-conducteur, et à partir de l'équation (26) on obtient :

$$\dot{Q}_f = (\alpha_P - \alpha_N) T_F I - \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\rho_P L_P}{A_P} + \frac{\rho_N L_N}{A_N} \right) + \left(\frac{k_P A_P}{L_P} + \frac{k_N A_N}{L_N} \right) (T_F - T_C) \quad (29)$$

Et pour le coté chaud en aura :

$$\dot{Q}_c = (\alpha_P - \alpha_N) T_C I + \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\rho_P L_P}{A_P} + \frac{\rho_N L_N}{A_N} \right) + \left(\frac{k_P A_P}{L_P} + \frac{k_N A_N}{L_N} \right) (T_F - T_C) \quad (30)$$

De plus, on pourra additionnées les propriétés du matériau en utilisant les équations suivantes :

$$\alpha = \alpha_P - \alpha_N \quad (31)$$

$$R = \frac{\rho_P L_P}{A_P} + \frac{\rho_N L_N}{A_N} \quad (32)$$

$$K = \frac{k_P A_P}{L_P} + \frac{k_N A_N}{L_N} \quad (33)$$

Avec α le coefficient Seebeck, R résistance thermique et K la conductance thermique :

$$\dot{Q}_f = n[\alpha T_F I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_F - T_C)] \quad (34)$$

$$\dot{Q}_c = n[\alpha T_C I + \frac{1}{2} I^2 R + K(T_F - T_C)] \quad (35)$$

En appliquant la première loi de la thermodynamique à travers le thermocouple, le travail est défini par :

$$\dot{W} = \dot{Q}_c - \dot{Q}_f \quad (36)$$

En introduisant les équations de la quantité de chaleur en aura :

$$\dot{W} = \alpha I (T_C - T_F) + I^2 R \quad (37)$$

Et le voltage devient :

$$V = \alpha (T_C - T_F) + IR \quad (38)$$

- Le coefficient de performance COP

Le COP est similaire à l'efficacité thermique mais sa valeur peut être supérieur à 1 et est défini comme le rapport de la puissance de refroidissement au travail fourni et est défini par :

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (39)$$

Pour calculer le coefficient de performance COP de la machine c'est la même que le COP du Peltier juste en change la quantité de chaleur utiliser pour le box en utilisant l'équation suivante :

$$COP = \frac{\dot{Q}_T}{\dot{W}_e} \quad (40)$$

D'où \dot{Q}_T est la quantité de chaleur total d'un espace réfrigéré et peut être définit avec les équations suivantes :

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{pl} \quad (41)$$

Avec \dot{Q}_c c'est la quantité de chaleur intérieure dans le box de réfrigération, on le détermine avec l'équation suivante :

$$\dot{Q}_c = A \cdot U \cdot (T_{amb} - T_{int}) \quad (42)$$

Avec A est la superficie de la boite, U coefficient de transfert de chaleur qui sera définit par l'équation suivante :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (43)$$

D'où k est la conductivité thermique de l'ailette, L est l'épaisseur, h_{int} coefficient de transfert de chaleur intérieure et h_{ext} le coefficient de transfert de chaleur extérieure.

Pour le \dot{Q}_{pl} est la quantité de chaleur du produit dans le réfrigérateur est définit pas l'équation suivante :

$$\dot{Q}_{pl} = m \cdot C_p (T_{pi} - T_{pf}) / \Delta t \quad (44)$$

Avec (m) qui est la masse du produit a refroidir, C_p est la chaleur spécifique du produit, T_{pi} et T_{pf} sont les températures initial et final du produit et Δt est l'intervalle de temps entre T_{pi} et T_{pf} .

Chapitre III :
***Conception et réalisation du Mini-
réfrigérateur par TEC***

I. Introduction

Depuis toujours, l'Homme essaye de trouver des solutions de refroidissement qu'il soit propre économique et préserve la nature, les meilleurs systèmes sont à compression mais toujours en utilisant les fluides frigorigènes qui ne sont pas propre. Avec la découverte des modules thermoélectriques, les applications demeurent claires dans le domaine de la réfrigération. Un module Peltier dégage de la chaleur en créant le froid, les scientifiques ont testés plusieurs méthodes, et c'est de là qu'on a essayé de faire notre réalisation que je décrirai dans ce chapitre. Dans un souci de perfectionner cette initiative, nous avons optez a plusieurs essaie jusqu'à en arriver à trouver la bonne configuration à notre machine.

II. Conception de la machine

Au début nous avons commencé à chercher la manière de réaliser le prototype. Nous avons essayé une forme de la coque (une boîte) qui devrait être bien calorifugé sans trop penser aux matériaux constituant cette boîte.

II.1. Le Test n°1 : Module Peltier sans ventilation forcée

Au début, nous avons commencé par tester des Peltier sans aucune boîte on a pris un Peltier comme sur la figure (1) un TEC 12706, ou les 127 est le nombre de jonction et 06 est son ampérage.

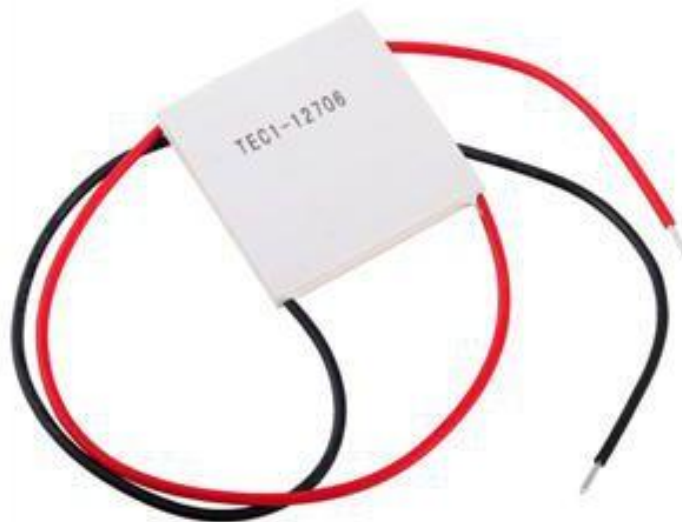


Figure 3.1 : Le module Peltier 12706

Après l'avoir branché à un courant électrique obtenu d'une alimentation d'un PC, nous avons remarqué que ça chauffait plus que ça refroidissait et comme on devait évacuer la chaleur générée pour avoir le maximum de froid, on a alors utilisé un dissipateur de chaleur en aluminium d'un CPU d'un ordinateur comme celui présenté sur la figure (2) avec de la pâte thermique pour un meilleur contact.

Une première phase tournée sans ventilation, nous avons obtenu l'effet désiré mais sans trop se réjouir du phénomène vu que ça ne restait pas longtemps. En effet, le module chauffait rapidement et à commencer à influencer sur le côté froid. À l'aide d'un thermocouple, nous avons pu mesurer la température. Une goutte d'eau a été posée au-dessus du module dessus pour voir combien de temps prend pour qu'elle gèle mais on a pu conclure qu'une ailette seule ne faisait jamais le travail seule et qu'il a fallu changer de méthode.

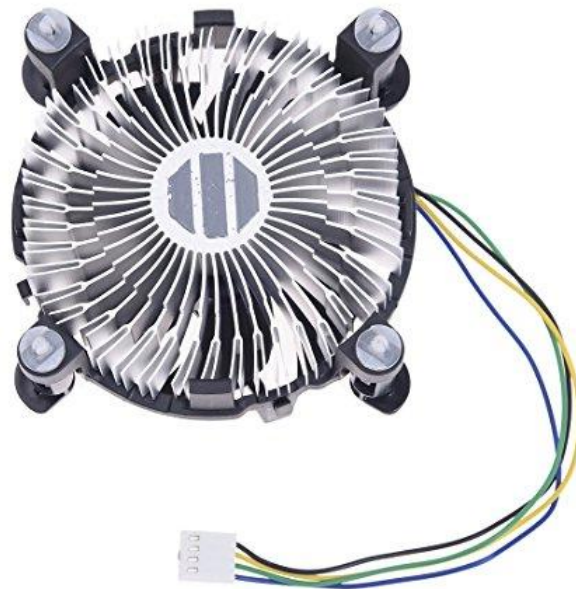


Figure 3.2 : dissipateur de chaleur en aluminium pour CPU d'ordinateur à contact rond

II.2. Le Test n°2 : Refroidissement à air

Dans cette étape, nous avons décidé d'ajouter un ventilateur comme on peut le voir sur la figure (3), ceci est employé pour évacuer la chaleur produite.

