REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : énergétique

Analyse du bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique

---

Présenté par

- KHALFOUN Fares
- LADJEL Rafik

Proposé et Dirigé par

Encadreur : Pr. CHIBA Younis
Co-Encadreur : Dr. YKRELEF Hichem

Promotion 2024


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciement

Au terme de ce travail,

Nous tenons en premier lieu à remercier le bon dieu pour le courage et la patience qu'il nous a donnée à fin de mener ce projet a terme.

Nous remercions nos enseignants et encadreur Pr. CHIBA Younis et le Co-Encadreur : Dr. YKRELEF Hichem qui nous a vraiment aidés dans la Préparation de ce travail,

Nous remercions également nos parents et tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nos remerciement vont à tous ceux qui, de loin ou de prêt ont aidé à l'étude de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie cet humble travail, synonyme de l'aboutissement de tous les efforts que vous avez fournis au cours de ces années :

À mes chers parents, en témoignage de ma profonde gratitude pour leur dévouement et leur patience et pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour moi, sans eux je ne serais jamais arrivée sans qu'ils soient là pour moi· J'espère qu'ils verront cet anniversaire comme un signe de ma profonde gratitude à leur égard, ainsi que de tout mon amour·

À mes frères et ma petite sœur

A tous mes chers amis·

À tous ceux qui m'aiment et me respectent·

RAFIK LADJEL

Dédicace

Je dédie cet humble travail, synonyme de l'aboutissement de tous les efforts que vous avez fournis au cours de ces années :

À mes chers parents, en témoignage de ma profonde gratitude pour leur dévouement et leur patience et pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour moi, sans eux je ne serais jamais arrivée sans qu'ils soient là pour moi· J'espère qu'ils verront cet anniversaire comme un signe de ma profonde gratitude à leur égard, ainsi que de tout mon amour·

À mes frères et mes sœurs

A tous mes chers amis·

À tous ceux qui m'aiment et me respectent··

KHALFOUNE FARES

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction Générale

Chapitre I: Généralité sur Système thermoélectrique

Introduction…….……(4)

I.1.Historique…….……..(5)

I.2.La thermoélectricité……..…….(6)

I.3.Les phénomènes thermoélectriques…….……..(6)

I.3.1. Effet de Seebeck ……...……(6)

I.3.2. Effet de Peltier ……..……..…(8)

I.3.3. Effet de Thomson ……..…(10)

I.4. Les coefficients thermoélectriques ……...……(12)

I.4.1. Coefficient Seebeck …….……(12)

I.4.2. Coefficient Peltier ……(12)

I.4.3. Coefficient Thomson ……..…(12)

I.4.4. Les relations de Kelvin ……..……(13)

I.5. Les grandeurs physiques ……(13)

I.5.1. Facteur de mérite (ZT) ……(13)

I.5.2. La conductivité électrique ……..……(13)

I.5.3. La conductivité thermique ……..…(14)

I.6. Conception d'un élément Peltier ……...……(15)

I.6.1. Thermocouple ……(15)

I.6.2. Elément thermique ……(16)

I.6.3. Module Peltier ……..……(16)

I.6.4. Fonctionnement physique du module thermoélectrique ……(18)

I.7.Performances d'un dispositif thermoélectrique ……..…..(19)

I.8.Critères d'optimisation d'un dispositif thermoélectrique ……..…(20)

I.8.1. Générateur de courant ……(20)

I.8.2. Refroidissement thermoélectrique ……..……(21)

I.8.3. Les équations de la thermo réfrigération ……(22)

I.8.4. Exemples d'applications ……..……(23)

I.8.4.1.Génération d'électricité ……(23)

I.8.4.1.1. Les petits réchauds à bois ……..…(24)

I.8.4.2. Pour la réfrigération thermoélectrique ……..……(24)

I.8.4.2.1Réfrigération thermoélectrique petites enceintes ……...……(24)

I.9.Matériaux thermoélectriques ……..……..……(25)

I.9.1. Les matériaux conventionnels ……..……(25)

I.9.1.1. Les matériaux pour les basses températures et autour de la température ambiante……...…(25)

I.9.1.2. Les matériaux pour les températures intermédiaires ……(26)

I.9.1.3. Les matériaux pour les hautes températures ……...……(26)

I.9.2. Nouveaux matériaux thermoélectriques ……...……(27)

I.9.2.1. Les Skutterudites ……...……(27)

I.9.2.2. Les clathrate……....……(27)

I.9.2.3. Les Oxydes……..……(27)

I.9.2.4. Les semis Heuslers ……(27)

I.9.2.5. Les polymères ……..…...……(28)

Conclusion ……(29)

Chapitre II: Bilan Thermique

Introduction ……..……(31)

II.1. Transfert de chaleur ……..……..(32)

II.1.1. Modes de transfert de chaleur ……(32)

II.1.1.1. Conduction……(32)

II.1.1.2. Convection ……(32)

SOMMAIRE

II.1.1.3. Rayonnement ……(32)

II.1.1.4. Isolation thermique de réfrigérateur……..(33)

II.2. Choix de l'isolant ……...……(33)

II.2.1. Panneaux sandwich ……(33)

II.2.2. Les parois ……...……(34)

II.3. Différents apports de chaleur ……(35)

II.4. Bilan frigorifique ……...(35)

Conclusion ……(43)

Chapitre III: Technique Expérimentale

Introduction……(46)

III.1. Présentation du réfrigérateur ……(47)

III.4. Caractéristiques électriques ……..……(49)

III.5. Caractéristiques de l'isolation ……..……(49)

III.6. Description du réfrigérateur ……(50)

III.7. Plaques Peltier ……..……(51)

III.8. Dissipateurs de chaleur ……(53)

III.9. Les ventilateurs ……(54)

III.10. Les multimètres ……..……(56)

III.11. Thermocouple ……(56)

III.12. Système de travail du réfrigérateur thermoélectrique ……..……(59)

Conclusion ……(60)

Chapitre IV: Résultats et Discussions

Introduction ……(62)

IV.1. Résultat est discussion……..……(63)

IV.2. La puissance frigorifique ……(68)

IV.3. La puissance calorifique ……..……(70)

IV.4. La puissance électrique consommée par le module ……(71)

IV.5. Le coefficient de performance réel ……..……(73)

SOMMAIRE

IV.6.Facteur de mérite ……...……(75)

Conclusion générale ……..……(76)

Référence ……...……(77)

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Effet Seebeck ……...…….(7)

Figure I.2: Effet Peltier…….……...(9)

Figure I.3: Illustration Effet Thomson……..…….(11)

Figure I.4: Thermocouple……..……(16)

Figure I.5: Module Peletier ……..…….(16)

Figure I.6: Module Peletier avec ces deux ventilateurs ……...…….(17)

Figure I.7: Schéma descriptif d'un module Peltier ……...……(18)

Figure I.8: Schéma de principe de l'effet Peltier …….……(18)

Figure I.9: (a) refroidissement thermoélectrique, (b) génération de courant électrique…...(22)

Figure I.10: Schéma illustrant l'effet thermoélectrique de refroidissement……..(22)

FigureI.11: Un petit réchaud à bois (biolite)…….(24)

Figure I.12: Réfrigérateur thermoélectrique (Peltier)……...(25)

Figure I.13: Evolution du facteur de mérite de différents matériaux conventionnels en fonction de la température…….....(26)

Chapitre III

Figure III.1: La vue de réfrigérateur……..…(47)

Figure III.2: Schéma des dimensions du réfrigérateur……...…(48)

Figure III.3: La vue de face du réfrigérateur ……...(50)

Figure III.4: La vue arriére du réfrigérateur……..……(50)

Figure III.5: Module peltier type TEC1-12703…….(52)

Figure III.6: Caractéristiques géométriques de module…….(52)

Liste des figures

Figure III.7: Les dissipateurs de chaleur……(53)

Figure III.8: Les ventilateurs…….……(54)

Figure III.9: Les Multimétres……(56)

Figure III.10: Le Thermocouple de type K……(58)

Figure III.11: Schéma de fonctionnement du réfrigérateur thermoélectrique……..……(59)

Chapitre IV

Figure IV.1: La variation de température (ambiante et interne) en fonction du temps……..(65)

Figure IV.2: La variation de température (ambiant et du cote froide) en fonction du temps ….....(67)

Figure IV.3: La variation de la puissance frigorifique du réfrigérateur en fonction du temp……...(68)

Figure IV.4: La variation de la puissance calorifique du réfrigérateur en fonction du temps……....(70)

Figure IV.5: La variation de la puissance électrique du réfrigérateur en fonction du temps ……...(72)

Figure IV.6: La variation du coefficient de performance réel en fonction du temps……(74)

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1: Les valeurs (e, Ri, λ) de chaque Matériaux…….……(34)

Tableau II.2: Les valeurs (k, S, ΔT , D) de chaque paroi…….(36)

Tableau II.3: Conditions de conservation de pomme …….(37)

Tableau II.4: La chaleur dégage par personne……..(39)

Tableau II.5: Les résultats des (Q) et le (Qt) …….(41)

Chapitre III

Tableau III.1: Caractéristiques physiques……(48)

Tableau III.2: Caractéristiques électriques……...(49)

Tableau III.3: Caractéristiques de l'isolation……....(49)

Tableau III.4: Les Caractéristiques de Module Peltier…….....(51)

Tableau III.5: Caractéristiques du Thermocouple type(K) …….(58)

Chapitre IV

Tableau IV.1: Les Température ambiant et interne……(64)

Tableau IV.2: Les Température ambiant et du côté froide et chaude de Module Peltier…..(66)

Tableau IV.3: Les Puissances Frigorifiques du réfrigérateur …… ...(68)

Tableau IV.4: Les Puissances calorifiques du réfrigérateur …… .(70)

Tableau IV.5: Les Puissances électrique consommée par le module ……(71)

Tableau IV.6: Le coefficient de performance du réfrigérateur …… …….(73)

Résumé

Le sujet de ce mémoire concerne l'analyse d'un réfrigérateur thermoélectrique compact et économique en énergie, destiné à remplacer les systèmes de réfrigération classiques à compresseur. Le réfrigérateur a fait l'objet d'un projet de démarrage à l'Université de Medea. Un échantillon de 500 grammes de pommes a été testé et a révélé une nette différence de température de 16°C entre les sources chaudes et froides. La technologie thermoélectrique offre de multiples bénéfices potentiels, tels que (consommation d'énergie réduite, absence de substances nocives pour le réfrigérateur, taille réduite par rapport aux réfrigérateurs classiques). Ce réfrigérateur thermoélectrique fait partie de ce processus, En proposant une solution de refroidissement écologique et économique en énergie. Grâce à l'analyse des résultats obtenus, il sera possible de repérer les atouts et les aspects à améliorer du système. Le but est d'améliorer les performances du réfrigérateur afin de le rendre compétitif sur le marché et de favoriser l'évolution vers des solutions de refroidissement plus respectueuses de l'environnement. Les perspectives prometteuses dans le domaine de la réfrigération sont ouvertes par le développement de cette technologie innovante au sein de l'Université YAHIA FARES MEDEA , qui met l'accent sur l'efficacité énergétique et le respect de l'environnement.

Mots-clés : réfrigérateur thermoélectrique, effet peltier, réfrigération.

ملخص

موضوع هذه الأطروحة هو تحليل ثلاجة كهربائية حرارية مدمجة موفرة للطاقة مصممة لتحل محل أنظمة التبريد التقليدية ذات الضاغط. كانت الثلاجة موضوع مشروع بدء التشغيل في جامعة المدية. وقد تم اختبار عينة من 500 جرام من التفاح وكشفت عن وجود فرق واضح في درجة الحرارة يبلغ 16 درجة مئوية بين المصادر الساخنة والباردة. تقدم التكنولوجيا الكهرو حرارية عددًا من الفوائد المحتملة، بما في ذلك انخفاض استهلاك الطاقة، وعدم وجود مواد ضارة في الثلاجة، وتقليل الحجم مقارنة بالثلاجات التقليدية. وتُعد هذه الثلاجة الكهرو حرارية الحرارية جزءًا من هذه العملية، حيث توفر حلاً للتبريد صديقًا للبيئة وموفرًا للطاقة. ومن خلال تحليل النتائج التي تم الحصول عليها، سيكون من الممكن تحديد نقاط قوة النظام والمجالات التي تحتاج إلى تحسين. والهدف من ذلك هو تحسين أداء الثلاجة لجعلها قادرة على المنافسة في السوق وتشجيع التوجه نحو حلول تبريد أكثر صداقة للبيئة. إن تطوير هذه التقنية المبتكرة في جامعة يحيى فارس المدية، التي تركز على كفاءة الطاقة واحترام البيئة، يفتح آفاقًا واعدة في مجال التبريد.

الكلمات المفتاحية: ثلاجة كهر وحرارية، تأثير بيلتر، تبريد

Abstract

The subject of this thesis is to analyse an energy-efficient compact thermoelectric refrigerator designed to replace traditional compressor refrigeration systems. The refrigerator was the subject of a start-up project at the University of Medea. A sample of 500 grams of apples was tested and revealed a clear temperature difference of 16 degrees centigrade between hot and cold sources. Thermoelectric technology offers a number of potential benefits, including lower energy consumption, no harmful substances in the refrigerator, and reduced size compared to conventional refrigerators. This thermoelectric refrigerator is part of this process, providing an environmentally friendly and energy-efficient refrigeration solution. By analysing the results obtained, it will be possible to identify the system's strengths and areas for improvement. The aim is to optimise the refrigerator's performance to make it competitive in the market and to encourage a move towards more environmentally friendly cooling solutions. The development of this innovative technology at YAHIA FARES MEDEA University, which focuses on energy efficiency and respect for the environment, opens up promising prospects in the field of refrigeration.

Keywords: Thermoelectric refrigerator, pelter efect, cooling.

Introduction générale

Le froid trouve de nombreuses applications dans des domaines très variés (Industries, agroalimentaires, médecine, confort thermique...), Et c'est dans le domaine alimentaire que le froid occupe une place prépondérante car il permet de limiter les gaspillages (pertes après récolte…) et de prolonger la durée de conservation des produits ce qui permet un élargissement des échanges.

Pour les produits fabriqués par l'industrie agroalimentaire (lait, fromage …), le froid permet d'améliorer leur qualité en favorisant la maîtrise des conditions de fabrication par une optimisation des paramètres climatiques influençant le comportement des microorganismes. Le froid permet aussi l'augmentation du volume de production agricole par la modification du cycle végétatif des plantes améliorant ainsi leur rendement.

La technologie thermoélectrique, qui permet la conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique et vice versa, a suscité un intérêt considérable en raison de son potentiel d'application dans divers domaines, notamment les réfrigérateurs thermoélectriques. Ces dispositifs offrent des avantages significatifs tels que l'absence de pièces mobiles, le fonctionnement silencieux, la compacité, et la possibilité de miniaturisation.

La technologie thermoélectrique repose sur l'effet Seebeck, qui a été découvert en 1821. Cet effet décrit comment une différence de température entre deux côtés d'un matériau peut générer une tension électrique. Les réfrigérateurs thermoélectriques exploitent cet effet en inversant le processus : en appliquant une tension électrique, ils créent une différence de température, ce qui permet de refroidir un espace.

L'analyse de bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique est une étude qui permet de déterminer l'efficacité et le fonctionnement de l'appareil. Elle consiste à évaluer les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du réfrigérateur, ainsi que les pertes d'énergie qui peuvent survenir dans le processus de refroidissement.

Pour un réfrigérateur thermoélectrique, qui utilise des paires thermoélectriques pour créer un effet de refroidissement, le bilan thermique prend en compte les transferts de chaleur à travers les éléments thermoélectriques, ainsi que les pertes de chaleur dues à la conduction, la convection et l'irradiation. L'objectif est de minimiser ces pertes pour améliorer l'efficacité énergétique du réfrigérateur.

L'analyse peut inclure des simulations thermiques pour prédire le comportement du réfrigérateur sous différentes conditions d'utilisation et pour optimiser son design. Elle est essentielle pour garantir que le réfrigérateur fonctionne de manière optimale, en consommant le moins d'énergie possible tout en maintenant la température souhaitée à l'intérieur.