Le test montre que c'était une bonne idée d'ajouter des radiateurs, mais on revient rapidement au point de départ c'était insuffisant pour le refroidir et que c'était un problème de contact étant que l'ailette ronde et le module de TEC était carré au milieu, le résultat pouvait s'améliorer avec une ailette rectangulaire.



Figure 3.3 : ailette avec ventilateur

Après le changement de l'ailette par une carré comme sur la figure (4) nous avons constaté que le résultat obtenu était bien en arrivant à faire geler de l'eau après 10s de marche mais ne tenez pas longtemps des que le ΔT entre le coté froid et chaud augmenté il perdez toute ses performance, ce qui montré que le refroidissement par air était pas suffisant et que l'ailette était petit et chauffer rapidement, mais comme en veut un truc petit et optimal en va jouer sur le système de refroidissement et non changer l'ailette.

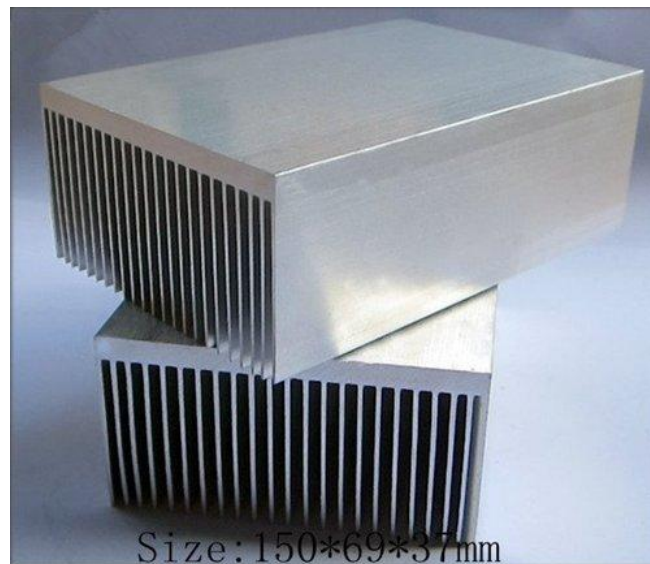


Figure 3.4 : L'ailette en aluminium carré

Après avoir trouvé que le problème réside dans le ventilateur qui n'était pas puissant on a opté pour un ventilateur centrifuge qui est connue par sa puissance comme sur la figure (5).



Figure 3.5 : ventilateur centrifuge

Et encore une fois, ça ne donner pas les résultats rechercher on a conclu qu'avec le refroidissement a l'air on aura jamais ce qu'on voudrait sauf si on met une grande ailette, chose qui ne pouvait pas être pratique. Donc il nous reste à essayer le refroidissement a l'eau.

II.2. Le test n°3 ; Refroidissement par eau

Dans ce mode de refroidissement nous avons gardez les mêmes ailettes, notre premier essaie était de plongé l'ailette dans un bac d'eau comme sur la figure (6).

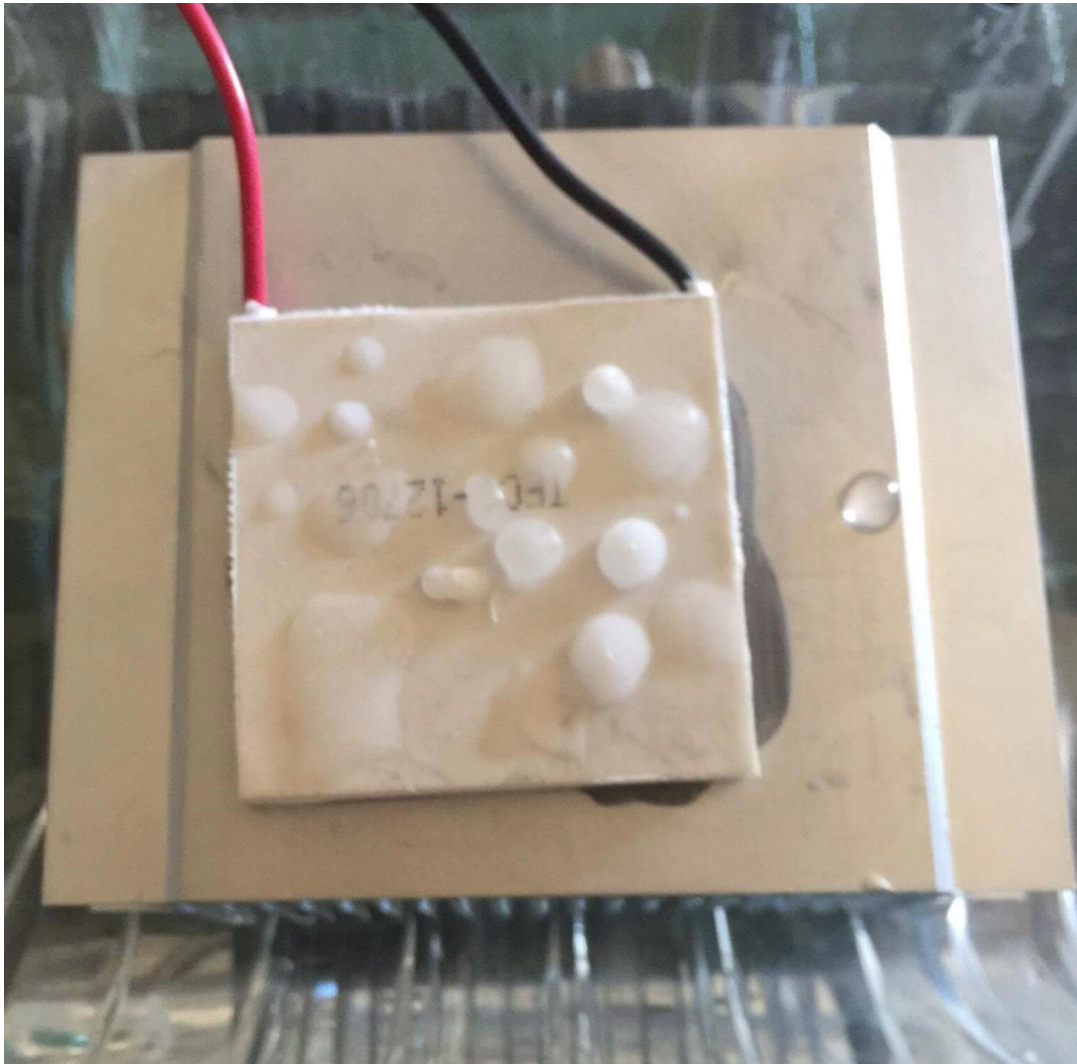


Figure 3.6 : L'ailette carrée dans un bac a eau

Cette technique était meilleure que le refroidissement a air mais elle a aussi ces propres défauts. L'eau fini par chauffer et devais être refroidi à son tour. Il nous reste plus qu'à l'essayer et trouver comment l'améliorer et installer le tout.

Après avoir trouvé le mode d'utilisation et de refroidissement, il nous reste à essayer la dissipation du froid à partir du module Peltier.

III. Dissipation du froid

Au début, nous avons fait des essaies directement sur la plaque de céramique, comme nous avons trouvé comment obtenir le maximum de froid. Maintenant, nous devons trouver le moyen de transféré cette quantité de chaleur a l'objet que nous devons refroidir.

Nous savons que la surface de l'ailette doit être de la même surface ou plus grande que celle du module Peltier, on a placé une ailette identique à celle qui nous permet de refroidir le coté chaud. Tout est configuré comme le montre la figure (7) :

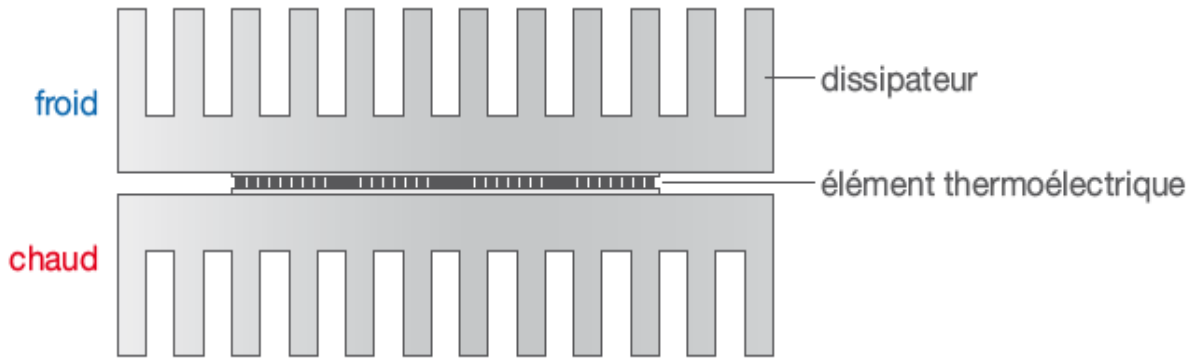


Figure 3.7 : Schéma explicatif de la méthode utilisé

Une fois trouver notre combinaison qu'on croyez final, nous avons remarqué que le dissipateur absorbé presque tout le froid produit, et comme on a eu le même problème dans le coté chaud,il ne fallait pas donc agrandir mais plutôt réduire l'ailette du coté froid comme le montre la figure (8), et c'est là qu'on à trouver notre bloque de refroidissement final, Il reste cependant son exploitation dans notre boite de réfrigération.



Figure 3.8 : module Peltier avec deux ailettes

IV. Réalisation de la boite de réfrigération

Pour le boîtier, comme nous devons faire un réfrigérateur on a pris le model le plus connu un rectangle, on a fait en sorte quel soit ni trop petite ni trop grande. On a trouvé la taille idéale (23 x 17 x 28 cm), mais il nous reste quel matériau choisir qui correspond à ce que nous voulons faire.

IV.1.Choix du matériau

Comme notre boîtier devait être solide, alimentaire et anticorrosif, nous avons choisi de le faire en *Inox*, comme le montre la figure (9).

Voici quelques figure lors de la découpe de l'inox pour modeler la boite, mais comme l'inox est un très bon conducteur il faudrait bien l'isoler et là ou on va parler du choix de l'isolant et comment on a procédé.



Figure 3.9 : méthode de formage de la boite en aluminium (extérieur de l'Inox)

IV.2.Choix de l'isolant

Pour l'isolation nous avons commencé par le polystyrène, qui est un thermoplastique dur bon marché, et c'est un polymère vinylique, structurellement, c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone. Il est trop utilisé dans notre vie quotidienne comme le coffrage d'ordinateur, l'emballage et l'isolation [19].

Cependant, il est difficile à découper nette, plutôt par manque de moyen, il était bien mais pas comme nous le voulons, il présentait aussi des pertes thermiques et pas de solidité mais en a garder la boîte pour les essais de notre bloque de refroidissement car il était facile à modifier mais il nous fallait trouver une solution pour notre isolation.

On a trouvé la mousse expansive, qui est une mousse polyuréthane présente sous la forme d'une bombe à pulvériser, le produit se présente sous forme liquide qui se transforme en mousse on sortant de la bombe, qui va se solidifier grâce à une réaction chimique due au contact avec l'air. Elle est connue pour son isolation thermique élevée, sa légèreté et son adaptation à n'importe quelle forme [20]

Nous avons utilisé la marque Akfix 805, on avait créé un gabarit en bois pour avoir une bonne épaisseur dans notre boîte en inox et avoir la forme sinon elle va gonfler en boule, nous avons tout fait juste oublier un détail quel va chercher le chemin le plus facile pour sortir et c'était notre surprise quand elle a séché on a trouvé qu'elle est sortie par le haut sans adhérer au parois et pas l'effet désiré comme le montre les photos sur la figure (10) :



Figure 3.10 : l'utilisation de la mousse expansive Akfix et ses résultats

Après l'échec de la mousse expansive, on est revenu au fondamental et utiliser une lame d'air pour l'isolation, on a créé un châssis en métal et coller dedans des plaques en PVC alvéolaire comme le montre la figure (11), on a mis deux plaques pour laisser une lame d'air pour l'isolation et coller le tout avec du silicone pour une bonne isolation sans trop de pertes, et comme on le sais c'est le même résultat toujours des pertes thermiques et faut encore trouver une meilleure isolation.



Figure 3.11 : maquette avec isolation avec pvc

Après plusieurs échecs, nous devons trouver un isolant qu'il doit être facile à modeler et surtout qu'on pourrais coller pour ne pas avoir de perte thermique, et c'est là qu'on trouve le panneau sandwich, qui est sous forme de panneau plat composé d'un isolant dure situer deux plaque de PVC, l'isolant est soit du polycarbonate, monolithiques composés ou alvéolaires. Nous l'avons découpé à la forme de notre boîte d'inox et nous avons fait en sorte qu'il n'aura pas trop de pièce pour éviter d'avoir coller plusieurs segments. Nous avons pu avoir deux parties. Et c'était notre boîte finale, il nous rester plus qu'à placer le bloc réfrigérant.

IV.3. Installation du bloc de réfrigération

Etant choisi un refroidissement a eau avec des ailette et sachant aussi quel'air frais est plus lourd que le chaud donc il faut placer le module en haut, c'est là qu'on revient à la réalité comment mettre l'ailette dans un bac a eau a l'inverse comment faire tenir l'eau a l'inverse. On a essayé de fermer les ailettes mais c'était impossible de les rendre hermétique, nous nous sommes par la suite pencher vers les échangeurs de chaleur comme le montre la figure (12)



Figure 3.12 : échangeur de chaleur plat

Après avoir placé notre bloc de refroidissement dans notre boîte de teste, qui se compose de l'échangeur et une ailette pour diffuser le froid, et après des mesures de température à l'intérieur on a trouvé que ce n'était pas aussi puissant qu'on le voulait et n'atteignez pas la température de réfrigération.

Comme l'échangeur avais deux cotéon s'est dit autant placer deux Peltier avec ailette de chaque côté comme le montre la figure (13) :



Figure 3.13 : Bloc de réfrigération (avec double module Peltier)

La mesure de température n'était toujours pas satisfaisante pour la réfrigération, comme c'était une ventilation forcée à l'intérieur grâce à deux ventilateurs placer sur chaque ailette on sait dit peut-être c'était l'air qui la réchauffer et ne la laisser pas trop refroidir en à essayer sans ventilation, et c'était toujours le même problème.

Par la suite, nous avons commencé à chercher comment faire pour augmenter leur puissance étant qu'on ne peut pas la contrôler dans un Peltier, nous avons ainsi essayer de faire des Peltier en cascade, et on a placer deux Peltier de chaque côté.

Au début, c'était un peu difficile de trouver comment les connecter mais on a réussi à trouver la bonne combinaison. Après l'avoir essayé sur notre boîte teste et mesurer les températures on a eu de bonne température de réfrigération comme le montre la figure (14), on a essayé avec une convection forcée et libre, mais avec la convection forcée on arriver pas à baisser la température rapidement car il ne laisser pas les Peltier refroidir les ailettes bien comme il faut, et avec la convection libre le froid se disperser rapidement et atteignez plus rapidement la température désirer.