D’où notre intérêt est faire une analyse de bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique, ce mémoire est structuré autour de quatre chapitres, Dans le premier chapitre nous présentons un aperçu du domaine de la thermoélectricité. Nous présentons en premier les propriétés physiques et chimiques ; le facteur de mérite qui définit l’efficacité d’un matériau ainsi que les trois effets thermoélectriques puis nous présentons les applications thermoélectriques actuelles. Dans le deuxième chapitre, on calcule le bilan frigorifique de réfrigérateur thermoélectrique.

Le troisième chapitre sera consacré à la technique expérimentale, qui est crucial dans l’analyse de bilan thermique car il permet de démontrer la validité des méthodes utilisées pour mesurer et analyser les échanges thermiques. le quatrième chapitre est consacré à la discutions des résultats obtenus.

En fin, ce travail de recherche est clôturé par une conclusion générale et Recommandations.

Chapitre I
Généralité sur Système thermoélectrique

Introduction :

La thermoélectricité est une technologie qui tire parti des effets thermoélectriques pour convertir directement la chaleur en électricité et vice versa. Les phénomènes thermoélectriques principaux, à savoir l'effet Seebeck et l'effet Peltier, sont au cœur de cette technologie. L'effet Seebeck permet la génération d'électricité à partir d'un gradient de température, tandis que l'effet Peltier est utilisé pour le refroidissement ou le chauffage lorsque du courant électrique traverse un circuit thermoélectrique [1].

Les systèmes thermoélectriques sont particulièrement attractifs en raison de leur fiabilité, de leur silence de fonctionnement et de l'absence de pièces mobiles, ce qui réduit les besoins en maintenance et augmente leur durabilité. De plus, ils n'utilisent pas de fluides réfrigérants, ce qui en fait une solution écologique comparée aux technologies traditionnelles de refroidissement et de génération d'énergie [2].

L'utilisation des matériaux thermoélectriques pour recycler l'énergie résiduelle est une application prometteuse de cette technologie. Par exemple, la chaleur perdue dans les processus industriels ou la chaleur des gaz d'échappement des véhicules peut être convertie en électricité, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale et réduisant les émissions de gaz à effet de serre [3].

Depuis les années 60, des avancées significatives ont été réalisées dans le développement des matériaux thermoélectriques, en particulier avec l'introduction de nouveaux matériaux semi-conducteurs. Ces matériaux possèdent des propriétés améliorées, telles qu'un meilleur facteur de mérite (ZT), qui est crucial pour l'efficacité des dispositifs thermoélectriques. Les efforts de recherche se concentrent sur l'optimisation des matériaux existants et la découverte de nouveaux matériaux qui peuvent offrir des performances supérieures [4].

Les applications des systèmes thermoélectriques sont vastes et comprennent non seulement la conversion de la chaleur résiduelle en électricité, mais aussi des systèmes de refroidissement pour les équipements électroniques, les refroidisseurs de boisson, et les systèmes de climatisation locaux. Leur capacité à fonctionner de manière fiable dans des environnements extrêmes en fait également des candidats idéaux pour les applications spatiales et militaires [1] [5].

I.1 Historique :

La thermoélectricité a connu 2 principales périodes de développement. Une première de 1821 à 1851 et une seconde de la fin des années 1930 au début des années 1960.

- 1821 : Le physicien allemand Thomas Johann Seebeck découvre le premier effet thermoélectrique. Il remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre 2 conducteurs de nature différentes liés à leur extrémité par des jonctions et qu'une des jonctions est maintenue à une température plus élevée que l'autre.

- Cet effet fut interprété comme une apparition d'un champ magnétique et servit même à expliquer le champ magnétique terrestre. Ce n'est que plus tard que l'on démontrât que ce phénomène s'expliquait par l'apparition d'un courant électrique entre les jonctions froide et chaude

- 1834 : Le physicien Français Jean Peltier découvre le second effet thermoélectrique, qui est en fait le phénomène inverse de l'effet Seebeck soit : si l'on applique un courant à un solide métallique on observe un déplacement de chaleur d'une face à l'autre. Là aussi les explications que fournit Peltier se trouvent incorrectes.

- 1838 : Heinrich Lenz explique les découvertes de Peltier. Si l'on fait passer un courant électrique dans un circuit conçu avec 2 matériaux différents et dont les raccords sont à la même température, la chaleur est absorbée à une jonction et restituée à l'autre. Cette démonstration fut effectuée à l'aide du couple thermoélectrique antimoine/bismuth. La jonction de ces 2 fils métalliques est placée dans une goutte d'eau : quand le courant passe dans un sens la goutte d'eau gèle, quand le courant passe dans l'autre sens, la glace fond.

- 1851 : William Thomson (lord Kelvin) relie les effets Seebeck et Peltier. Un matériau, soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique, échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Inversement un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.

- 1865 : Robert Bunsen et Joseph Stefan montrent que les semi-conducteurs donnent également naissance à l'effet Seebeck avec un rendement très supérieurs à ceux obtenus avec les métaux.

- 1909 : Le scientifique Allemand Edmund Altenkirch effectue pour la première fois le calcul satisfaisant des propriétés des circuits thermoélectriques.

• 1950 : Abraham Ioffe découvre que les semi-conducteurs dopés ont un effet thermoélectrique plus élevé que les autres matériaux.

• 1990 : Regain d'intérêt pour la thermoélectricité dû aux préoccupations environnemental.

I.2 La thermoélectricité :

La thermoélectricité est une réciprocité physique qui relie le flux de chaleur à travers certains matériaux thermoélectriques au courant électrique qui les traverse, ce qui favorise la conversion de l'énergie.

La thermoélectricité consiste à générer de l'électricité lorsque les deux faces d'un matériau thermoélectrique (générateur thermoélectrique) présentent une différence de température, ce qui permet une conversion efficace d'énergie pour récupérer la chaleur perdue. Représente un moyen de générer de la chaleur ou se distingue par la génération de chaleur. Quand on applique un courant électrique, la disparité entre les deux faces provoque un refroidissement thermoélectrique du matériau, le rendant immédiatement froid [6].

Grâce à ses deux applications, la thermoélectricité a éveillé la curiosité de nombreux scientifiques, et l'émergence de divers effets thermoélectriques a suscité l'intérêt de nombreuses études sur ces effets.

I.3 Les phénomènes thermoélectriques :

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

I.3.1 Effet de Seebeck :

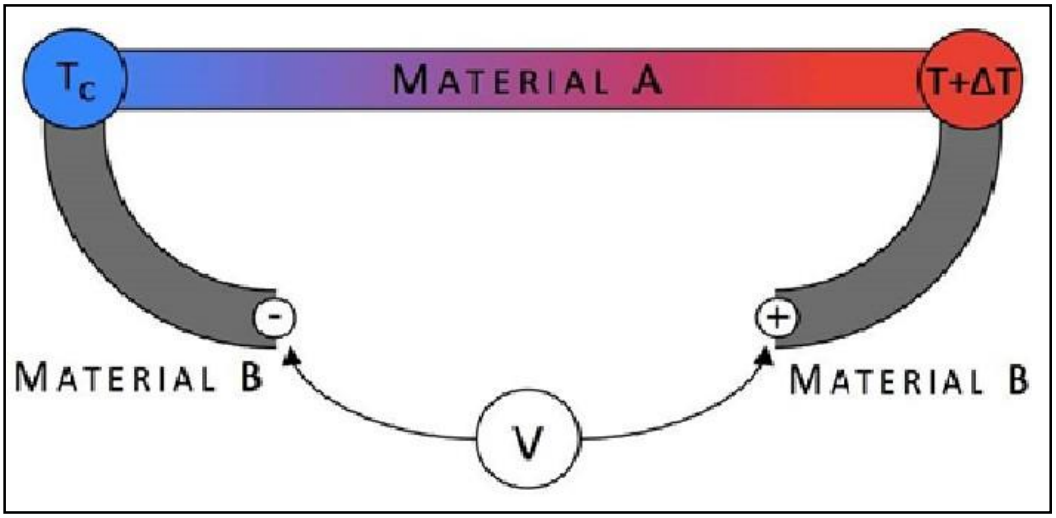
I.3.1.1 Définition :

En 1821, le physicien allemand Thomas Johann Seebeck a découvert que l'aiguille d'une boussole est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de nature différente, reliés à leur extrémité par des jonctions dont la température T n'est pas la même.

Il expliqua ce phénomène par l'émergence d'un champ magnétique et pensait même pouvoir expliquer l'existence du champ magnétique terrestre. L'origine électrique du phénomène n'est connue que plus tard :

Parmi les matériaux A et B, il y a deux jonctions de température T qui les relient. L'une des connexions est mise à la température T1, de sorte que T1 est supérieur à T. On observe alors une disparité de tension entre les connexions froides et chaudes. Prenons à présent A et B comme des semi-conducteurs de type n et de type p respectivement. La diffusion du porteur de charge, e- (électrons) ou e+ (trou), du côté chaud vers le côté froid est responsable de l'effet Seebeck. Dans le cas d'un circuit ouvert, les électrons e- se trouvent dans la partie froide du matériau de type n, tandis que les électrons e+ se trouvent dans la partie froide du matériau de type p. Il y aura donc une polarisation négative de la partie froide du semi-conducteur n et positive de celle du semi-conducteur p. Ainsi, il y a une disparité de charges qui entraîne une disparité de potentiel entre les deux extrémités froides de ces matériaux.

La mesure de température (thermocouples) est sa principale application, tandis que sa deuxième application, qui semble peu intéressante, est celle du thermo-générateur. [7]



I.3.1.2 Domaine d'application :

L'effet Seebeck est exploité dans plusieurs domaines :

Thermocouples : Utilisés pour mesurer les différences de température en convertissant cette différence en une tension mesurable [1].

Générateurs thermoélectriques : Convertissent la chaleur en électricité, utilisés dans des dispositifs de récupération de chaleur perdue dans les centrales électriques et les automobiles pour améliorer l'efficacité énergétique [2].

Capteurs de haute fréquence : Aident à détecter l'amplitude des ondes sinusoïdales, utile pour détecter la présence de puissances hyperfréquences dans un système [8].

I.3.1.3 Avantages est inconvenants :

I.3.1.3.1 Avantage :

Sans pièces mobiles : Les dispositifs utilisant l'effet Seebeck sont robustes et nécessitent peu de maintenance [9].

Applications variées : Utilisé dans la mesure de température et la génération d'énergie, et permet la récupération de la chaleur perdue [10]

Fiabilité : Les dispositifs sont durables et fonctionnent de manière fiable dans diverses conditions [11]

I.3.1.3.2 Inconvénients :

Rendement faible : Les matériaux thermoélectriques actuels ont un rendement de conversion énergétique relativement bas [9].

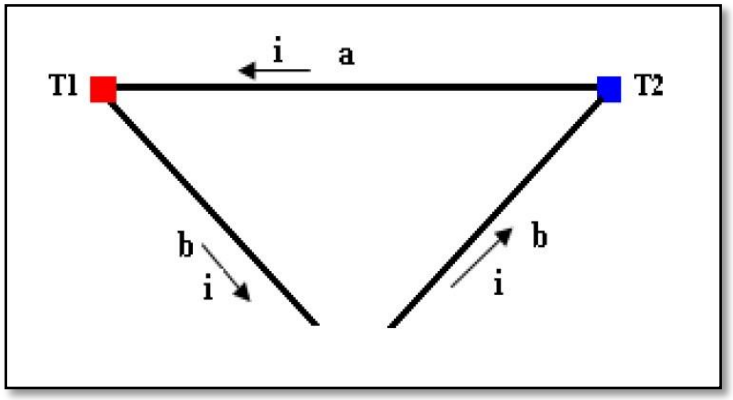
Matériaux coûteux : Les matériaux nécessaires peuvent être coûteux et nécessitent souvent des éléments rares ou des processus de fabrication complexes [11].

I.3.2 Effet de Peltier :

I.3.2.1 Définition :

Les effets Peltier sont des phénomènes thermiques qui se produisent lorsqu'un courant électrique traverse une jonction de deux métaux différents. En traversant cette jonction, le courant peut soit absorber de la chaleur (effet Peltier positif), soit en générer (effet Peltier négatif), selon les matériaux employés. Dans le domaine de la thermodynamique et de l'électronique, ces effets trouvent des applications significatives. [12]

En 1834, le physicien français Jean-Charles Peltier a découvert les effets Peltier. Depuis, ces effets ont fait l'objet d'études approfondies et ont été utilisés dans de multiples domaines, tels que la mesure de température, le refroidissement de composants électroniques et la production d'électricité à partir de sources de chaleur résiduelle. [13].



I.3.2.2 Domaine d'application :

Les dispositifs utilisant l'effet Peltier, souvent appelés dispositifs thermoélectriques ou modules Peltier, sont utilisés dans diverses applications, notamment :

Refroidissement électronique **:** Utilisés pour refroidir les composants électroniques sensibles comme les processeurs d'ordinateur, les diodes laser, et autres dispositifs nécessitant une gestion thermique précise [1].

Appareils portatifs de refroidissement : Utilisés dans les glacières portables pour refroidir des aliments et des boissons sans utiliser de réfrigérants classiques [1].

Équipement médical et scientifique : Utilisés pour réguler la température dans certains appareils médicaux et de laboratoire, tels que les cycles thermiques pour la synthèse d'ADN [14].

Industrie automobile : Utilisés dans les systèmes de climatisation des sièges pour améliorer le confort des passagers en régulant la température des sièges [2].

Applications spatiales : Utilisés pour réguler la température des composants des vaisseaux spatiaux, équilibrant les effets de la lumière solaire sur les différentes parties du vaisseau [1].

I.3.2.3 Avantages et inconvénients :

I.3.2.3.1 Avantage :

Pas de pièces mobiles **:** Ce qui réduit les risques de défaillance mécanique et la nécessité d'entretien [1].

Silencieux : Opèrent sans bruit, ce qui les rend idéaux pour des applications où le silence est crucial [2].

Réversibilité : La même unité peut fonctionner comme un dispositif de chauffage ou de refroidissement en inversant simplement le courant [14].

Environne mentalement favorable : N'utilisent pas de réfrigérants chimiques, ce qui les rend plus écologiques [3].

I.3.2.3.2 Inconvénients :

Efficacité faible : Comparés aux systèmes de refroidissement traditionnels, les dispositifs Peltier ont une efficacité relativement faible et génèrent beaucoup de chaleur résiduelle qui doit être dissipée [2].

Consommation d'énergie : Nécessitent une quantité significative d'énergie électrique pour fonctionner, ce qui peut les rendre coûteux pour les applications à grande échelle [14].

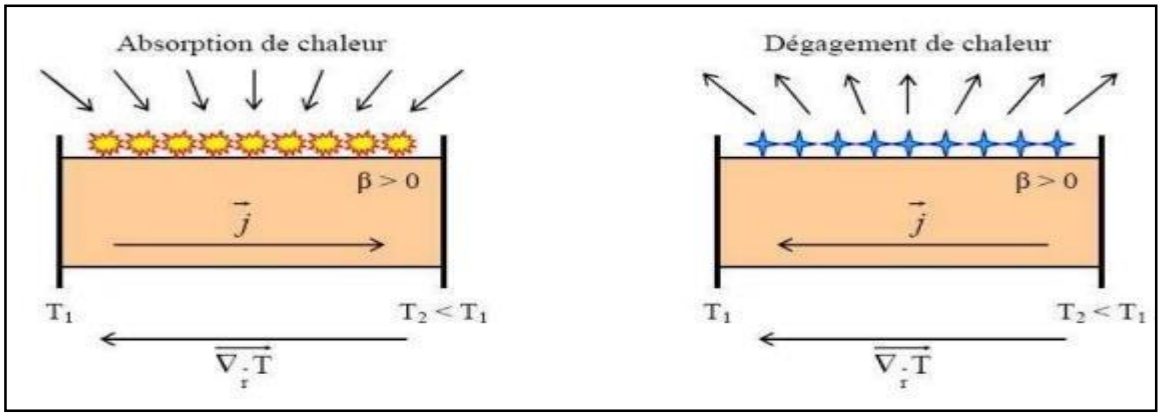
Condensation : Si les composants sont refroidis trop intensément, cela peut entraîner de la condensation, ce qui pourrait provoquer des court-circuites [1].

I.3.3 Effet de Thomson :

I.3.3.1 Définition :

Le physicien William Thomson a découvert en 1851 que les effets Seebeck et Peltier sont étroitement liés. Cette correspondance est mise en évidence lorsqu'un gradient de température et un courant électrique sont appliqués en même temps.