Figure 3.14 :Boitier d'essai final

Etant avoir trouvé le mode de fonctionnement idéal, il ne nous reste plus qu'à le mettre dans la boîte finale.

IV.4. Montage final

Pour notre montage final étant qu'on avait notre boîte et notre bloc de refroidissement, il ne nous reste plus qu'à tout connecter ensemble et procéder au test et mesure de température.

Après avoir mis l'isolant dans la boîte en inox, on a laissé un espace en haut pour faire passer les tuyaux d'eau qui serviront au refroidissement du côté chaud et qui sont reliés à un échangeur Multi passe (radiateur de moto) muni de ventilateurs pour forcer son refroidissement. Une pompe immergée dans un bac à eau assure la circulation du circuit de l'eau de refroidissement. Une installation électrique assurant l'alimentation des organes de ce refroidisseur de boisson a été placée au-dessus de cette boîte comme on va le montrer dans les figures suivantes :



Figure 3.15 : Vue de dos de la machine

Dans la figure 16, on peut voir la machine en marche connecter avec son bac a eau etles thermocouples pour relever les températures qu'on va voir et discuter dans le prochain chapitre.



Figure 3.16 : Machine au complet avec bac d'eau



Chapitre IV :
Résultats et discussions

I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons parler sur les essais effectués sur notre machine et montrer comment nous avons procédé et quels instruments nous avons utilisés et discuter les résultats obtenus.

II. Description de la mise en marche du dispositif

Pour la mise en marche du dispositif, nous avons procédé par brancher la machine en prenant les températures des différents éléments qu'on va montrer dans les tableaux et les graphes et expliquer les résultats dans ce qui suit, un chronomètre nous a été utile pour la mesure de l'évolution de la température à travers le temps.

II.1. Les instruments utilisés et les objectifs des mesures

II.1.1 Un thermomètre

C'est un dispositif qui sert à mesurer et afficher la valeur de la température, il est utilisé dans différents domaines comme la météorologie, médecine l'industrie. Et il est présent sous plusieurs types : un thermomètre à gaz, à cadran et aiguille, à cristaux liquides, liquides (mercure ou alcool) et le thermomètre électronique comme qu'on a utilisé on va donner ses descriptions

- Thermomètre de type TPM-10 : c'est un thermomètre rectangulaire à lecture à distance en plastique avec un affichage LCD et une sonde en plastique qui fonctionne sous le principe d'un thermocouple, qui fonctionne sous l'effet Seebeck avec le changement du courant créé entre les deux matériaux grâce à un programme en température, ces capteurs possèdent une incertitude de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, la température de fonctionnement est de $-50^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ qui est parfait pour nos tests, voir la figure (1) :



Figure 4.1 : Thermomètre TPM-10

-Thermocouple à sonde métallique : c'est le même que le précédent la seule différence est qu'il a une sonde métallique qui nous a aider à connaitre la température des ailettes comme en peut le voir sur la figure (2) :



Figure 4.2 : Thermocouple a sonde métallique

II.1.2. Objectif des mesures

Les mesures que nous allons effectuer vont nous servir à la bonne détermination des performances de notre machine qu'on se propose d'étudier. Tout au long on pourra voir les anomalies et comprendre comment il fonctionne un Peltier et essayer de l'améliorer par la suite et surtout pour calculer les quantités de chaleur et puissance échangés.

II.1.3. Les calculs à faire

Pour les calculs nous devons connaitre les quantités de chaleur fournie par le module des deux côtés chaud et froid en utilisant ces lois déjà cités et les données relevées expérimentalement :

$$\dot{Q}_f = n[\alpha T_F I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_F - T_C)]$$

$$\dot{Q}_c = n[\alpha T_C I + \frac{1}{2} I^2 R + K(T_F - T_C)]$$

Le travail fourni de chaque élément à l'aide des calculs fait avec les lois précédentes en obtiendra :

$$\dot{W} = \dot{Q}_c - \dot{Q}_f$$

Et pour finir, il faudra calculer le coefficient de performance de la machine à l'aide de l'équation suivante :

$$COP = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}}$$

III. Résultats et graphes correspondant

Nous allons présenter les résultats relevés sur notre dispositif sur des tableaux et des graphes tout en expliquant chaque résultat :

Tableau 01: Dans ce tableau nous allons montrer l'évolutions des températures de l'air ambiant, l'air du ventilateur extrait du radiateur de refroidissement d'eau des Peltier, de l'intérieur de la boîte, aux parois des ailette et de la sortir d'eau chaude du Peltier à travers le temps :

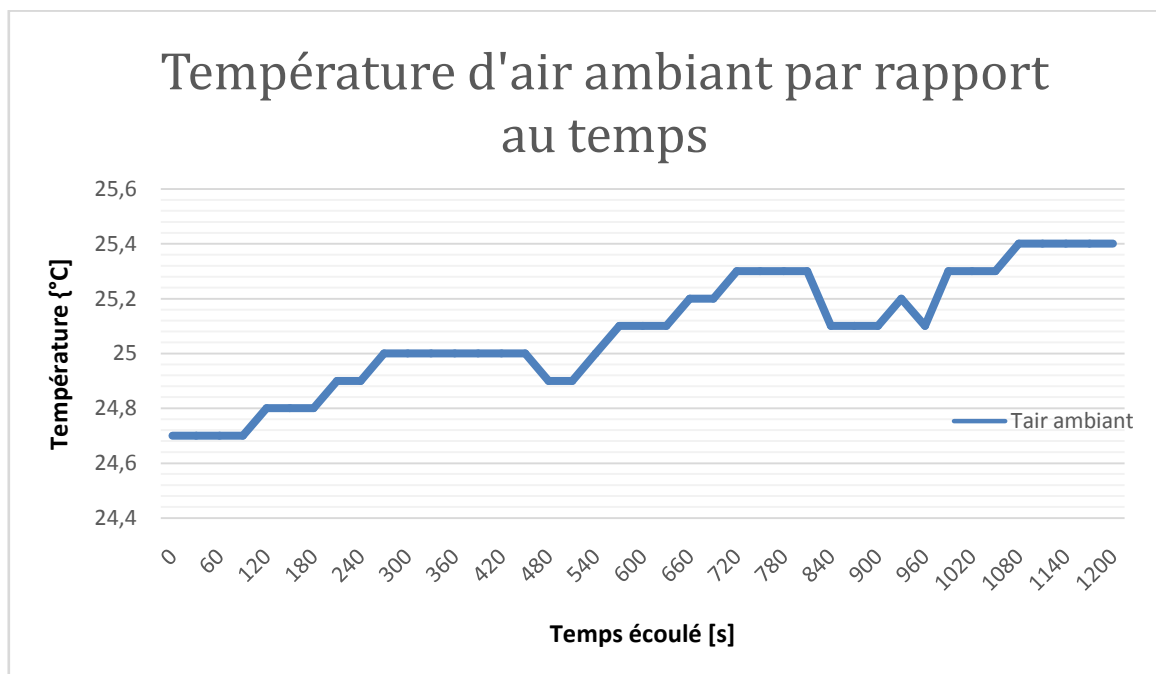
Temps [Seconde]	T _{air} ambiant	T _{air} ventilo extérieur	T _{air} intérieur	T _{paroi} radiateur aluminium intérne	T _{water} for TEC module cooling
0	24.7	24.7	22	22	17.6
30	24.7	24.7	21.9	18.7	18.2
60	24.7	25.4	19.9	15.9	19.5
90	24.7	26.1	18.5	13.8	21.2
120	24.8	27.2	17.9	10.4	23.5
150	24.8	27.5	17.1	8.9	25.6
180	24.8	27.8	16.5	7.8	27.1

210	24.9	28.3	15.8	6.8	28.6
240	24.9	28.8	14.6	5.8	29.4
270	25	28.9	14.3	5.2	29.9
300	25	28.9	14.1	4.6	30.6
330	25	30	13.8	4.1	31.2
360	25	28.9	13.5	3.4	32.4
390	25	30	13.1	2.9	32.5
420	25	30.1	12.8	2.4	32.6
450	25	30.1	12.5	1.5	32.6
480	24.9	30	12.1	0.9	32.6
510	24.9	30.1	12.1	0.8	32.7
540	25	30.8	12.1	0.9	32.7
570	25.1	30.8	12.1	0.9	32.8
600	25.1	30.9	11.8	0	32.9
630	25.1	31.2	11.5	-0.6	33
660	25.2	31.8	11.3	-1.3	34.1
690	25.2	31.9	11.1	-1.8	35
720	25.3	32.2	10.8	-2.6	36.2
750	25.3	32.4	10.5	-3.8	37.8
780	25.3	32.5	9.1	-4.3	39.1
810	25.3	32.7	8.7	-5.1	39.7
840	25.1	32.9	8.5	-5.8	40.1
870	25.1	33.1	7.7	-6	40.5
900	25.1	33.2	7.4	-6	40.9
930	25.2	33.4	6	-6.2	41.1
960	25.1	33.7	6.6	-6.5	41.2
990	25.3	33.9	6.4	-6.8	41.2

1020	25.3	34	6.1	-7.1	41.5
1050	25.3	34.4	5.9	-7.5	41.6
1080	25.4	34.6	4.8	-8.1	41.6
1110	25.4	34.9	3.9	-7.9	41.8
1140	25.4	35.1	3.6	-8	41.9
1170	25.4	35.2	2.9	-8.1	41.9
1200	25.4	35.2	2.4	-8.1	41.9

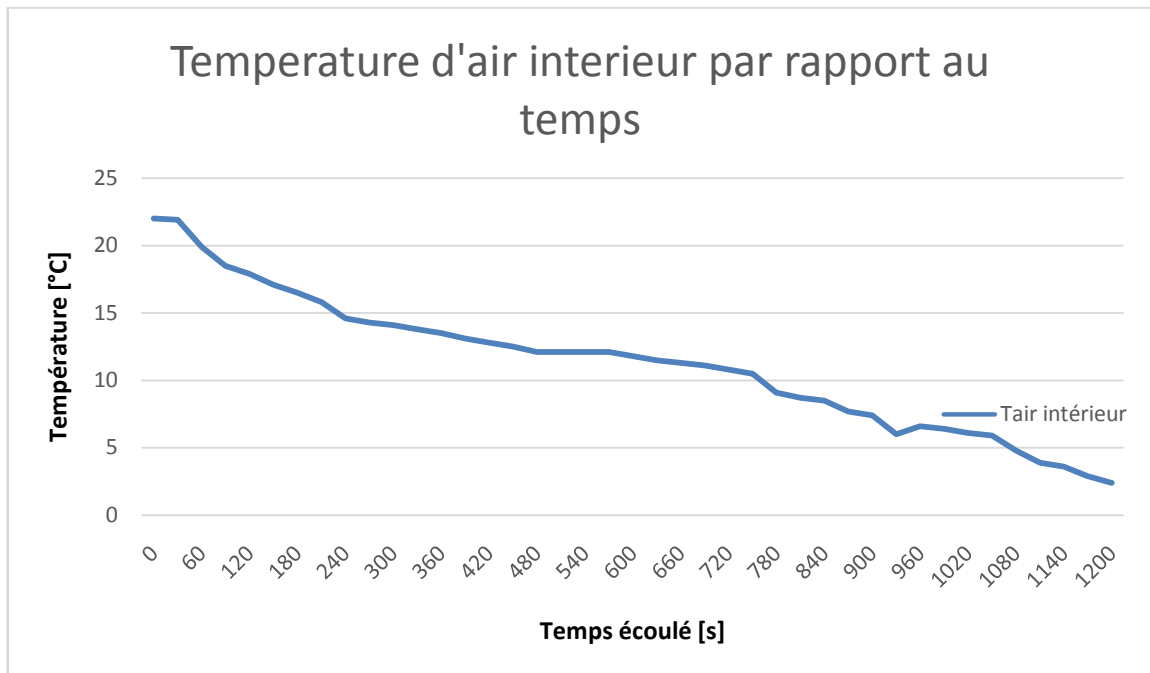
Le Graphe 01 :

L'évolution de la température extérieure à travers le temps :



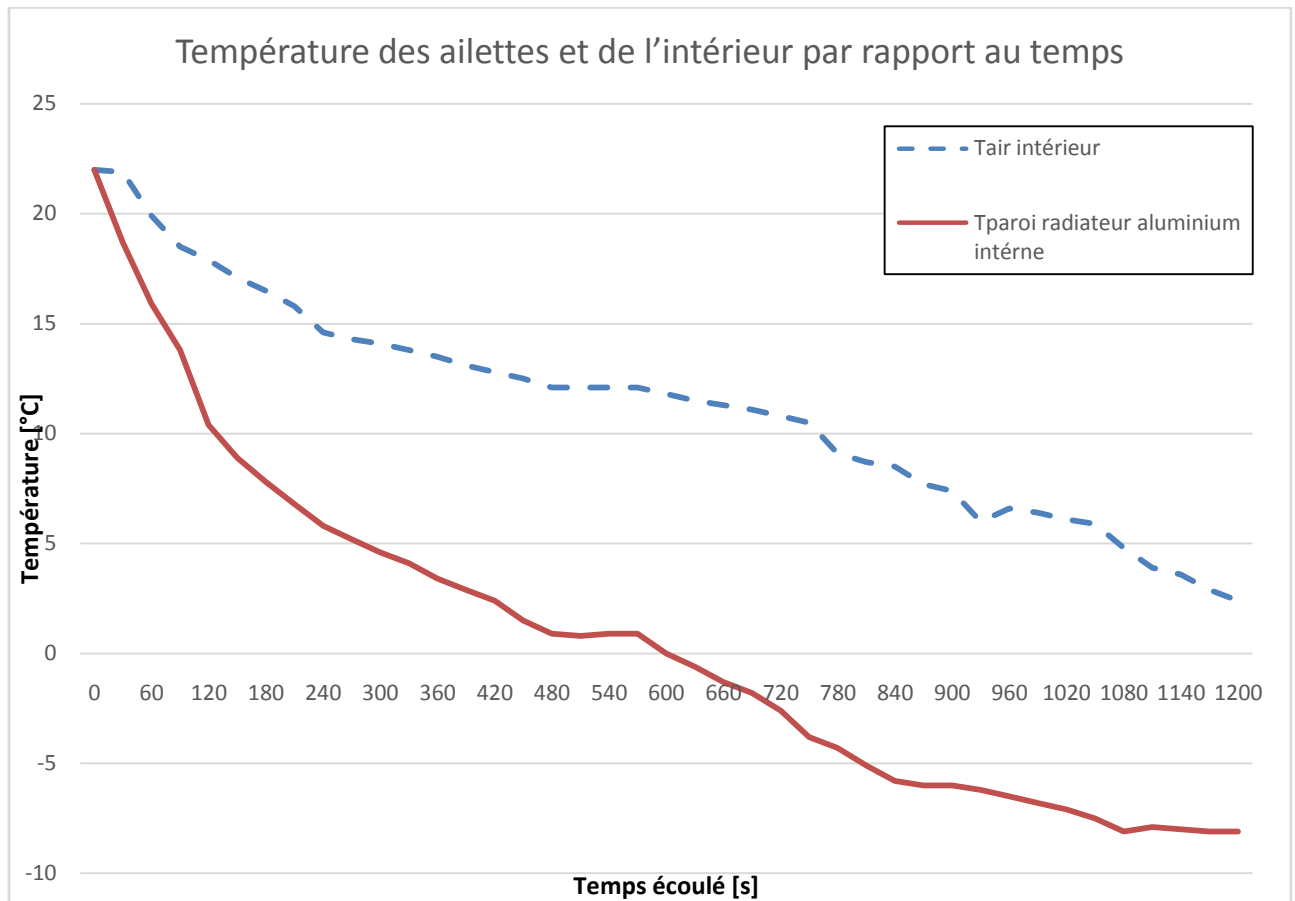
Nous avons procédé à ce relevé pour voir s'il y'aura un grand changement durant les essais ou non et on peut dire que y'a pas un grand changement et la température peut être considérée comme constante