Quand le courant se déplace dans l'autre sens de la différence de température, il absorbe de la chaleur dans l'extérieur. Au contraire, lorsque le matériau est exposé à des variations de température et à des flux de chaleur, un courant sera produit. La principale distinction avec les deux premiers effets réside dans le fait que celui-ci ne concerne qu'un seul matériau et ne requiert pas de connexion. Autrement dit, l'effet Thomson désigne la consommation ou la libération de chaleur par unité de temps lorsque le courant I traverse une zone de matériau avec un gradient de température. Au sein de chaque section du matériau. [15]



Le gradient de flux thermique est donnée par :

$$\frac{dQ}{dx} = \tau . I . \frac{dT}{dx} \qquad \text{(I.1)}$$

I.3.3.2 Domain d'application :

L'effet Thomson est principalement utilisé pour comprendre et améliorer les performances des dispositifs thermoélectriques. Il est pertinent dans la conception et l'optimisation des matériaux pour les générateurs thermoélectriques et les refroidisseurs thermoélectriques. En analysant l'effet Thomson, les ingénieurs peuvent améliorer l'efficacité énergétique et la gestion thermique dans des applications telles que les réfrigérateurs, les climatiseurs, et les systèmes de récupération d'énergie [1].

I.3.3.3 Avantages est inconvenants :

I.3.3.3.1 Avantage :

Optimisation Thermique : L'étude de l'effet Thomson permet de mieux comprendre et optimiser la gestion thermique dans les systèmes électroniques et thermoélectriques.

Efficacité Énergétique : En utilisant les propriétés de l'effet Thomson, les dispositifs peuvent être conçus pour maximiser l'efficacité énergétique, particulièrement dans les systèmes de récupération d'énergie et les dispositifs de refroidissement [14].

I.3.3.3.2 Inconvénients :

Complexité des Matériaux : L'application de l'effet Thomson nécessite des matériaux spécifiques et souvent coûteux qui ont des propriétés thermoélectriques appropriées.

Gestion des Dégradés de Température : La mise en œuvre pratique de l'effet Thomson peut être compliquée par la nécessité de maintenir des gradients de température précis et stables le long des conducteurs [3].

I.4 Les coefficients thermoélectriques :

I.4.1 Coefficient Seebeck :

Les jonctions de deux matériaux a et b présentent une différence de température dT , ce qui entraîne une différence de potentiel électrique dV , selon :

$$S_{ab} = \frac{dV}{dT} \qquad \text{(I.2)}$$

Le coefficient Seebeck, également connu sous le nom de "puissance thermoélectrique", est exprimé en $V.K^{-1}$ (ou plus généralement en $\mu V/K$ en fonction des valeurs de ce coefficient dans les matériaux courants).

Les coefficients Seebeck des deux matériaux sont reliés au coefficient Seebeck du couple selon:

$$S_{ab} = S_a - S_b \qquad \text{(I.3)}$$

I.4.2 Coefficient Peltier :

L'effet Peltier se produit lorsque l'on impose un courant électrique I à un circuit constitué de deux matériaux, ce qui provoque une libération de chaleur Q à une jonction et une absorption de chaleur à l'autre jonction, selon :

$$\pi_{ab} = \frac{Q}{I} \qquad \text{(I.4)}$$

I.4.3 Coefficient Thomson :

On peut déterminer directement le coefficient Thomson pour un matériau unique. Quand un gradient de température et un courant électrique sont présents en même temps, chaque segment de matériau pris individuellement est chauffé ou absorbé. On peut donc calculer le gradient de flux thermique au sein du matériau en utilisant :

$$\frac{dQ}{dx} = \tau.I.\frac{dT}{dx} \qquad \text{(I.5)}$$

Où x est la coordonnée spatiale et τ est le coefficient Thomson du matériau.

I.4.4 Les relations de Kelvin :

Les trois effets Seebeck, Peltier et Thomson sont liées entre eux par les relations de Kelvin suivantes :

$$S_{ab} = \frac{\pi_{ab}}{T} \quad \text{(I.6)}$$

$$\tau_a - \tau_b = T\frac{dS_{ab}}{dT} \quad \text{(I.7)}$$

I.5 Les grandeurs physiques :

I.5.1 Facteur de mérite (ZT) :

Le facteur de mérite (ZT) permet de déterminer si le matériau possède de bonnes caractéristiques thermoélectriques ou non.

Le matériau est meilleur lorsque le facteur de mérite est élevé.

Lorsqu'un matériau possède un pouvoir thermoélectrique élevé, c'est-à-dire une conductivité électrique élevée et une conductivité thermique faible, il est considéré comme bon. Les matériaux les plus récents ont des ZT légèrement plus élevés que 1. Les modules thermoélectriques ont donc des rendements de conversion de 7 à 15 %, ce qui signifie que 7 à 15 % de la chaleur qui traverse le module est convertie en électricité ou que 7 à 15 % de l'électricité qui passe dans le module sert à réfrigérer [17].

Ce paramètre ne repose que sur les caractéristiques des matériaux : un matériau approprié pour la production de chaleur est donc également approprié pour la réfrigération [16].

I.5.2 La conductivité électrique σ

Le coefficient de conductivité électrique évalue la capacité d'un matériau à transporter un courant électrique et est l'opposé de la résistivité électrique ρ . Cette mesure est représentée en S/m et est donnée par l'équation. À température ambiante, la conductivité électrique d'un semi-conducteur peut fluctuer entre 10^{-6} et10^{4} S/m

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = ne\mu \quad \text{(I.8)}$$

Avec μ , la mobilité des porteurs de charge.

La mobilité s'exprime en $m^2/V.S$ et dépend de la charge élémentaire, de la masse effective et du temps moyen τ entre deux collisions de charges selon la relation :

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*} \quad \text{(I.9)}$$

Dans le cas des semi-conducteurs, la conduction électrique ne se fait que lorsque l'énergie est suffisante pour franchir la bande interdite. Cela peut être mis en relation avec la concentration de porteurs de charge et la largeur de la bande interdite :

$$n = N_0 \exp\left(\frac{-\mathrm{E}_G}{2K_B T}\right) \quad \text{(I.10)}$$

Où N_0 est le nombre d'états possibles par unité de volume et E_G est la largeur de la bande interdite du semi-conducteur.

Il y a deux voies principales pour améliorer la conductivité électrique, soit en augmentant la concentration de porteurs de charge (en diminuant la largeur de la bande interdite par exemple), soit en augmentant largement la mobilité. Ces voies sont cependant contradictoires avec l'amélioration du coefficient Seebeck [18].

I.5.3 La conductivité thermique k

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transférer de la chaleur en réponse à un gradient thermique. Ce transfert de chaleur est permis grâce à deux contributions : la conductivité thermique électronique qui s'effectue par déplacement des charges et la conductivité thermique de réseau qui s'effectue par les vibrations du réseau appelées aussi phonons. La conductivité thermique k est la somme de ces deux contributions :

$$k = k_e + k_r \quad \text{(I.11)}$$

Avec k_e et k_r respectivement les conductivités thermiques électroniques et de réseau.

La conductivité thermique électronique est reliée à la conductivité électrique par la loi de Wiedemann-Franz selon la relation suivante :

$$K_e = L_0 \sigma T = ne\mu L_0 T$$

Où L_0 est une constante appelée « nombre de Lorenz » et vaut entre $1,6.10^{-8}$ Et $2,4.10^{-8}$ $J^2/K^2.C^2$ Selon la dégénérescence du semi-conducteur.

Cette dernière équation montre la dépendance de la conductivité thermique électronique à la concentration de porteurs de charge.

Cette conductivité thermique et la conductivité électrique augmentent ou diminuent toutes deux avec une variation de la concentration de porteurs, or, ces deux grandeurs agissent de manière opposée sur le ZT.

Pour sa part, la conductivité thermique due aux phonons k_r est donnée par :

$$K_r = \frac{Cv_s 1_{ph}}{3} \qquad \text{(I.12)}$$

Où C est la chaleur spécifique des phonons par unité de volume, V_s est la vitesse moyenne des phonons et l_{ph} est le libre parcours moyen des phonons.

Cette composante de la conductivité thermique ne dépend pas de la concentration de porteurs de charge, mais elle est influencée par plusieurs facteurs tels que la structure cristalline et les paramètres du réseau : elle peut donc en principe être modifiée sans affecter le facteur de puissance. La plus grande partie de la chaleur est transportée par les phonons acoustiques [18].

I.6 Conception d'un élément Peltier :

I.6.1 Thermocouple :

Le thermocouple est la partie la plus petite d'un élément thermique. Son composant est constitué de deux conducteurs électriques ayant des coefficients Seebeck très différents pour produire une tension thermoélectrique maximale. En règle générale, les matériaux employés sont des blocs de semi-conducteurs reliés à leurs extrémités par du cuivre. À ce jour, le tellurure de bismuth (Bi2Te3) avec des dopages de type n et p est le matériau le plus approprié pour la température ambiante [19].

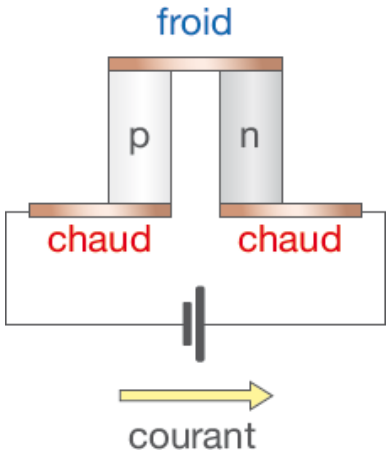


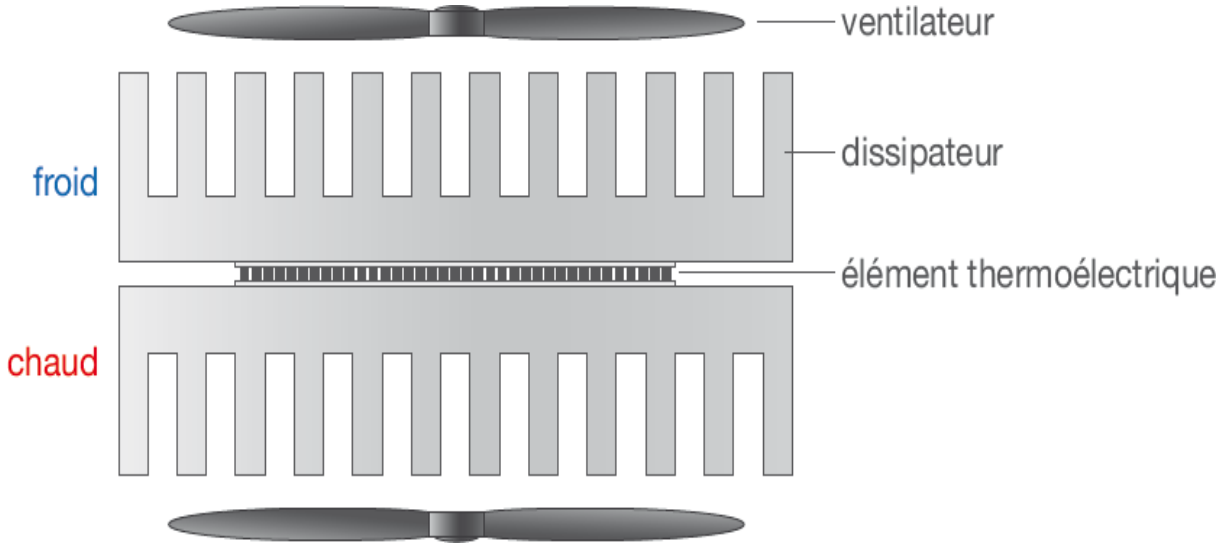
Figure I.4: thermocouple [19]

I.6.2 Elément thermique :

Les éléments Peltier actuels sont composés d'un grand nombre de thermocouples reliés électriquement en série par des ponts de cuivre. Des plaques de céramiques (généralement de l'oxyde d'aluminium) isolent thermiquement les ponts de cuivre, mais électriquement les uns des autres.

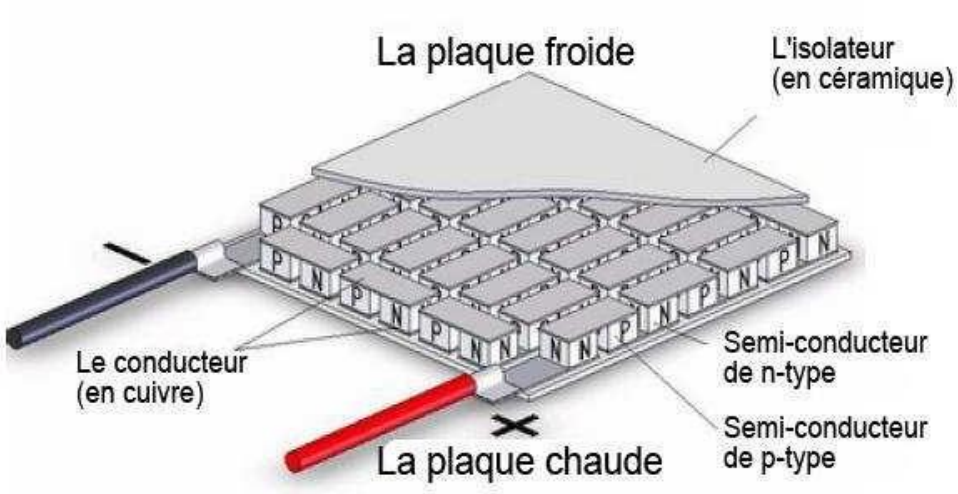
I.6.3 Module Peltier :





Le module Peltier commercial est illustré dans la **figureI.5**, il est constitué d'un ou plusieurs éléments Peltier et est relié thermiquement à des dissipateurs de chaleur. Les éléments Peltier sont irréversiblement transformés en chaleur par la puissance électrique utilisée pour pomper, ce qui nécessite une dissipation efficace. En outre, les éléments Peltier transfèrent la chaleur d'un côté à l'autre de manière réversible en fonction de la direction du courant. Ainsi, la chaleur est recueillie d'un côté, mais beaucoup moins que celle émise de l'autre. Il est donc nécessaire d'échanger la chaleur à travers des dissipateurs de chaleur placés de part et d'autre de l'élément Peltier. On utilise des ventilateurs pour éliminer l'air chaud ou refroidi [20], comme illustré dans la **FigureI.6**.

Il est nécessaire d'avoir un isolant électrique, généralement en céramique, pour prévenir tout court-circuit électrique entre le module et la source de chaleur. La conductivité thermique de l'isolant doit être élevée afin de réduire le gradient de température entre la source et le conducteur [20]. La **figure I.7** illustre les éléments constitutifs d'un élément Peltier :



I.6.4 Fonctionnement physique du module thermoélectrique :

Le principe de l'effet thermoélectrique est montré dans la **figure I.8** :

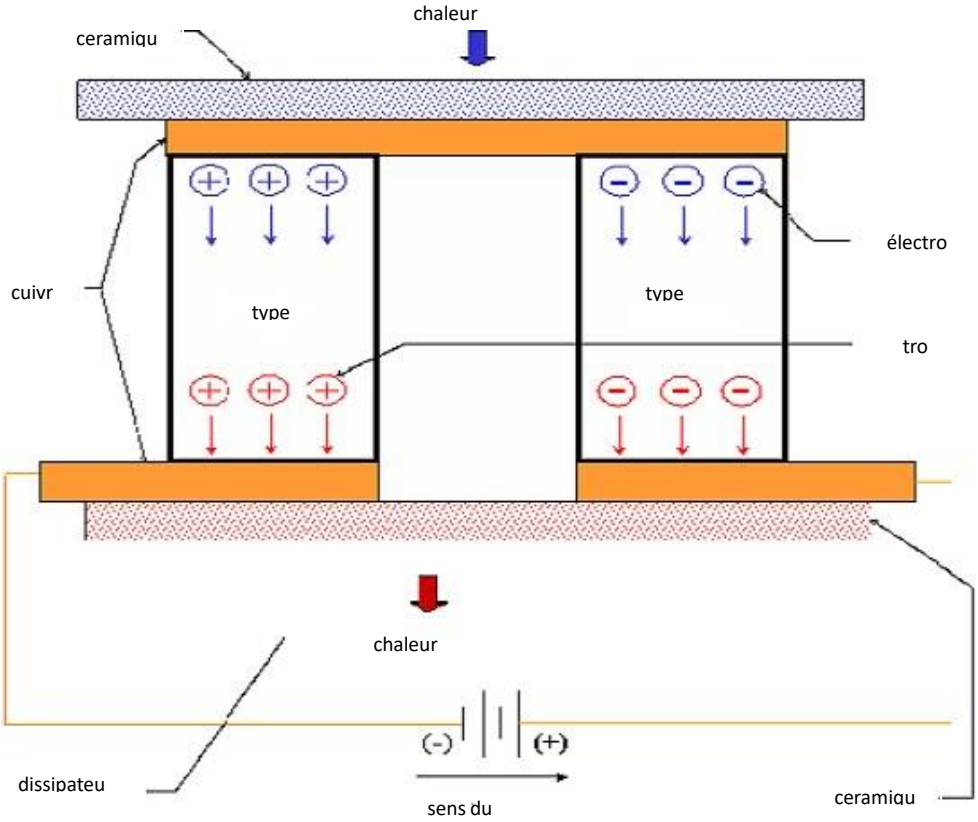


Figure I.8:Schéma de principe de l'effet Peltier [21]

Les électrons ont la possibilité de se déplacer librement dans les conducteurs en cuivre, mais pas autant dans le semi-conducteur. En quittant le cuivre et entrant dans la partie chaude du type p, les électrons doivent faire un "trou" afin de pouvoir se déplacer à travers ce type p. Lorsqu'ils remplissent un trou, ils se retrouvent à un niveau d'énergie inférieur et libèrent de la chaleur pendant le processus[21]. Par la suite, lors de la transition des électrons du type p vers le conducteur en cuivre du côté froid, il retrouve un niveau d'énergie plus élevé et absorbent de la chaleur supplémentaire. Les électrons se déplacent ensuite librement dans le cuivre jusqu'à ce qu'ils atteignent le côté froid du semi-conducteur de type n. En cas d'entrée des électrons dans le type n,Il est nécessaire d'accroître l'énergie afin de se déplacer dans le semi-conducteur. L'absorbation de la chaleur se produit alors. Finalement, à partir du côté chaud du type n, les électrons peuvent se déplacer librement dans le cuivre. Ils se réduisent à un niveau d'énergie plus bas et produisent de la chaleur pendant le processus. Le côté opposé à la source de chaleur est appelé le côté froid, tandis que le côté opposé à la chaleur rejetée est appelé le côté chaud [21].

I.7 Performances d'un dispositif thermoélectrique :

Les performances d'un dispositif thermoélectrique sont définies de manière similaire aux systèmes thermodynamiques conventionnels. Pour la réfrigération, on introduit un coefficient de performances (COP) défini par le rapport entre la quantité de chaleur absorbée du côté froid sur la quantité de travail fournie par le générateur électrique externe.

Dans le cas d'un dispositif configuré pour la génération d'électricité, c'est le rendement qui quantifie la performance du système. Il est défini par le rapport du travail électrique que l'on génère dans une charge externe sur la quantité de chaleur qui doit être fournie du côté chaud.

Dans les deux cas, on montre que les performances dépendent non seulement de la différence de température entre le côté chaud et le côté froid mais également du facteur de mérite du couple ZT_{np} de matériaux n et p. Ce facteur est uniquement fonction des propriétés de transport de ces derniers

$$ZT_{np} = \frac{\left(s_p - s_n\right)^2}{\left[\left(\rho_p \lambda_p\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\rho_n \lambda_n\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2} \qquad \text{(I.13)}$$

Une analyse détaillée des performances des dispositifs en fonction de ce facteur montre que le facteur de mérite est le paramètre clé à optimiser pour maximiser le coefficient de performance ou le rendement du dispositif thermoélectrique. Par analogie avec cette relation, le facteur de mérite adimensionnel ZT d'une seule branche du dispositif est donné par la relation

$$ZT = \frac{S^2 T}{\rho\lambda} = \frac{FT}{\lambda} \qquad \text{(I.14)}$$

Où T est la température et $F = \frac{S^2}{\rho}$ est le facteur de puissance.

I.8 Critères d'optimisation d'un dispositif thermoélectrique :

Malgré l'amélioration significative des performances des matériaux conventionnels, le facteur de mérite ZT de la plupart des matériaux thermoélectriques reste généralement restreint à des valeurs proches de 1. Pour optimiser ces valeurs, différentes approches peuvent être envisagées et cherchent principalement à découpler les caractéristiques électriques et thermiques afin de pouvoir les optimiser individuellement.

Génération et refroidissement thermoélectrique :

On peut classer les applications thermoélectriques en fonction de la direction de la conversion d'énergie. Tandis que les dispositifs de refroidissement/chauffage thermoélectriques (TEC) utilisent l'effet Peltier, l'effet Seebeck est responsable de la transformation des gradients de température en tension électrique, c'est-à-dire la génération de courant (TEG).

I.8.1 Générateur de courant (TEG) :

Autrement dit, pour produire de l'électricité, les machines à grande échelle qui émettent de la chaleur perdue peuvent utiliser des générateurs thermoélectriques pour transformer l'énergie thermique en énergie électrique en réintroduisant l'énergie thermique dans le système, ce qui améliore l'efficacité. Dès lors, il est possible de produire du potentiel électrique (effet Seebeck) en appliquant un gradient de température à travers le matériau. Il est composé de paires thermoélectriques, des circuits qui sont constitués de deux semi-conducteurs distincts reliés en chaîne. Classification des semi-conducteurs n et p.Les électrons en excès du semi-conducteur n sont classés comme ayant une énergie thermique négative. Les semi-conducteurs de type P sont considérés comme ayant une énergie thermique positive en raison de leur manque

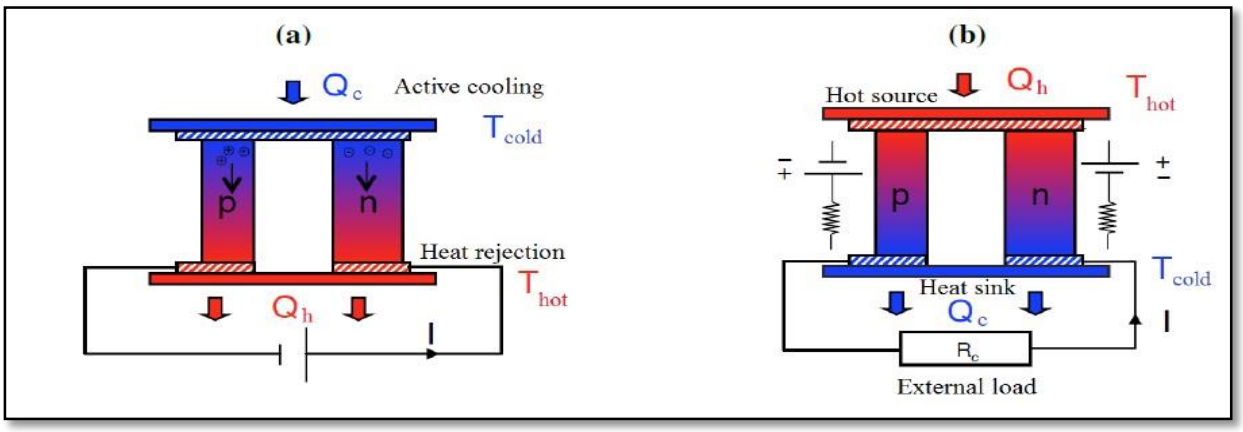
d'électrons (trous en augmentation). Quand plusieurs intersections de semi-conducteurs sont conservées à des températures différentes (T_c et T_h), cela entraîne l'apparition d'un potentiel de différence (ΔV). Créez une circulation de résultats (I) Effectivement, le module thermoélectrique est fabriqué en série d'un point de vue électrique et en parallèle d'un point de vue thermique, ce qui permet d'accroître encore le potentiel électrique et donc le courant. Ainsi, ces composants sont employés afin de fabriquer des générateurs thermoélectriques TEG (générateurs thermoélectriques).

Les bénéfices de la production d'électricité grâce à l'effet thermoélectrique incluent la fiabilité, la longévité et la petite taille des appareils. En raison de la flexibilité des dimensions du générateur thermoélectrique, il est aisé de produire de l'électricité en exploitant des sources de chaleur déjà utilisées [24].

I.8.2 Refroidissement thermoélectrique :

Le fonctionnement du dispositif de refroidissement thermoélectrique (TEC) repose sur l'effet Peltier décrit dans l'introduction. Une circulation de courant dans un circuit fermé composé de deux matériaux distincts entraîne un écart de température à travers les connexions. Le matériau semi-conducteur est disposé entre deux plaques conductrices dans les refroidisseurs thermoélectriques en vrac. Le transfert de chaleur est effectué par les porteurs de charge, en raison des énergies requises pour leur mouvement dans le matériau semi-conducteur et le matériau conducteur. La direction du courant thermique est identique à celle des porteurs de charge, comme illustré dans la figure ci-dessous.

Et afin de mieux appréhender le principe. La représentation graphique suivante illustre le passage du courant (I) du semi-conducteur de type n au semi-conducteur de type p. La température à la jonction froide (T_c) baisse et la chaleur est absorbée par l'environnement environnant. Il y a absorption de chaleur (refroidissement) car les électrons passent d'un niveau d'énergie plus bas dans le semi-conducteur de type P à un niveau d'énergie plus élevé dans le semi-conducteur de type n. Le matériau semi-conducteur à la liaison thermique (T_h) absorbe de la chaleur grâce au transport d'électrons. La chaleur est ensuite dissipée lorsque les électrons retournent au niveau d'énergie inférieur du type P semi-conducteur [24].



I.8.3 Les équations de la thermo réfrigération :

En utilisant l'effet Peltier, notre dispositif est donc gouverné par les équations suivantes qui décrivent le comportement thermoélectrique en refroidissement d'un système TEC, également connu sous le nom de "refroidissement thermoélectrique » [27] :

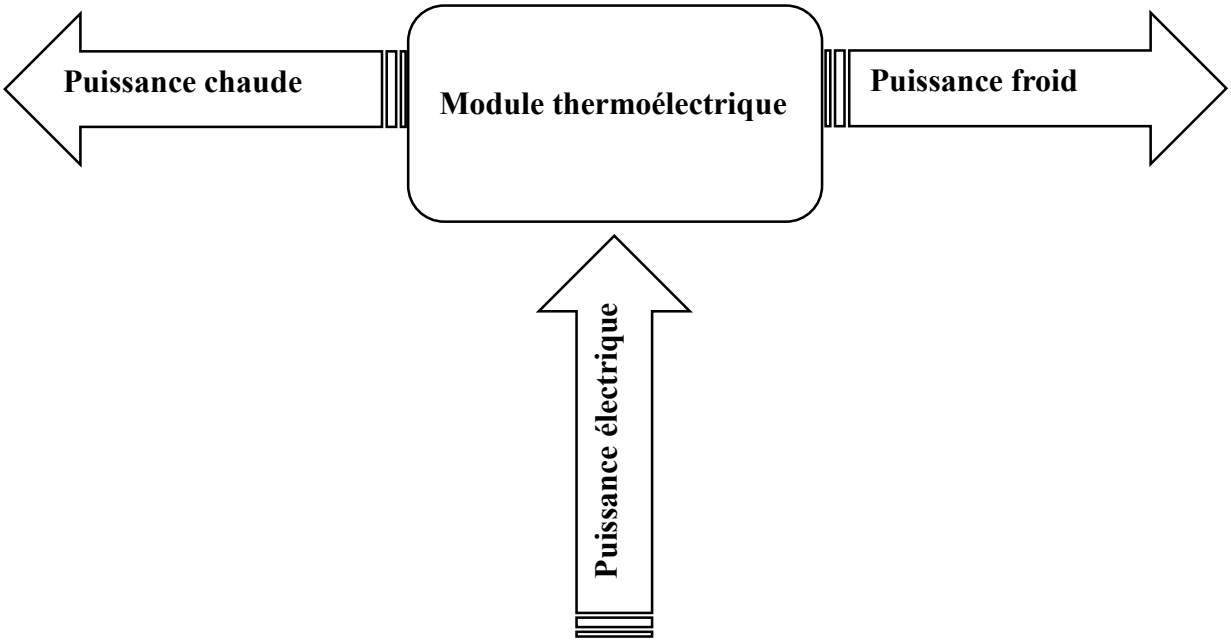


Figure I.10: schéma illustrant l'effet thermoélectrique de refroidissement

Par conséquent, TEC agit comme un dispositif solide qui peut pomper la chaleur d'une jonction à l'autre jonction lorsqu'un courant est appliqué, Les flux de chaleur $\alpha.I.T_c$ et $\alpha.I.T_f$

Provoqués par l'effet Peltier sont absorbés à la jonction froide et libérés de la jonction chaude, respectivement. Le chauffage de Joule $\frac{1}{2}.R.I$ dû au flux de courant électrique à travers le matériau est généré à la fois à l'intérieur des pieds TEC et au niveau des surfaces de contact entre les pieds TEC et les deux substrats. Le TEC fonctionne entre les températures T_c et T_f , de sorte que la conduction thermique $k\left(T_c - T_f\right)$ se produit à travers les jambes TEC d'après la lois de Ioffe .[28]

Puissance généré coté chaud : le côté chaud du Peltier est caractérisé par l'équation suivante

$$Q_c = \alpha_m.I.T_c + \frac{1}{2}R_m I^2 - k_m\left(T_c - T_f\right) \quad \text{(I.15)}$$

Puissance absorbé coté froid : le côté froid du Peltier est caractérisé par l'équation suivante

$$Q_f = \alpha_m.I.T_f - \frac{1}{2}R_m I^2 - k_m\left(T_c - T_f\right) \quad \text{(I.16)}$$

Puissance électrique : la puissance consommée par le module thermoélectrique

$$P_e = P_c - P_f = \alpha_m.I\left(T_c - T_f\right) + R_m I^2 \quad \text{(I.17)}$$

Le COP est défini comme le rapport entre la chaleur absorbée à la jonction froide et lapuissance totale absorbée par le TEC il est donné par :

$$COP = \frac{Q_f}{P_e} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f} \quad \text{(I.18)}$$

I.8.4 Exemples d'applications :

I.8.4.1 Génération d'électricité :

Depuis longtemps, les générateurs thermoélectriques (TEG) utilisent le principe décrit précédemment pour produire de la puissance électrique, allant des puissances de basse puissance (microwatts) aux puissances de haute puissance (quelques kilowatts), à partir de sources de chaleur.

I.8.4.1.1 Les petits réchauds à bois :

En 2011, Biolite a lancé la vente de petits poêles à bois performants avec une structure spécifique. L'appareil produit 2 W de puissance à une tension de 5 V [25].



I.8.4.2 Pour la réfrigération thermoélectrique :

I.8.4.2.1 Réfrigération thermoélectrique petites enceintes :

En règle générale, il y a différents types d'équipements de réfrigération thermoélectrique : par exemple, les réfrigérateurs thermoélectriques légers. L'étude des réfrigérateurs domestiques et portables a été approfondie. Malgré une efficacité thermodynamique de seulement 1% par rapport au système de réfrigération à compression de vapeur, le réfrigérateur thermoélectrique présente les avantages suivants : le système est plus écologique, plus silencieux, plus puissant et plus précis dans le contrôle de la température. Il est possible d'intégrer les réfrigérateurs thermoélectriques dans une unité avec un espace restreint. Les appareils de refroidissement thermoélectrique portables offrent de nombreuses possibilités d'utilisation en plein air et peuvent être équipés de batteries ou de panneaux solaires photovoltaïques. [26]



I.9 Matériaux thermoélectriques :

De nombreux matériaux peuvent être employés dans le domaine de la thermoélectricité. Les matériaux classiques et les nouveaux matériaux ont été identifiés au fil des années en raison de la découverte de nouvelles méthodes pour améliorer les performances, ainsi que récemment en raison de restrictions d'utilisation de certains éléments tels que le plomb.