Graph 02 : Evolution de la température de l'ailette par rapport au temps



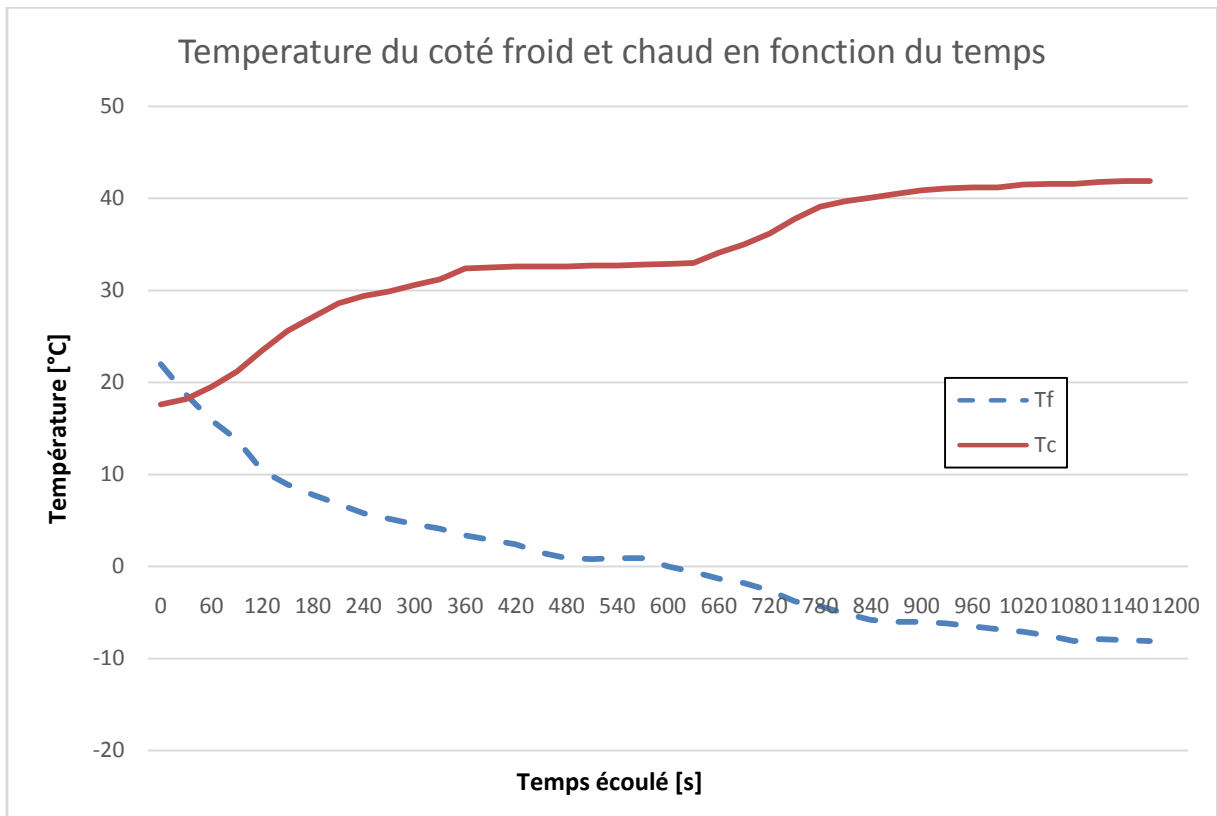
Dans ce graphe on remarque que la température évolue pour quelques minutes puis encore diminue et ne s'arrête pas tant qu'il est refroidi elle continue à baisser, et d'après des tests faits avant on a remarqué que la température dépend de la température ambiante, plus il fait chaud plus elle met du temps à baisser mais elle arrive toujours à la température de réfrigération.

Graphe 03 : Evolution de température des ailettes et de l'intérieur par rapport au temps



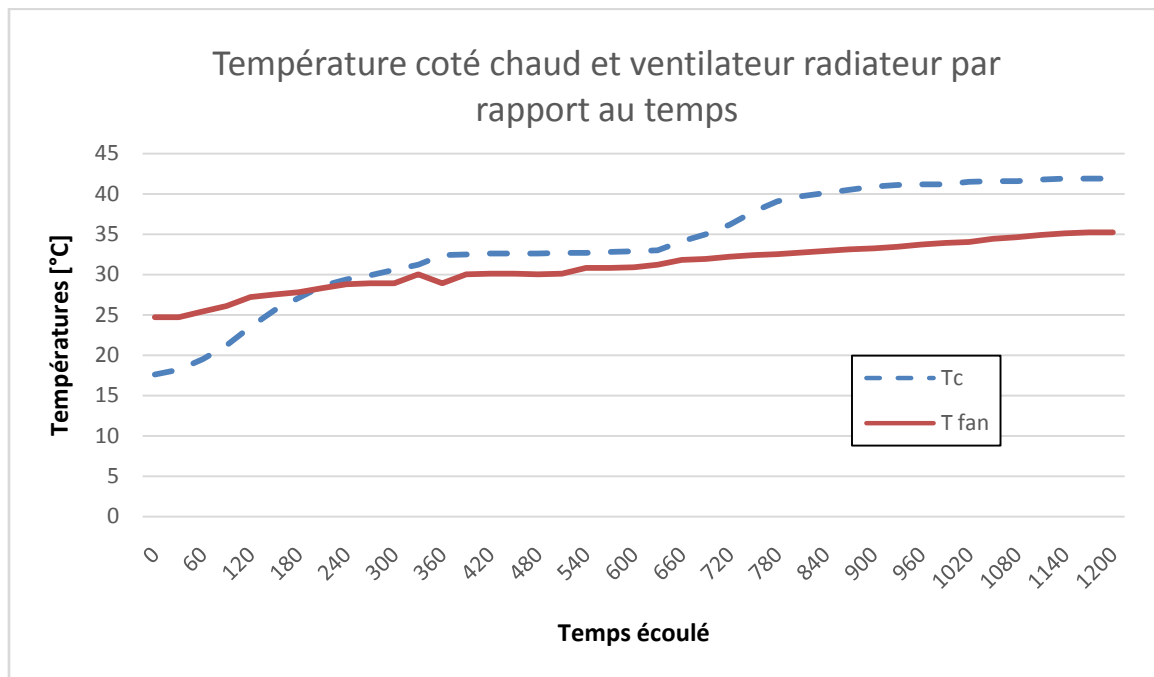
D'après le graphe on remarque que la température des ailettes atteint rapidement le zéro par rapport a celle de la boîte mais une fois avec des température négative la boîte commence à se refroidir rapidement et tout ça avec une convection libre. Par ailleurs, avec les tests fait avant on a remarqué qu'avec la ventilation la température n'atteint pas ses températures du fait quel ne laisse pas les ailettes descendre a des température très basse.

Graphe 04 : Comparaison entre les deux côtés des Peltier le chaud et le froid



De ce graphe on remarque que la température du coté chaud augmente proportionnellement avec celle du coté froid et on remarque qu'elle est bien refroidie sinon elle aurait augmenté plus, et d'après les essais faits avant si la température du coté chaud augmente plus elle va influencer le coté froid et commencera à chauffer.