I.9.1 Les matériaux conventionnels :

Les matériaux thermoélectriques classés en trois grands ensembles, ceux qui ont été étudiés depuis les débuts de la thermoélectricité, sont ceux qui correspondent aux gammes de température où leur facteur de mérite est le plus élevé [29]. Trois niveaux de température peuvent être distingués :

I.9.1.1 Les matériaux pour les basses températures et autour de la température ambiante :

Pour les basses températures (de l'ambiante jusqu'à ~ $450\,K$), le matériau le plus utilisé actuellement en réfrigération thermoélectrique est à base de bismuth et de tellure Bi2Te3, de meilleures performances sont obtenues lorsqu'il est combiné à Sb2Te3 ou Bi2Se3. Les alliages à base de bismuth et d'antimoine sont les meilleurs matériaux thermoélectriques de type n. Il n'existe pas de bon matériau de type p à très basse température. Le meilleur facteur de mérite ZT obtenu est de 1,1 à $\pm 50\ K$ autour de la température ambiante, avec un coefficient Seebeck S ~225 $\mu.V.K^{-1}$, une conductivité électrique σ ~$105\,\Omega^{-1}.m^{-1}$ et une conductivité thermique κ ~1,5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [32]. Au-delà de $450\,K$, les composés à base de Bi2Te3 ne sont plus stables chimiquement.

I.9.1.2 Les matériaux pour les températures intermédiaires :

Pour une utilisation à moyenne température (550 K -750 K à peu près), le matériau le plus utilisé est le tellure de plomb PbTe et ses dérivés (PbSn) Te (Sn = étain). Les deux composés PbTe et SnTe peuvent former une solution solide complète ce qui permet d'optimiser le gap (bande interdite du semi-conducteur) à la valeur désirée. Les meilleurs matériaux obtenus ont des facteurs de mérite proches de l'unité autour de 700 K [32]. Cependant, ces valeurs sont obtenues uniquement dans les matériaux de type n. Le PbTe ne peut donc à l'heure actuelle constituer à lui seul les deux branches d'un thermo-élément. Alors, la branche p est donc généralement constituée d'un matériau de type TAGS (Tellure-Antimoine-Germanium-Argent), qui lui permet d'obtenir des facteurs de mérite supérieurs à l'unité à 700 K uniquement en type p [33]. Il nécessaire de développer un nouveau matériau qui peuvent être utilisé à la fois en type p et en type n pour les températures intermédiaires. Il est en effet plus facile industriellement d'utiliser le même type de matériau pour les deux branches (et cela permettrait de plus d'éliminer le tellure fortement toxique). [34]

I.9.1.3 Les matériaux pour les hautes températures :

Les alliages utilisés lors des températures élevées sont composés de silicium et de germanium (SiGe). Il s'agit d'un alliage similaire qui a été employé par les sondes spatiales pour les alimenter en électricité. Ces matériaux présentent des caractéristiques thermoélectriques satisfaisantes au-delà de 1000 K [35,36].

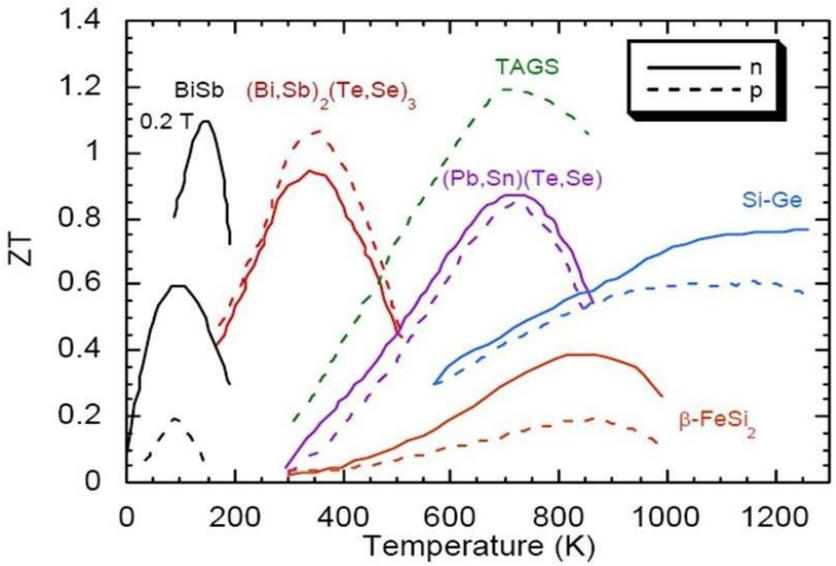


Figure I.13: Evolution du facteur de mérite de différents matériaux conventionnels en fonction de la température [37].

I.9.2 Nouveaux matériaux thermoélectriques :

Ces dernières années ont vu un développement important de nouveaux matériaux thermoélectriques Ces nouveaux matériaux sont des matériaux intermétalliques qui sont représentés par les familles suivants :

I.9.2.1 Les Skutterudites :

Ce sont les sujets les plus analysés depuis 10 ans. Ils ont été repérés par Oftedahl en 1928. Les skutterudites sont un groupe de composants binaires de composition MX3, où M est un atome métallique (comme le cobalt (Co), le rhodium (Rh) ou l'iridium (Ir)) et X est un atome pnitogène (comme le phosphore (P), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb). La présence de deux espaces vides dans leurs structures permet d'introduire des espèces dans le réseau. Grâce à ce remplissage, la conductivité électrique et thermique sont modifiées, ce qui permet d'augmenter le facteur de puissance ZT (jusqu'à 1,4) [38].

I.9.2.2 Les clathrates:

Les clathrates sont de nouveaux matériaux qui ont un potentiel thermoélectrique élevé. Les solides inorganiques, généralement constitués d'intermétallures, sont des solides périodiques avec des nanocages dans lesquelles on peut introduire des atomes lourds (comme des terres rares, alcalino-terreux). En remplissant les cages, la conductivité thermique diminue jusqu'à atteindre des valeurs similaires à celles du verre ou de la silice.

Toutefois, il est nécessaire de transformer les clathrates afin de les transformer en semis conducteurs[39].

I.9.2.3 Les Oxydes :

Les études menées sur les oxydes remontent à 1997, année où le matériau thermoélectrique a été découvert. Ils ont une stabilité chimique particulièrement remarquable dans une atmosphère oxydante. Le coefficient de Seebeck de nombreux oxydes est élevé ($S>100\mu V.K^{-1}. m^{-1}$) et leur conductivité thermique est faible ($K \approx 1w. K^{-1}. m^{-1}$), cependant, leur utilisation est restreinte par leur forte résistance électrique. Les oxydes p (à base de cobalt) ont une grande capacité thermoélectrique et un facteur de mérite d'environ un. Les oxydes de type n présentent actuellement un ZT inférieur à 1.

I.9.2.4 Les semis Heuslers :

Les réseaux cubiques faces centrées interpénétrées sont constitués de 4 sous-réseaux, dont l'un est remplacé par un sous-réseau de lacunes. Cela encourage la propagation de phonons, ce qui

réduit la conductivité thermique. Même si le produit S2 σ est extrêmement élevé, que ce soit en type n ou p, sa K demeure encore trop élevée [40].

I.9.2.5 Les polymères :

En général, les matériaux polymères sont employés en raison de leurs caractéristiques mécaniques spécifiques et de leur facilité d'utilisation. Leur structure est étroitement liée à ces qualités et il est envisageable, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'en imaginer la morphologie et les propriétés qui s'y rattachent. Le but de ce chapitre est de présenter les principaux concepts généraux concernant les polymères, notamment le polystyrène [41].

Dans le domaine de la thermoélectricité, les polymères qui présentent de bonnes propriétés de conduction électronique suscitent l'intérêt.

En outre, les polymères sont réputés pour leur faible capacité à conduire la chaleur. En raison de leur composition, ces matériaux sont destinés à être utilisés à température ambiante. Le PEDOT, parmi les divers polymères conducteurs, fait l'objet de nombreuses recherches. Son coefficient Seebeck est élevé et ses conductivités thermiques sont faibles.

Toutefois, la conductivité électrique de ces matériaux est également faible, ce qui a un impact sur leurs performances [42].

I.10 Conclusion :

Ce chapitre a présenté une introduction aux systèmes thermoélectriques et à leur application dans les réfrigérateurs thermoélectriques. Les systèmes thermoélectriques offrent une technologie alternative pour la réfrigération, avec des avantages spécifiques tels que la compacité et le silence. Cependant, leur faible efficacité énergétique limite leur application à des domaines précis. L'analyse du bilan thermique est essentielle pour optimiser la conception et les performances des réfrigérateurs thermoélectriques.

Chapitre II
Bilan Thermique

Introduction :

Dans ce chapitre, nous aborderons en détail les différents aspects liés au bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique. Ensuite, nous examinerons les principales sources de pertes et de gains de chaleur dans le système, en mettant l'accent sur les transferts thermiques à travers les éléments thermoélectriques, les dissipateurs de chaleur, les isolants et les interfaces thermiques.

Nous discuterons également des méthodes de mesure et de modélisation du bilan thermique, en mettant en évidence les principaux paramètres à prendre en compte.

II.1.Transfert de chaleur :

Le transfert thermique est, en général, le résultat d'une variation de température entre deux corps. En effet, le corps le plus chaud se réchauffe naturellement du corps le plus froid jusqu'à ce que leur température soit égale. De manière physique, il s'agit d'un flux de chaleur qui se déplace en transférant de l'énergie thermique de molécule à molécule proche. On peut comparer le flux de chaleur à un débit, qui est exprimé en Watt (ou joules/s).

II.1.1.Modes de transfert de chaleur :

Il existe trois processus de transfert thermique :

— La conduction.

— La convection.

— Le rayonnement.

II.1.1.1.Conduction :

Il s'agit d'un mécanisme physique qui permet de transférer la chaleur d'un environnement matériel (solide, liquide, gaz) à un environnement froid en utilisant des mécanismes à l'échelle microscopique (vibration atomique ou moléculaire).

La conduction est le seul moyen de transmettre la chaleur au sein d'un solide.

II.1.1.2.Convection :

Il s'agit d'un processus physique de transfert de chaleur qui repose sur un environnement matériel où la matière se déplace. Il est donc impossible d'obtenir de convection que dans les liquides et les gaz..

II.1.1.3.Rayonnement :

Par leur surface, les corps émettent de l'énergie sous forme d'un rayonnement d'onde électromagnétique, ce qui augmente leur température. En revanche, lorsqu'ils sont exposés à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en thermique.

Le rayonnement est une manière physique de transmettre la chaleur sans l'utilisation de matériaux.

II.1.1.4.Isolation thermique de réfrigérateur :

Les matériaux d'isolation thermique sont capables de résister au flux d'énergie. Les réfrigérateurs sont fabriqués avec ces matériaux pour créer une barrière qui empêche le transfert d'énergie et maintient la bonne température à l'intérieur. D'un point de vue économique, il s'agit de la meilleure option pour économiser de l'énergie. Il est donc essentiel de choisir les matériaux qui seront utilisés lors de la construction du réfrigérateur.

II.2.Choix de l'isolant :

Pour notre réfrigérateur, on a choisi l'isolant suivant:

Le Panneaux sandwich.

II.2.1.Panneaux sandwich :

L'utilisation de ces panneaux représente un grand progrès dans le secteur de la construction et de l'isolation, car ce produit allie plusieurs avantages, parmi lesquels nous pouvons distinguer :

- La modularité : ces panneaux sont faciles à transporter et à assembler.
- Ils offrent une âme à épaisseurs multiples et un revêtement en tôle métallique.
- Excellentes propriétés mécaniques.
- Magnifique barrière de vapeur.
- Haute résistance au passage de la chaleur.
- Finitions hygiéniques et sanitaires.
- Ils sont faciles à nettoyer et ils résistent aux attaques des micro-organismes.
- Leur coût est modéré.

L'isolation que nous avons choisie est une isolation à trois couches :

- Deux couches d'Acier galvanisé
- Et au centre une couche de Polyuréthane

II.2.1.1.Caractéristiques d'Acier galvanisé :

- **Résistance à la corrosion :** L'acier galvanisé est beaucoup plus résistant à la corrosion que l'acier non traité.
- **Durabilité :** L'acier galvanisé est un matériau solide et durable qui peut supporter des conditions climatiques extrêmes et des contraintes mécaniques importantes.
- **Adaptabilité :** L'acier galvanisé peut être facilement formé, soudé, découpé et

percé, ce qui le rend polyvalent pour une large gamme d'applications.

- **Rentabilité :** L'acier galvanisé est un matériau relativement peu coûteux.
- **Protection de l'environnement :** Le zinc est un élément recyclable, ce qui fait de l'acier galvanisé un choix écologique pour de nombreuses applications.

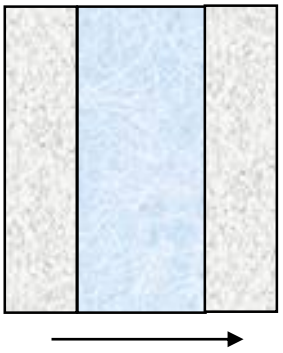
II.2.1.2.Caractéristiques du polyuréthane :

- Conductivité thermique très faible $\lambda = 0.024$ (w/m°c)
- Masse volumique faible.
- Bonne résistance mécanique et chimique.
- Non Toxique.
- Ininflammable.
- Inodore.
- Volume constant.
- Léger.
- Etanche à la vapeur d'eau.
- Disponible en Algérie.
- Moins chère.

II.2.2.Les parois :

Tableau II.1: Les valeurs (e, Ri, λ) de chaque Matériaux

paroi				
N°	Matériaux	e (m)	λ (W/m.K)	Ri (m^2.K/W)
01	Acier galvanisé	0.002	45	4.44×10^{-5}
02	Polyuréthane	0,056	0.024	2,41
03	Acier galvanisé	0.002	45	4.44×10^{-5}



II.3.Différents apports de chaleur :

Dans cette section, nous examinons les dépenses thermiques liées à la production de froid nécessaire afin de les compenser.

Ces charges thermiques sont classées en deux types : les charges thermiques provenant de l'extérieur (**Apports externes**) et les charges thermiques provenant de l'intérieur (**Apports internes**).

- La chaleur a dégagé par conduction des (parois, plafond, sol)
- La chaleur à dégager par introduction des produits à l'intérieur de la chambre
- La chaleur par respiration des produits
- La chaleur par renouvellement d'air
- La chaleur dégagée par l'introduction des personnels
- La chaleur dégagée par l'éclairage
- La chaleur dégagée par le ventilateur évaporateur
- La chaleur par ouverture des portes

II.4.Bilan frigorifique :

On va faire un inventaire de tout '' *Q* '' de la chaleur à évacuer dans la chambre froide pour le but de maintenir une température constante d'un produit quelconque.

Le but final :

- Calculer la puissance frigorifique de l'évaporateur
- Les différents types de quantité de chaleur a stocké
- Je dois connaitre le type de produit stocké
- Je dois connaitre le temps de stockage
- La chambre froide a réalisé par (panneaux
- La température entre (5℃ →10℃)

Base de calcul :

II.4.1.La chaleur a dégagé par conduction des (parois, plafond, sol) :

Le calcul s'effectue paroi par paroi à savoir les quatre parois verticales puis le plancher haut (toiture) et enfin le plancher bas.

La déperdition surfacique :

$$D_{S_T} = D_{paroi} + D_{sol} + D_{plafond} \quad \text{(II.1)}$$

$$D = k.S.\Delta T \quad \text{(II.2)}$$

Avec : $k = \frac{1}{R}$ et $R = \frac{1}{h_i} + \sum_{n=1}^{n} \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{n=1}^{n} + \frac{1}{h_e}} \quad \text{(II.3)}$$

Donc :

k : Coefficient de transmission thermique de la paroi considérée **(W/m².K)**.

S : Surface de la paroi considérée (m²).

ΔT : Différence de température entre les deux côtés de la paroi considérée (K).