Graphe 05 : Evolution de la température de sortie d'échangeur avec la température de ventilation du radiateur



D'après le graphe on remarque que les deux températures augmentent qui prouve que le ventilateur extrait la bonne quantité de chaleur des radiateurs

IV. Bilan énergétique :

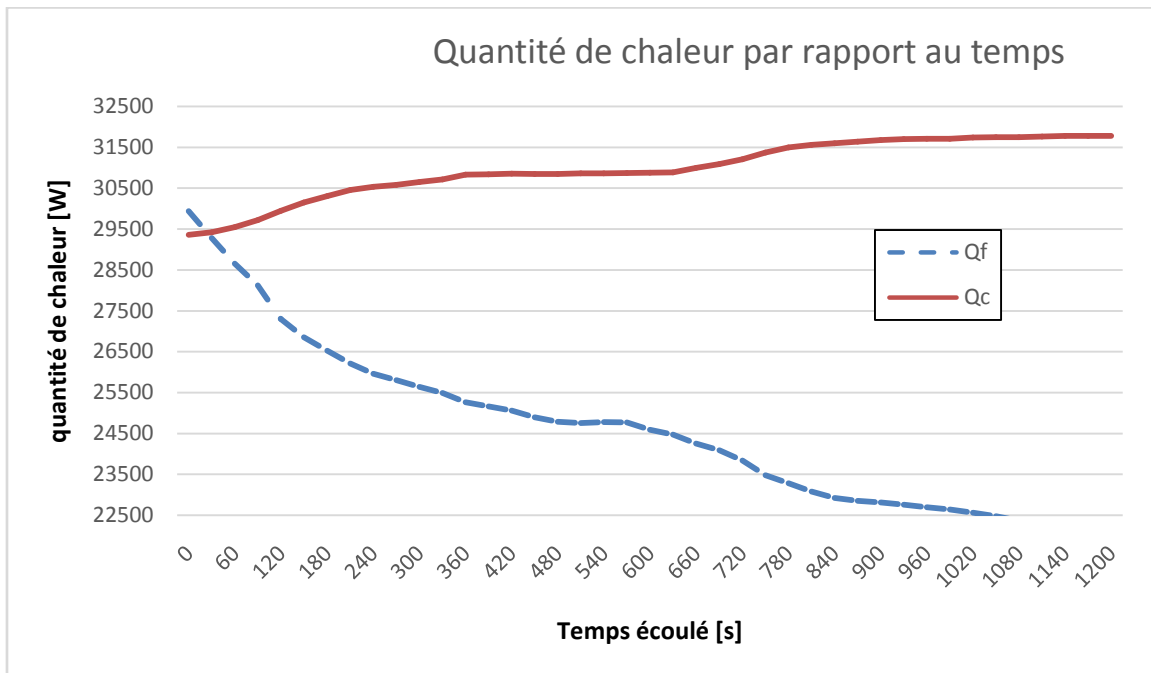
A partir des lois citées dans le chapitre précédent et en haut, nous allons mettre dans un tableau les résultats obtenus et créer des graphes montrant l'évolution des quantités de chaleur à chaque instant, étant qu'on n'a pas fabriqué le Peltier nous allons prendre le coefficient de Seebeck (α), la résistance électrique (R) et la conductance thermique R des propriétés des Peltier utilisés.

Temps [Seconde]	Tf	Tc	Q _f	Q _c	W	COP
0	22	17.6	29800.9	29360.3	-440.65	-67.63
30	18.7	18.2	29697.2	29649.9	-47.28	-628.11
60	15.9	19.5	29639.3	30012.1	372.798	79.5051
90	13.8	21.2	29649.6	30418	768.39	38.5867
120	10.4	23.5	29519.9	30887.8	1367.9	21.5804
150	8.9	25.6	29585.5	31341.6	1756.1	16.8473
180	7.8	27.1	29691.7	31736	2044.29	14.5242
210	6.8	28.6	29806.9	32132.8	2325.95	12.8149
240	5.8	29.4	29920.9	32457.4	2536.47	11.7963
270	5.2	29.9	30077.1	32751.3	2674.16	11.2473
300	4.6	30.6	30232.2	33067.6	2835.39	10.6624
330	4.1	31.2	30397.4	33374.2	2976.74	10.2116
360	3.4	32.4	30539.2	33747.5	3208.25	9.51898
390	2.9	32.5	30703	34001.1	3298.08	9.30936
420	2.4	32.6	30866	34254.9	3388.87	9.10807
450	1.5	32.6	30982.9	34497.4	3514.48	8.81579
480	0.9	32.6	31132.7	34740.1	3607.41	8.63018
510	0.8	32.7	31338.9	34994.5	3655.51	8.57307
540	0.9	32.7	31568.3	35237.7	3669.35	8.60326
570	0.9	32.8	31786.1	35492.4	3706.23	8.5764
600	0	32.9	31898.2	35746.6	3848.46	8.28856
630	-0.6	33	32044.3	36001.2	3956.98	8.09817
660	-1.3	34.1	32176.8	36373.7	4196.91	7.6668
690	-1.8	35	32332.4	36724.4	4392	7.36166
720	-2.6	36.2	32450.8	37112.1	4661.35	6.96167
750	-3.8	37.8	32519	37549.5	5030.54	6.46431

780	-4.3	39.1	32671.1	37953.7	5282.56	6.18472
810	-5.1	39.7	32786	38274.5	5488.46	5.97362
840	-5.8	40.1	32912.1	38571.7	5659.63	5.81524
870	-6	40.5	33099.5	38870	5770.53	5.73595
900	-6	40.9	33311.6	39169	5857.42	5.68707
930	-6.2	41.1	33498.6	39443.5	5944.95	5.63479
960	-6.5	41.2	33672.6	39705.7	6033.12	5.58129
990	-6.8	41.2	33846.2	39955.4	6109.2	5.54021
1020	-7.1	41.5	34019.2	40243.4	6224.16	5.46567
1050	-7.5	41.6	34178.9	40506	6327.19	5.4019
1080	-8.1	41.6	34311.9	40755.9	6443.97	5.32465
1110	-7.9	41.8	34548.7	41032.2	6483.49	5.32872
1140	-8	41.9	34746.3	41295.5	6549.23	5.3054
1170	-8.1	41.9	34943.8	41545.9	6602.1	5.29284
1200	-8.1	41.9	35154.6	41796.4	6641.85	5.29289

Grphe 06 :

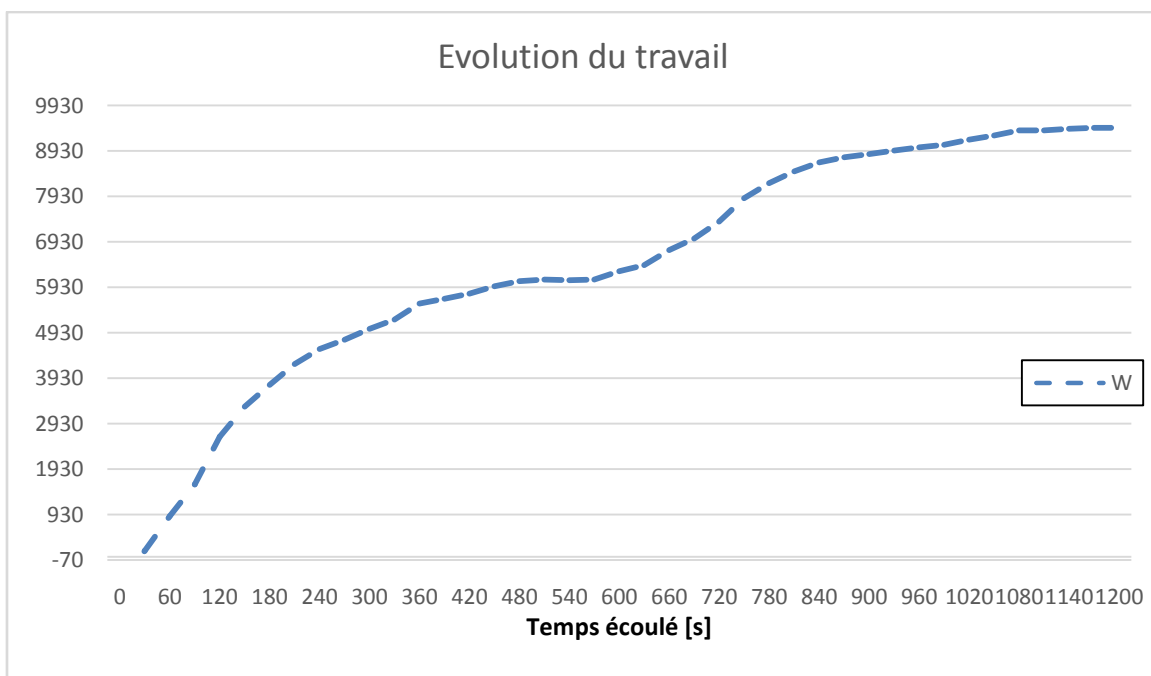
Evolution de la quantit de chaleur du cot chaud et froid par rapport au temps



D'après les graphes on remarque que la quantité de chaleur du côté chaud produite est plus importante que celle produite du côté froid et de ce fait au lieu de laisser partir cette quantité dans le vide sans être utilisée on peut en bénéficier et l'utiliser pour d'autres fins.