Tableau II.2:Les valeurs (k, S, ΔT , D) de chaque paroi

Paroi	**Coefficient k (W/m².K)**	**Surface (m²)**	**différence de température (K)**	**D (W)**
Gauche	0,389	0,15	16	0,9336
Droite	0,389	0,15	16	0,9336
Arriére	0,389	0,1154	16	0,7182
Plaque (Al)	4,17	0,0096	16	0,64
Porte	0,389	0,125	16	0,0778
plafond	0,389	0,075	16	0,4668
sol	0,389	0,075	16	0,4668
				D_{S_T} =4,937

$Q_1 = \Sigma D.temps$ (II.4)

$$Q_1 = (D_{S_T}) \times t$$

$Q_1 = (4,937) \times 24 = 118,49(Wh)$

II.4.2. La chaleur à dégager par introduction des produits à l'intérieur de la chambre:

$Q_2 = m.C_p.\Delta T$ (II.5)

$Q_2 = 0,5 \times 3,6 \times 16 = 28,8(Wh)$

Tableau II.3: Conditions de conservation de pomme

Produit	**Pomme**
Point de congèle en °C	-2
Chaleur spécifique en kJ/kg *C	3,6
Chaleur latente de congélation en kJ/kg	280,73
Chaleur de respiration en KJ/kg 24h	0,42 à 1,68
Température de conserve en °C	-1 à +3
Humidité relative en %	85 à 90
Durée de conserve	2 à 5 mois

II.4.3. La chaleur par respiration des produits :

$Q_3 = m.(1,4)$ (II.6)

1,4 : la moyenne de chaleur dégager par un produit en 24h (Wh/Kg)

m : La masse du produit en (Kg)

$Q_3 = 0,5 \times 1,4 = 0,7(Wh)$

II.4.4. La chaleur par renouvellement d'air:

$Q_4 = D_v.temps$ (II.7)

$$Q_4 = \frac{2,7642 \times 30}{3600} = 0,023035(Wh)$$

D_v = La déperdition volumique

$D_v = 0,34.V.\Delta T.\tau$ (II.8)

$D_v = 0,34 \times 0,0375 \times 16 \times 13,55 = 2,7642$

∗ 0,34 : capacité thermique de l'air

∗ V : volume de la chambre

$V = 0,3 \times 0,25 \times 0,5 = 0,0375(m^2)$

∗ τ : est-il en fonction du volume de la chambre

$\tau = 70.(V)^{\frac{1}{2}}$ (II.9)

$\tau = 70.(0,0375)^{\frac{1}{2}} = 13,55$ → ch +

$\tau = 13,55$

II.4.5. La chaleur dégagée par l'introduction des personnels:

$Q_5 = q.t.n$ (II.10)

$$Q_5 = \frac{q.t.n}{24} = 0(Wh)$$

∗ q : la chaleur dégagée par Person

∗ t : temps de Person dans la chambre

∗ n : nombre des personnes

Tableau II.4: la chaleur dégage par personne

Température de la chambre froide	Travail dur	Travail moyen	Travail léger
10 °C	244	372	186
7 °C	250	372	198
4 °C	256	372	209
2 °C	267	372	221
0 °C	273	372	233
− 7 °C	314	384	279
− 12 °C	337	395	291
−18 °C	372	407	326
− 23 °C	407	419	349

II.4.6. La chaleur dégagée par l'éclairage:

$Q_6 = 10.t.S$ (II.11)

Nous n'avons pas d'éclairage dans la chambre froide donc $Q_6 = 0$

II.4.7. La chaleur dégagée par le ventilateur évaporateur:

$Q_7 = 30.S.24$ (II.12)

Nous n'avons pas de ventilateur évaporateur dans la chambre froide donc : $Q_7 = 0$

30 : coefficient

S : La surface

24 : le temps de stockage

II.4.8. La chaleur par ouverture des portes:

$$Q_8 = \left[8 + \left(0,067.\Delta T_P\right)\right].\tau_P.\rho_{a.a}.l_p.h_p.\sqrt{h_p\left(1-\frac{\rho_{a.e}}{\rho_{a.a}}\right)}.\left(h_{a.e}-h_{a.a}\right).C_{r.a} \qquad \text{(II.13)}$$

$$Q_8 = [8 + (0,067 \times 16)] \times \frac{30}{3600} \times 1,2 \times 0,25 \times 0,5 \times \sqrt{0,5 \times \left(1 - \frac{1,2}{8,314}\right)} \times (58 - 14,5) \times 1 = 0,32(Wh)$$

$$\Delta T_P = T_e - T_a \qquad \text{(II.14)}$$

$$\Delta T_P = 293 - 277 = 16K$$

Ecart de température de l'air entre les deux côtes de la porte (T_a = la température ambiante dans la chambre froide et T_e = température à l'extérieur)

τ_P = Temps d 'ouverture des portes

$\rho_{a.a}$ = Masse volumique de l'air ambiant dans la chambre froide en (Kg/m^3)

h_p = Hauteur d'une porte en (m)

l_p = Largeur d'une porte en (m)

$\rho_{a.e}$ = Masse volumique de l'air du cote de la porte autre que la chambre froide en (Kg/m^3)

$h_{a.e}$ = Enthalpie de l'air du cote de la porte autre que la chambre froide en (KJ/Kg)

$h_{a.a}$ = Enthalpie de l'air ambiant dans la chambre froide en (KJ/Kg)

$C_{r.a}$ = Coefficient de minoration du a la présence éventuelle d'un rideau d'air .Dans le cas d'une porte sans rideau on prend $C_{r.a} = 1$, tandis que dans le cas d'une porte avec rideau on prend $C_{r.a} = 0,25$

Tableau II.5:les résultats des (Q) et le (Qt)

$Q_{unitiles}$	**La valeur (*Wh*)**
Q_1	118,49
Q_2	28,8
Q_3	0,7
Q_4	0,023035
Q_5	0
Q_6	0
Q_7	0
Q_8	0,32
	Q_T =148,333035

Pour déterminer la puissance

On a :

$$Q_T = \Sigma Q_{unitiles} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \qquad \text{(II.15)}$$

$$Q_T = 118,49 + 28,8 + 0,7 + 0,023035 + 0 + 0 + 0 + 0,32 = 148,333035(Wh)$$

$$P = \frac{Q_T}{temps} \quad \text{(II.16)}$$

$$P = 6{,}18W$$

Pour

$$P_{reel} = P.\frac{24}{16} \quad \text{(II.17)}$$

$$P_{reel} = 9{,}27W$$

$$P = V.I \quad \text{(II.18)}$$

Avec $V = 12V$ et $I = 3A$

Donc $P = 12 \times 3 = 36W$

Conclusion :

En conclusion, l'analyse approfondie du bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique est essentielle pour comprendre et améliorer les performances de refroidissement de ces appareils. Tout au long de ce chapitre, nous avons examiné les différents aspects liés au bilan thermique, en mettant l'accent sur les sources de pertes et de gains de chaleur, les méthodes de mesure et de modélisation.

Nous avons constaté que les transferts thermiques à travers les éléments thermoélectriques, les dissipateurs de chaleur, les isolants et les interfaces thermiques ont un impact significatif sur le bilan thermique global du réfrigérateur. La compréhension de ces mécanismes de transfert de chaleur est cruciale pour maximiser l'efficacité énergétique et la capacité de refroidissement du système.

Chapitre III
Technique Expérimentale

Introduction :

Notre réfrigérateur thermoélectrique est basé sur l'utilisation des plaques Peltier (**TEC1-12703**) qui sont les éléments refroidisseurs fonctionnant en courant continue. Les plaque est placé en parallèle en trois niveaux chaque niveaux contient deux module de Peltier

La réalisation d'expériences est essentielle pour obtenir des données précises et fiables sur les performances thermiques du réfrigérateur. Nous utiliserons des techniques telles que la mesure des températures, De plus, nous explorerons l'utilisation de techniques avancées telles que les capteurs de température pour obtenir des informations détaillées sur les variations de température à l'intérieur du réfrigérateur.

Une fois les données expérimentales collectées, nous procéderons à leur analyse afin de comprendre les différents phénomènes de transfert de chaleur qui se produisent dans le réfrigérateur. Cette analyse approfondie nous permettra d'identifier les facteurs qui influencent l'efficacité énergétique du réfrigérateur et de proposer des améliorations potentielles.

En résumé, ce chapitre sur les techniques expérimentales joue un rôle central dans notre étude de l'analyse de bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique.

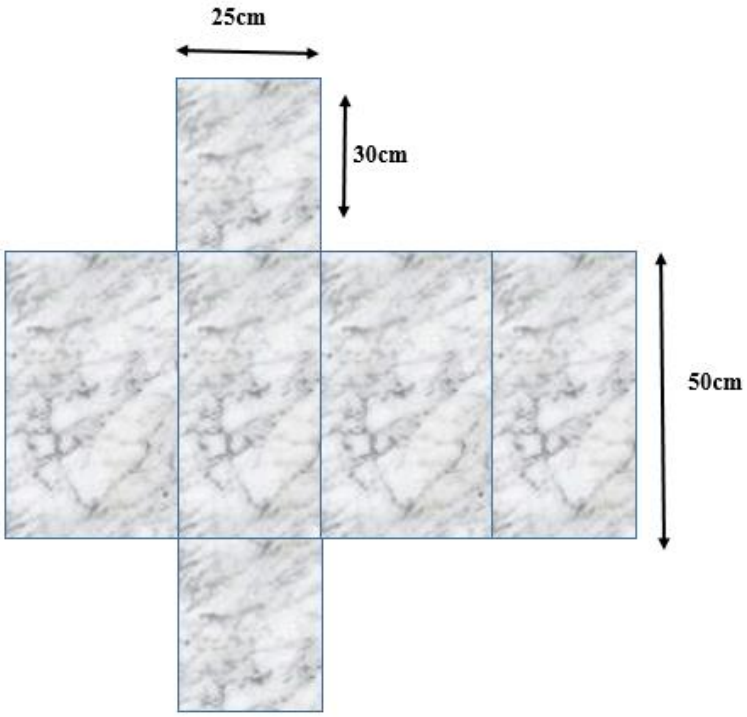
III.1.Présentation du réfrigérateur :

Le prototype que nous avons étudié est un réfrigérateur thermoélectrique qui vise à évaluer la capacité des éléments Peltier à générer du froid dans des applications simples comme le refroidissement de boissons, de médicaments ou même d'échantillons analytiques dans les laboratoires médicaux.



Figure III.1:la vue de réfrigérateur

III.2.Caractéristiques physiques :



Le tableau ci-dessous présente toutes les spécifications du réfrigérateur, telles que les dimensions, le volume, etc.

Tableau III.1:Caractéristiques physiques

Désignation	**Valeur**
Hauteur H (cm)	**50**
Longueur L (cm)	**30**
Largeur L (cm)	**25**
Volume V (cm^3)	**37500**

III.4.Caractéristiques électriques :

Comme son nom l'indique, le réfrigérateur que nous étudions fonctionne entièrement à l'électricité, qui alimente les panneaux Peltier et les ventilateurs. Les différentes caractéristiques électriques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2:Caractéristiques électriques

Désignation	Valeur
Type de courant	Continu
Tension d'alimentation(V)	12
Courant consommé (A)	9
Puissance électrique (W)	216

III.5.Caractéristiques de l'isolation :

Les parois du réfrigérateur sont fabriquées à partir d'un panneau sandwich qui présente les points suivants :

Tableau III.3:Caractéristiques de l'isolation

Désignation	Valeur
Epaisseur (mm)	60
Masse volumique (kg/m^2)	40
Conductivité thermique (w/m.K)	0,024

III.6.Description du réfrigérateur :

Vue de face :



Vue arrière :



III.7.Plaques Peltier :

III.7.1.Module Peltier (TEC1-12703) :

Un module Peltier (TEC1-12703) est un composant thermoélectrique qui utilise l'effet Peltier pour créer une différence de température entre ses deux faces lorsqu'il est traversé par un courant électrique. Ce phénomène génère du froid d'un côté du dispositif et de la chaleur de l'autre.

Dans le réfrigérateur que nous étudions, nous avons Le module de 127 couples, 40 mm × 40 mm, est fabriqué à partir de lingots sélectionnés à haute performance pour atteindre une performance de refroidissement supérieure et un delta T plus élevé jusqu'à 74 ºC, conçu pour des applications de refroidissement et de chauffage supérieures jusqu'à 100 ºC.

Notre réfrigérateur contient six modules Peltier (**TEC1-12703**).

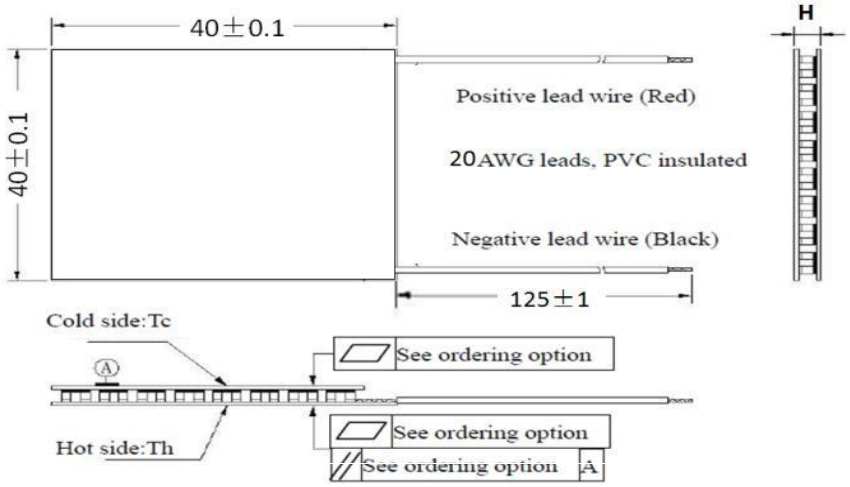
Avec les Caractéristiques suivants :

Tableau III.4:les Caractéristiques de Module Peltier

Désignation	**Valeur**
Dimensions	40 mm x 40 mm
Nombre de couples thermoélectriques	127
Capacité de refroidissement	38 W
Tension d'alimentation maximale	15 V
Courant de fonctionnement maximal	3 A
Différence de température maximale	74 °C
Matériau de la plaque froide	Alumine (Al2O3)
Résistance thermique	1,4 °C/W



Caractéristiques géométriques Dimensions en millimètres:



III.7.2.Application:

- Réfrigérateur pour le service des aliments et des boissons
- Glacière portable pour voitures
- Refroidissement des liquides
- Stabilisateur de température
- Refroidisseur d'unité centrale
- Systèmes photoniques et médicaux

III.7.3.Avantage:

- Pas de pièces mobiles, pas de bruit et état solide
- Structure compacte, petite taille, poids léger
- Respectueux de l'environnement
- Conforme à la directive RoHS
- Contrôle précis de la température

III.8.Dissipateurs de chaleur :

Les faces chaudes des plaques Peltier sont placées perpendiculairement une symétrique à l'autre sur les deux faces de l'échangeur pour assurer l'évacuation de chaleur produite par la face chaude de chaque plaque.



Figure III.7:les dissipateurs de chaleur

III.9.Les ventilateurs :

L'image montre une unité de refroidissement avec trois ventilateurs montés sur le côté. Les ventilateurs sont montés sur le dissipateur thermique. Les ventilateurs mesurent 92 mm x 92 mm x 25 mm et sont de type axial AC. Le nombre de pales est de cinq, ils sont en plastique et pèsent 150g.

Le ventilateur TPY 3958 PAPST AC 220V est un ventilateur de haute qualité conçu pour une variété d'applications. Il est fabriqué par (ebm-papst), l'un des principaux fabricants mondiaux de ventilateurs et de moteurs.

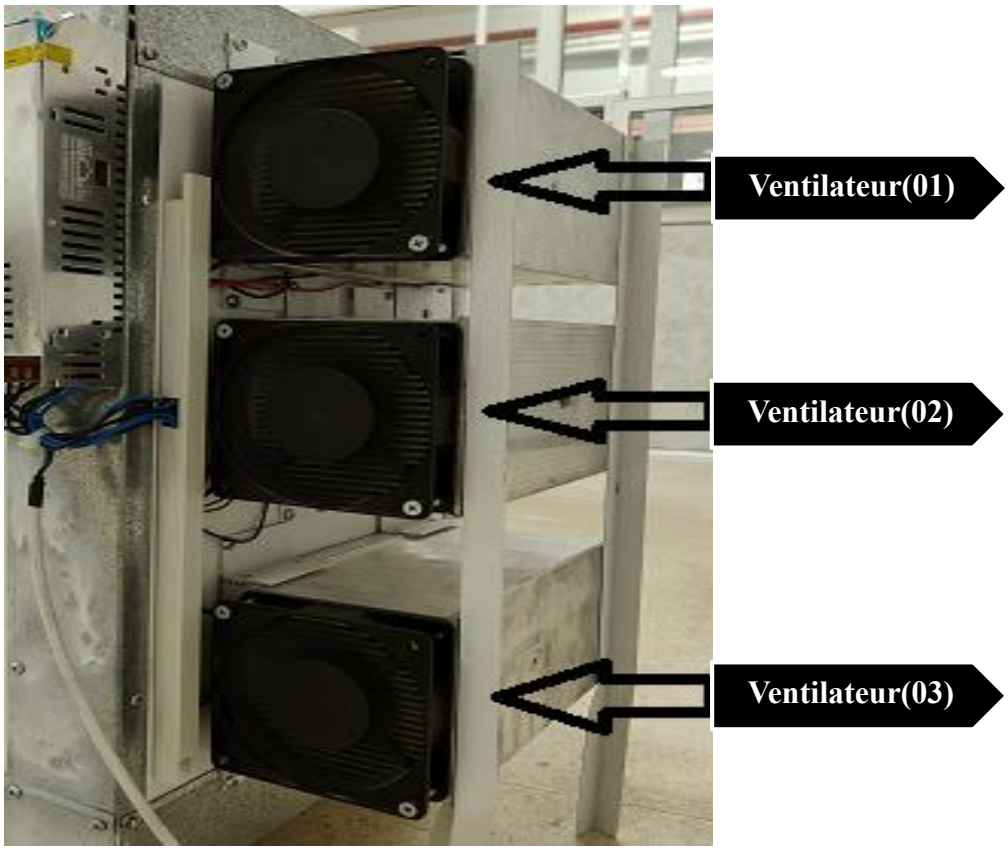


Figure III.8:les ventilateurs

III.9.1.Fonctionnalités :

Haute performance : Le ventilateur TPY 3958 PAPST AC 220V offre un débit d'air élevé et une vitesse de rotation élevée pour un refroidissement efficace.