Graphe07 :

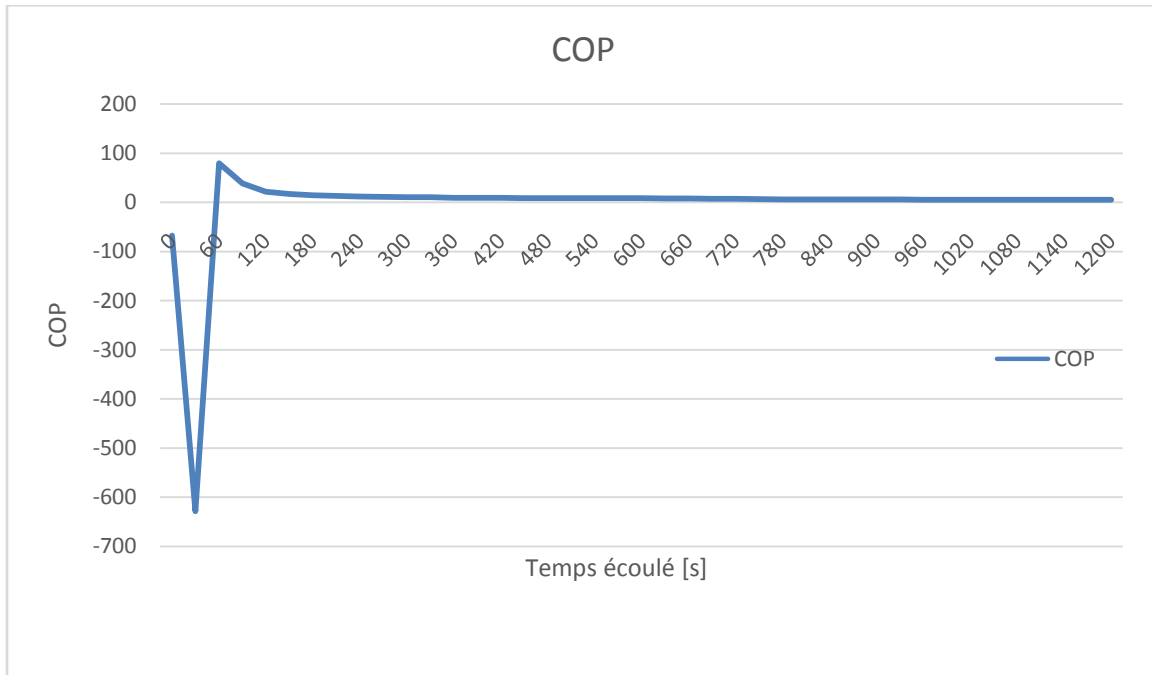
Evolution du travail par rapport au temps



D'après le graph on remarque qu'on a une grande quantité de travail fournie

Graphe 08 :

Evolution du COP par rapport au temps :



D'après le graphe on remarque que le COP au début était négatif puis il a commencé à se stabiliser à la fin.

Calcul du COP de la machine

Pour calculer le COP on va utiliser les lois 40,41,42 et 44 du chapitre 2 :

Et de là le COP devient :

$$COP = \frac{\dot{Q}_T}{\dot{W}}$$

Conclusions Générales

Conclusions Générales

Dans ce travail, nous avons pu réaliser un réfrigérateur thermoélectrique performant avec presque les mêmes caractéristiques que celui d'un cycle mécanique. Nous avons pu voir que pour une meilleure extraction des performances d'un Peltier il devait être refroidi à l'eau, chose ce qu'on a pu le faire. De plus, il faudrait un meilleur isolant pour aucune perte thermique pour le box et aussi entre le côté chaud et froid des Peltier, il a fallu isoler le côté chaud dans le bloc réfrigérant pour ne pas influencer le côté froid. On a vu aussi qu'en utilisant les Peltier en cascade, ça serait beaucoup mieux et permet d'atteindre de très basse température le même Peltier.

Nous avons aussi constaté que la température froide obtenue est relative avec la température extérieure ; plus il fait chaud plus elle prend du temps à l'atteindre. En utilisant une convection forcée était rapide mais elle freiner le refroidissement car elle ne laisser pas les ailettes se congeler, d'où le fait qu'on a utilisé une convection libre, et de là on conclut qu'un module doit atteindre sa température maximale pour libérer en entier au ailette ces frigories.

On a aussi remarqué que le ΔT entre le côté chaud et froid ne doit pas être trop important, plus précisément le côté chaud doit être le plus froid possible sinon il fera chauffer le côté froid, et il nous a fallu une grande quantité d'eau pour la garder la plus basse.

Pour les améliorations que je propose pour un projet futur, il serait prometteur d'étudier un échangeur de chaleur pour le refroidissement d'eau chaude pour avoir une petite quantité d'eau et un refroidissement maximal et un ΔT le plus petit possible. Nous comptant aussi faire en sorte quel soit avec une convection forcée, mais elle doit être automatisé grâce à une carte Arduino par exemple et étudier le temps qu'il faut à l'ailette pour quel se recongèle et de là on gagnera le temps pour atteindre rapidement la température de réfrigération.

Références bibliographiques

- [1] <https://www.abcclim.net/historique-froid-climatisation.html>

- [2] MARVILLET Christophe, usage et production du froid, décembre 2015
- [3] <https://www.lachimie.fr/organique/technique/melanges-refrigerants.php>
- [4] Daniel Champier, Thermoélectricité : généralités, application et conception des générateurs thermoélectriques, 27 au 30 octobre 2015
- [5] C. Shein et R. Radermacher. Scroll compressor simulation model. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 123 (2001)
- [6] thèse d'obtention de doctorat : étude du fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption, Mouad Diny, 1996
- [7] Ph. Nika, F. Lanzetta, Développement d'une machine frigorifique Stirling de petite taille, adaptée à des niveaux thermiques modérés, 1995
- [8] <https://www.abcclim.net/absorption.html>
- [9] <http://www.recuperation-chaleur.fr/machine-absorption>
- [10] <https://www.telerech-europe.com/fr-fr/effet-peltier-thermoelectrique>
- [11] B. Lenoir, Ecole des mines, Nancy, introduction à la thermoélectricité, juillet 2012
- [12] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/thermoelectricite/1-historique/>
- [13] Marc BONNISSEL, ADSORPTION DE GAZ MODULEE EN TEMPERATURE PAR DES ELEMENTS THERMOELECTRIQUES À EFFET PELTIER, octobre 1997.
- [14] <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Effet%20Seebeck/fr-fr/>
- [15] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-effet-peltier-16151/>
- [16] <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Effet%20thomson/fr-fr/>
- [17] Roux-Briffaud Jonas, La Thermoélectricité études bibliographique, IUT St Nazaire, 2008
- [18] Poojalyer Mani, Design, Modeling and Simulation of a Thermoelectric Cooling System (TEC), Western Michigan University, 2016
- [19] <http://pslc.ws/french/styrene.htm>
- [20] <https://www.travauxavenue.com/facade-toiture-isolation/guide-travaux/isolation/role-interet-mousse-polyurethane-expansive/>