Faible niveau sonore : Le ventilateur fonctionne à un niveau sonore de 30 dB, ce qui le rend très silencieux.

Fiabilité : Le ventilateur est fabriqué avec des matériaux de haute qualité et est conçu pour une longue durée de vie.

Polyvalence : Le ventilateur peut être utilisé dans une grande variété d'applications, y compris les ordinateurs, les serveurs, les équipements électroniques et les appareils électroménagers.

III.9.2.Applications :

Le ventilateur TPY 3958 PAPST AC 220V est idéal pour une large gamme d'applications, notamment :

- Refroidissement d'ordinateurs et de serveurs
- Refroidissement d'équipements électroniques
- Refroidissement d'appareils électroménagers
- Ventilation de boîtiers industriels
- Applications de climatisation

III.9.3.Avantage :

- Haute performance
- Faible niveau sonore
- Fiabilité
- Polyvalence
- Efficacité énergétique
- Longue durée de vie

III.10.Les multimètres :

Un multimètre, également appelé testeur universel ou testeur électrique, est un instrument de mesure électronique portable qui permet de mesurer différentes grandeurs électriques. C'est un outil essentiel pour les électriciens, les électroniciens, les amateurs et les bricoleurs, car il permet de diagnostiquer les pannes, de tester les composants et de vérifier le bon fonctionnement des circuits électriques. Grâce à lui, nous avons mesuré les différentes températures à l'intérieur du réfrigérateur ainsi que la température de l'environnement extérieur



III.11.Thermocouple :

Un thermocouple est un capteur de température qui fonctionne selon le principe de l'effet Seebeck. Cet effet décrit la génération d'une tension électrique proportionnelle à la différence de température entre deux jonctions de conducteurs métalliques dissemblables

III.11.1.Types de thermocouples:

Il existe plusieurs types de thermocouples, chacun avec ses propres caractéristiques et son domaine d'utilisation. Les types les plus courants sont :

Type K (Chromel-Alumel): Large plage de température (-200°C à +1200°C), robuste, faible coût, usage général.

Type J (Fer-Constantan): Bonne stabilité à long terme, insensible aux champs magnétiques, applications à basse et moyenne température (-40°C à +750°C).

Type T (Cuivre-Constantan): Bonne sensibilité, faible masse thermique, applications à basse température (-200°C à +350°C).

Type E (Chromel-Constantan): Haute sensibilité, applications à haute température (0°C à +900°C).

Type N (Nicrosil-Nisil): Haute résistance à l'oxydation, applications dans des atmosphères corrosives (200°C à +1200°C)

III.11.2.Choix d'un thermocouple:

Le choix du type de thermocouple dépend de l'application et des conditions d'utilisation. Il faut prendre en compte la plage de température souhaitée, la robustesse requise, la sensibilité souhaitée, la résistance à l'oxydation et la compatibilité avec les autres composants du système

Nous avons choisi le thermocouple de type K pour Mesuré les températures de réfrigérateurs thermoélectriques

Le thermocouple de type K est le type de thermocouple le plus couramment utilisé pour les réfrigérateurs thermoélectriques en raison de sa large plage de mesure de température (-200°C à +1200°C), sa robustesse, son faible coût et sa relative facilité d'utilisation.

III.11.3.Applications des thermocouples de type K dans les réfrigérateurs thermoélectriques :

Mesure de la température du compartiment réfrigérateur: Le thermocouple permet de surveiller la température à l'intérieur du réfrigérateur et de s'assurer qu'elle reste dans la plage de conservation optimale des aliments.

Contrôle du système de réfrigération: Le signal du thermocouple peut être utilisé pour contrôler le système de réfrigération, en activant ou en désactivant les éléments Peltier en fonction de la température mesurée.

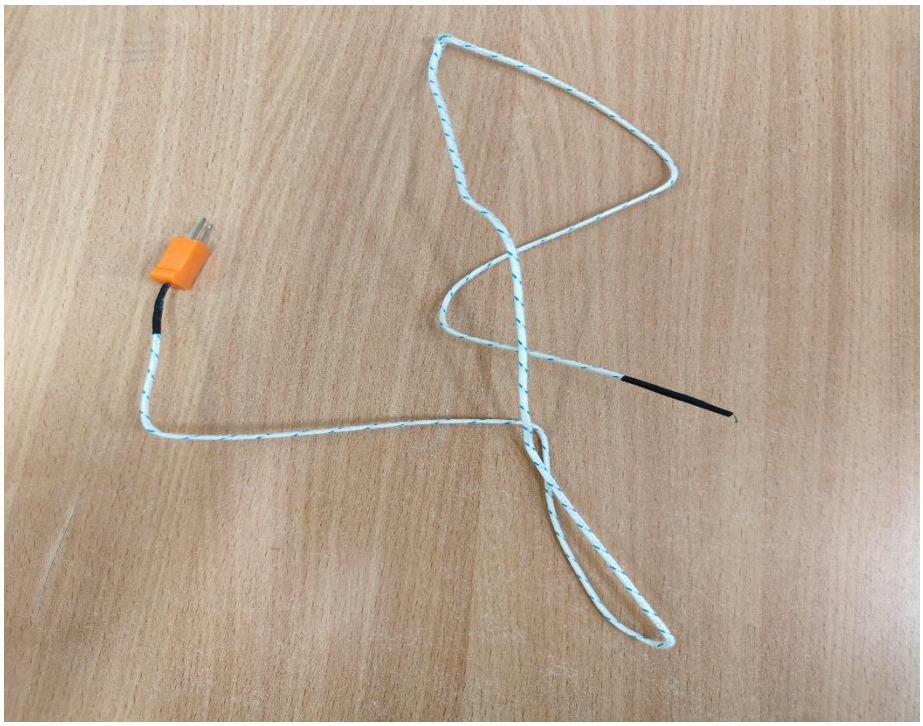
Protection contre la surchauffe: Le thermocouple peut être utilisé pour protéger le système de réfrigération contre la surchauffe en coupant l'alimentation si la température dépasse un seuil prédéfini.

En résumé, les thermocouples de type K sont des capteurs de température fiables et économiques qui conviennent parfaitement aux réfrigérateurs thermoélectriques grâce à leur large plage de mesure, leur robustesse et leur facilité d'utilisation.

Avec les Caractéristiques suivants :

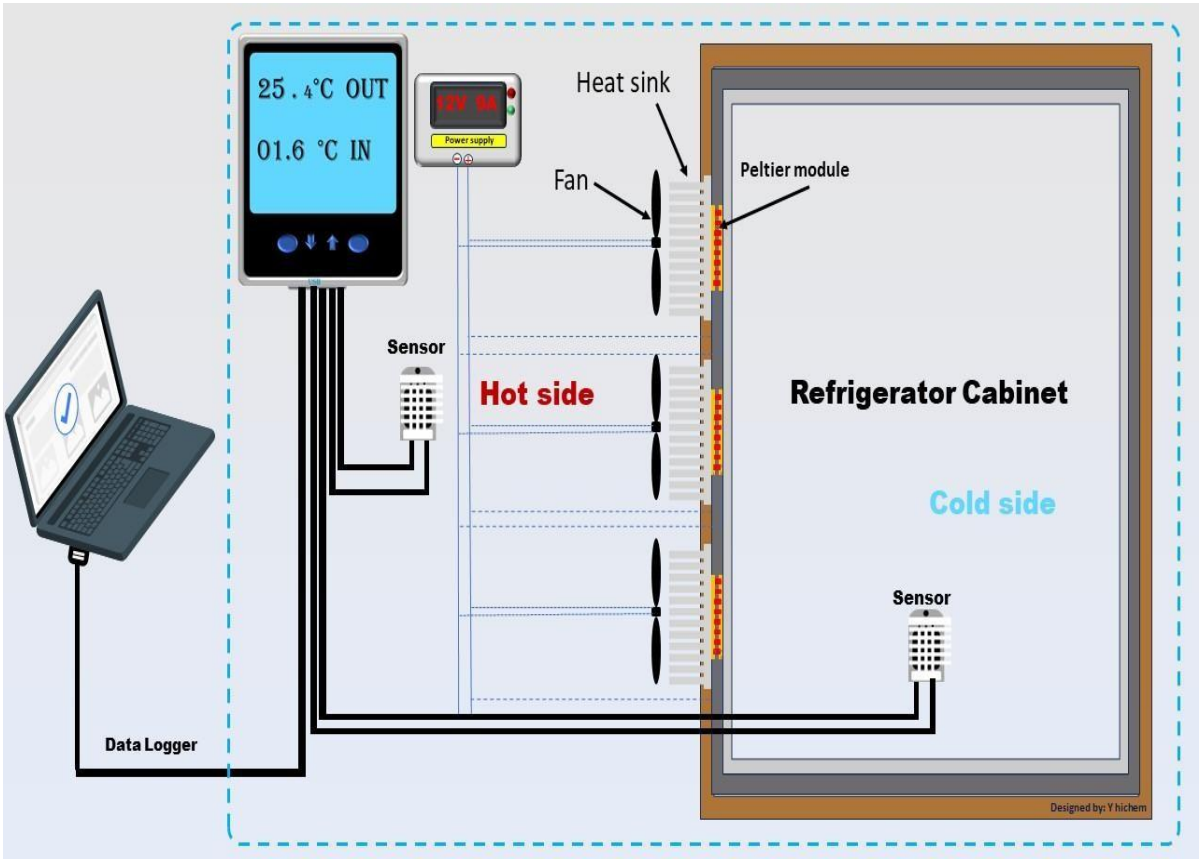
Tableau III.5:Caractéristiques du Thermocouple type(K)

Désignation	**Valeur**
Plage de température	-200°C à 1200°C (usage continu)
	-180°C à 1300°C (usage intermittent).
Sensibilité	Environ 41 µV/°C
Stabilité	Moins de 300°C



III.12.Système de travail du réfrigérateur thermoélectrique:

La figure II.3 ci-dessous présente le schéma général du fonctionnement du réfrigérateur thermoélectrique. Le début de la procédure consiste à alimenter le module thermoélectrique, qui est constitué de matériaux semi-conducteurs spécifiques. Un gradient de température est créé lorsque le courant électrique traverse le module. L'une des extrémités du module est chauffée, l'autre est froid. Cette situation est appelée l'effet Peltier. L'intérieur du réfrigérateur est directement en contact avec la partie froide du module, où se situe l'espace de stockage. De cette manière, la chaleur est évacuée de l'intérieur du réfrigérateur, ce qui réduit la température et maintient les produits frais. La température à l'intérieur du réfrigérateur est constamment surveillée par le circuit de contrôle, qui utilise des capteurs. En cas d'atteinte de la température préétablie, le circuit ajuste automatiquement le courant électrique qui traverse le module thermoélectrique afin de maintenir la température désirée. Plusieurs éléments influencent l'efficacité globale du réfrigérateur thermoélectrique, tels que l'isolation thermique, la qualité du module thermoélectrique et l'efficacité énergétique du circuit de contrôle.



Conclusion :

En conclusion, le chapitre des techniques expérimentales a joué un rôle essentiel dans cette étude de l'analyse de bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique. Les différentes méthodes utilisées, telles que la mesure des températures, des flux de chaleur et des performances thermiques, ont permis d'obtenir des données précieuses pour évaluer l'efficacité énergétique du système. De plus, l'utilisation de techniques telles que les capteurs de température a permis d'obtenir des informations détaillées sur les variations de température à l'intérieur du réfrigérateur, les techniques expérimentales utilisées dans cette étude ont fourni des données précieuses et des informations détaillées pour analyser le bilan thermique d'un réfrigérateur thermoélectrique. Ces résultats ont jeté les bases d'une meilleure compréhension du fonctionnement du système et ont ouvert la voie à des améliorations potentielles en termes d'efficacité énergétique

Chapitre IV
Résultats et Discussions

Introduction:

Le génie frigorifique a énormément évolué au fil des ans, avec l'invention des réfrigérateurs à compression qui répondent à tous nos besoins de refroidissement. La thermoélectricité a été exploitée dans le domaine de la réfrigération et de la climatisation dès sa découverte au XIXe siècle, ce qui a ouvert un vaste horizon pour les recherches futures. Cette technologie a été utilisée pour créer de nouveaux systèmes de refroidissement modernes, compacts et puissants, et la recherche et le développement dans le domaine du génie frigorifique se sont poursuivis. Ce développement vise à améliorer les performances et l'efficacité des systèmes de refroidissement, que ce soit dans un environnement domestique, commercial ou industriel. Grâce à cette évolution, nous disposons d'une technologie de réfrigération avancée qui répond à nos besoins quotidiens et permet de conserver la fraîcheur et la santé des aliments et des médicaments. Nous consacrerons donc ce dernier chapitre à l'étude

IV.1.Résultat est discussion :

Une fois le réfrigérateur thermoélectrique opérationnel, nous avons effectué un test pour caractériser ses performances en plaçant un échantillon de pommes de 500g à l'intérieur du réfrigérateur pour mesurer la température à l'intérieur de la chambre de refroidissement et la température ambiante à l'aide de deux thermomètres. Nous avons également mesuré la différence de température entre les sources chaudes et froides à partir de la thèse de l'année dernière. Ces mesures nous ont permis d'évaluer l'efficacité du transfert de chaleur du réfrigérateur. Plus la différence de température est importante, plus la capacité de refroidissement du système est élevée. Nous cherchons à obtenir une grande différence de température pour garantir une performance de refroidissement optimale.

Parallèlement, nous mesurons également la température ambiante afin de tenir compte des conditions environnementales dans lesquelles le réfrigérateur fonctionne. Cela nous permet d'analyser les performances du système dans différentes situations et de vérifier sa capacité à maintenir une température constante malgré les changements extérieurs.

Ces tests de performance nous fournissent des données précieuses pour évaluer et optimiser le fonctionnement du réfrigérateur thermoélectrique.

L'objectif ultime de ces tests est de s'assurer que notre réfrigérateur thermoélectrique répond à nos normes élevées de qualité et de performance, en fournissant une solution de refroidissement fiable et efficace à nos clients.

Le tableau suivant représente les changements de température ambiante et de température à l'intérieur réfrigérateur que nous avons mesurés dans cette étude

Tableau IV.1:Les Température ambiante et interne

Temps (min)	Température ambiante (°C)	Température interne (°C)
0	20	20
10	20	13
20	20	8
30	20	7
40	20	6
50	20	5
60	20	5
70	20	5
80	20	4
90	20	4
100	20	4
110	20	4
120	20	4
130	20	4
140	20	4
150	20	4
160	20	4
170	20	4

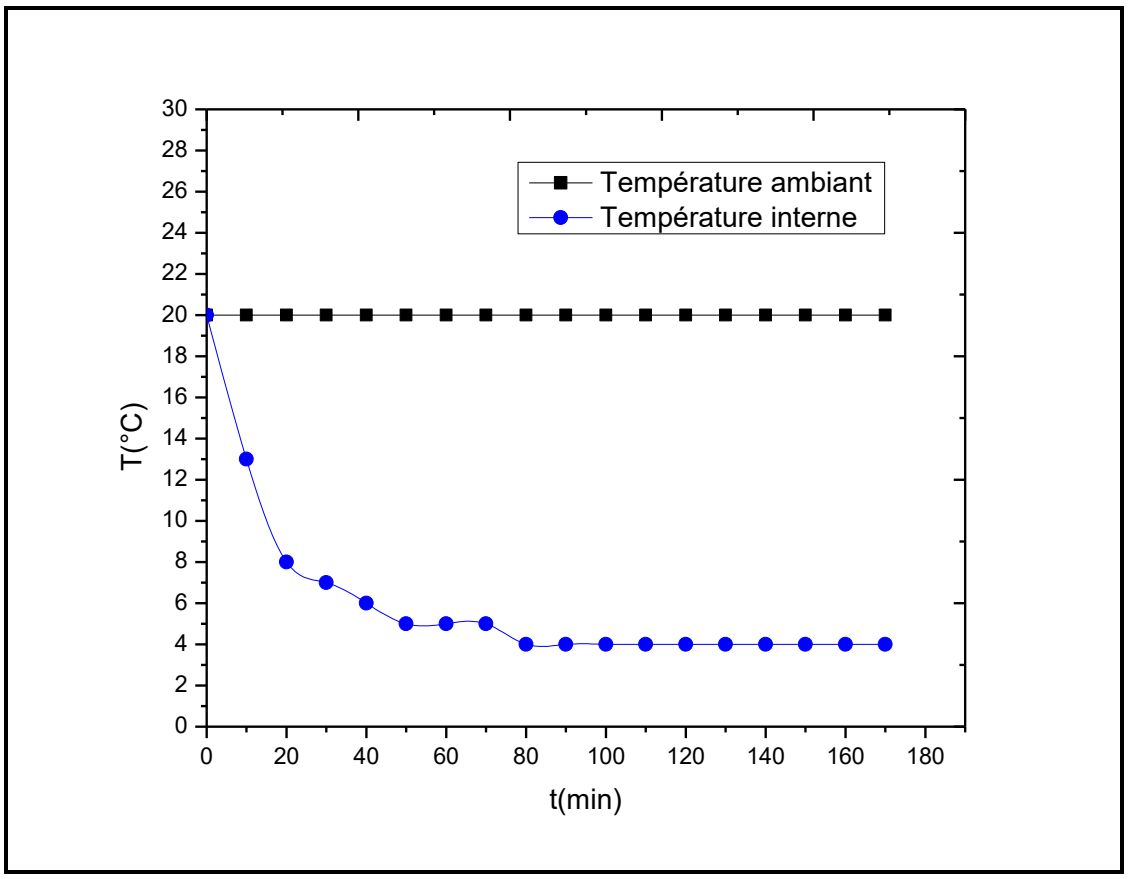


Figure IV.1:La variation de température (ambiante et interne) en fonction du temps

La température interne du réfrigérateur thermoélectrique diminue graduellement au cours des 170 minutes représentées sur le graphe. Elle passe d'environ 20°C à environ 4°C.La température ambiante reste relativement stable tout au long de la période représentée graphiquement. La différence de température entre la température interne du réfrigérateur et la température ambiante diminue graduellement au cours de la période. Elle passe d'environ 0°C à environ 16°C. Le graphe montre que le réfrigérateur thermoélectrique fonctionne correctement. Il est capable de refroidir l'espace interne à une température inférieure à la température ambiante.

La différence de température entre la température interne du réfrigérateur et la température ambiante diminue graduellement au fil du temps. Cela est probablement dû au fait que le réfrigérateur thermoélectrique atteint un état d'équilibre thermique avec son environnement. La température ambiante a un effet sur la température interne du réfrigérateur thermoélectrique. Plus la température ambiante est élevée, plus il est difficile pour le réfrigérateur thermoélectrique de maintenir une température interne basse.

Le tableau suivant indique les variations de la température ambiante et la température du côté froid et de la température du côté chaud pour Module Peltier, à partir du mémoire de l'année précédente, afin de nous aider à effectuer les calculs suivants (Puissances Frigorifiques, Les Puissances calorifiques, Les Puissances électrique consommée par le module, Le coefficient de performance) [43].

Tableau IV.2: Les Température ambiant et du côté froide et chaude de Module Peltier[43]

Temps (minute)	Température de côté froide (°C)	Température ambiante (°C)
0	26	26
5	19	26
10	15	26
15	11	26
20	09	26
25	08	26
30	07	26
35	06	26
40	06	26
45	05	26
50	05	26
55	04	26
60	03	26
65	02	26

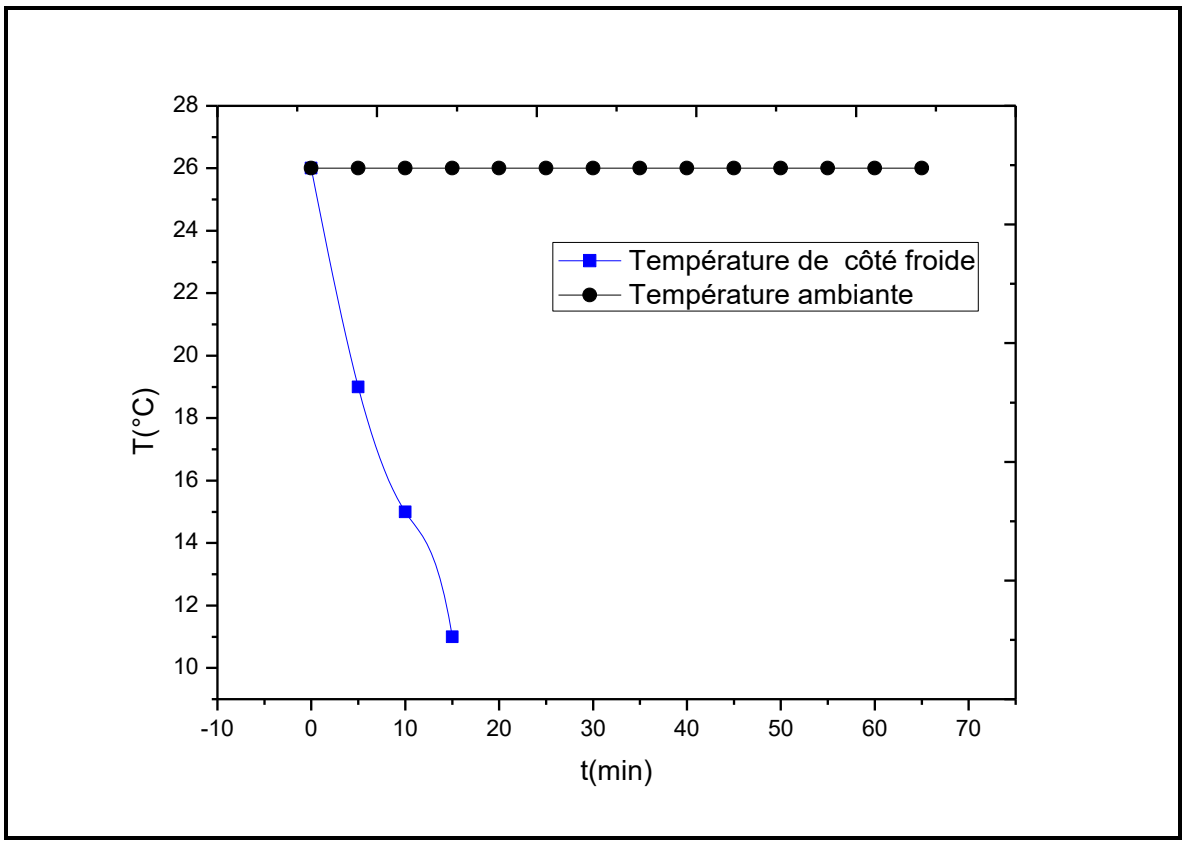


Figure IV.2:La variation de température (ambiant et du cote froide) en fonction du temps

La température du côté froid diminue progressivement au cours des 65 minutes indiquées sur le graphe. Elle passe d'environ 26°C à environ 2°C. La température ambiante reste relativement stable tout au long de la période. Le graphe montre que le Module Peltier fonctionne correctement. Elle est capable de refroidir le côté froid.

La température ambiante a peu d'influence sur le fonctionnement de Module Peltier.

IV.2.La puissance frigorifique :

La puissance frigorifique est déterminée par la formule suivante :

T_c et T_f sont les températures du côté chaud et côté froid du module respectivement. Q_f est la chaleur absorbé du côté froid du module et Q_c et la chaleur dissipé du côté chaud vers le milieu ambiant.

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

Cependant, ces coefficients peuvent être calculé on utilisant des paramètres V_{max} , I_{max} et ΔT_{max} qui sont donnés par le fabriquant du module Peltier

Après 65 minutes de fonctionnement les températures se sont stabilisées.

La variation de la puissance frigorifique en fonction du temps est récapitulée sur le tableau suivant :

Tableau IV.3:Les Puissances Frigorifiques

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Puissance Frigorifique (Q_f) W	27,42	25,49	24,69	23,19	22,45	22,30	21,93	21,79	21,56	20,95	20,95	20,35	19,75	19,37

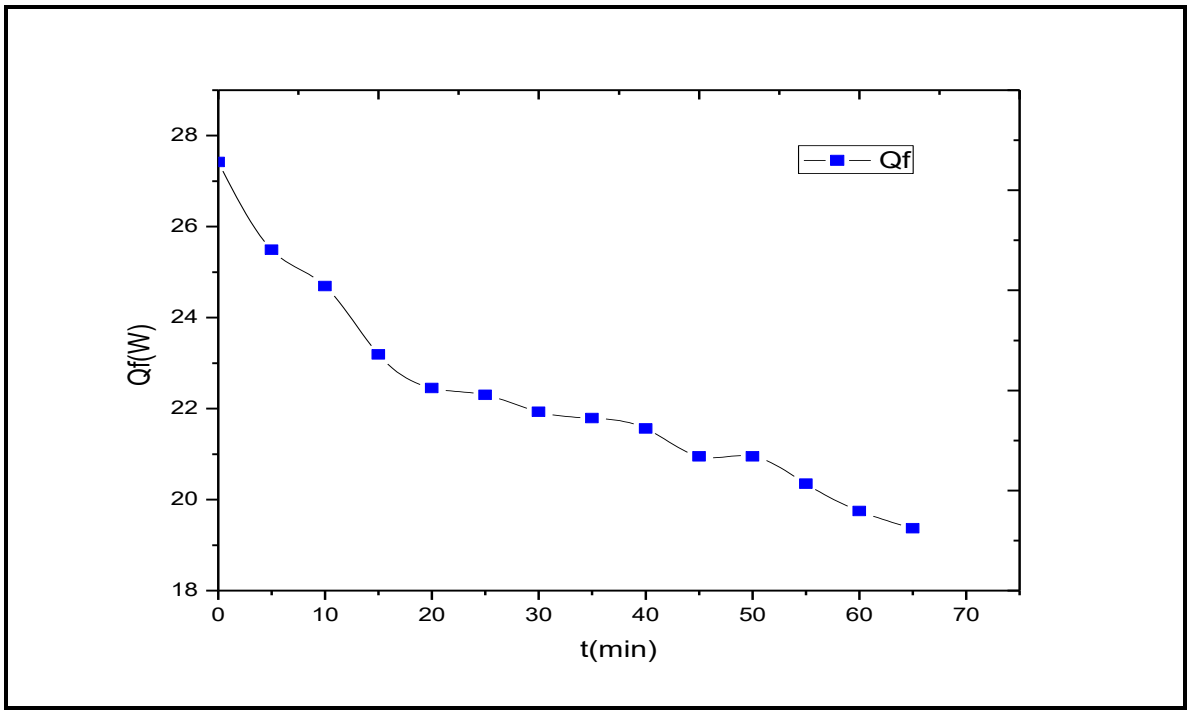


Figure IV.3:La variation de la puissance frigorifique en fonction du temps

La quantité de chaleur absorbée à l'intérieur du réfrigérateur (Q_f) est de (19W), elle est inférieure à la puissance que le module thermoélectrique peut avoir (38W), la puissance frigorifique est directement proportionnelle au courant électrique I , c'est dire quelle d'autant plus grande que le courant mis en jeu est élevée.

IV.3.La puissance calorifique:

La chaleur dissipée du côté chaud du module de Peletier est exprimée par la relation suivant:

Tableau IV.4:Les Puissances calorifiques

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Puissance Calorifique (Q_c) W	58,39	57,03	56,28	55,46	55,08	54,85	54,62	54,48	54,39	54,08	54,08	53,76	53,44	53,21

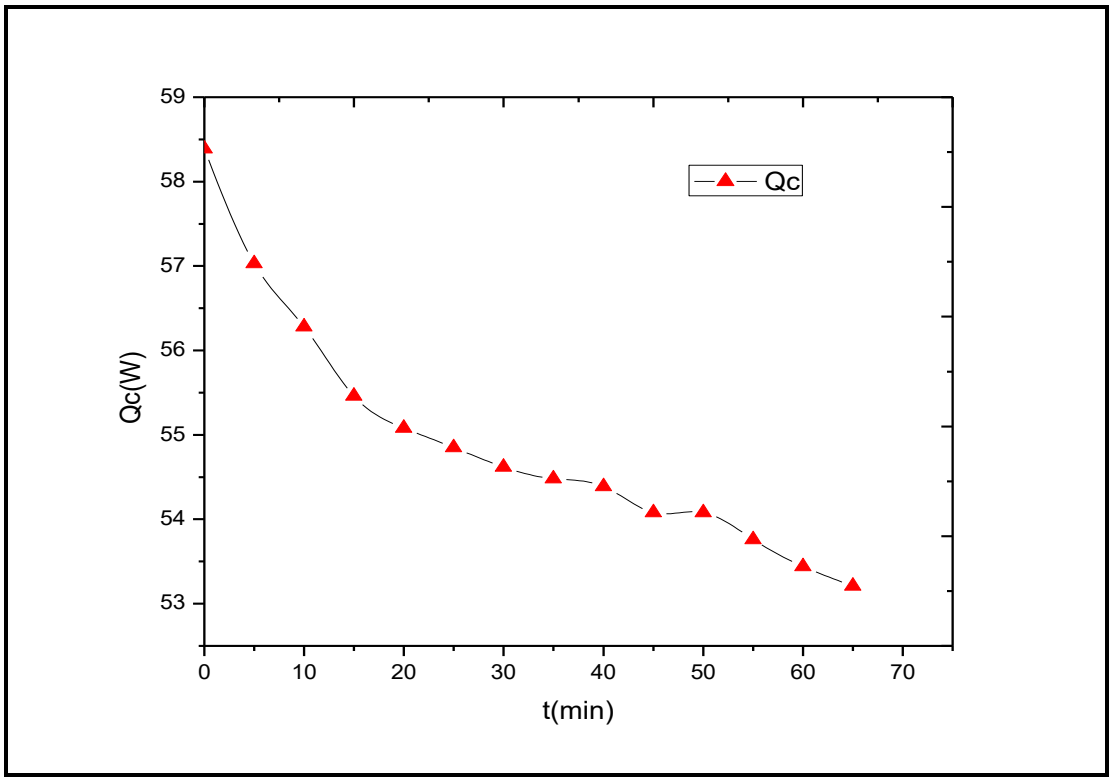


Figure IV.4:La variation de la puissance calorifique en fonction du temps

Les points de données représentent la production de chaleur du refroidisseur thermoélectrique à différents moments. Les points de données sont reliés par une ligne courbe.

Ce graphique montre qu'il faut un certain temps pour que le réfrigérateur thermoélectrique atteigne sa puissance thermique maximale.

Cela est probablement dû au fait qu'un réfrigérateur thermoélectrique doit d'abord refroidir ses composants internes avant de pouvoir commencer à refroidir efficacement l'espace intérieur. Ce graphique montre qu'un réfrigérateur thermoélectrique met un certain temps à atteindre sa puissance thermique maximale, mais qu'il est ensuite capable de maintenir une puissance thermique constante.

IV.4.La puissance électrique consommée par le module :

La puissance électrique est donnée par la formule suivante:

Tableau IV.5:Les Puissances électrique consommée par le module

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Puissance Électrique (P_e) W	30,97	31,54	31,68	32,26	32,40	32,54	32,69	32,69	32,82	33,12	33,12	33,41	33,69	33,84

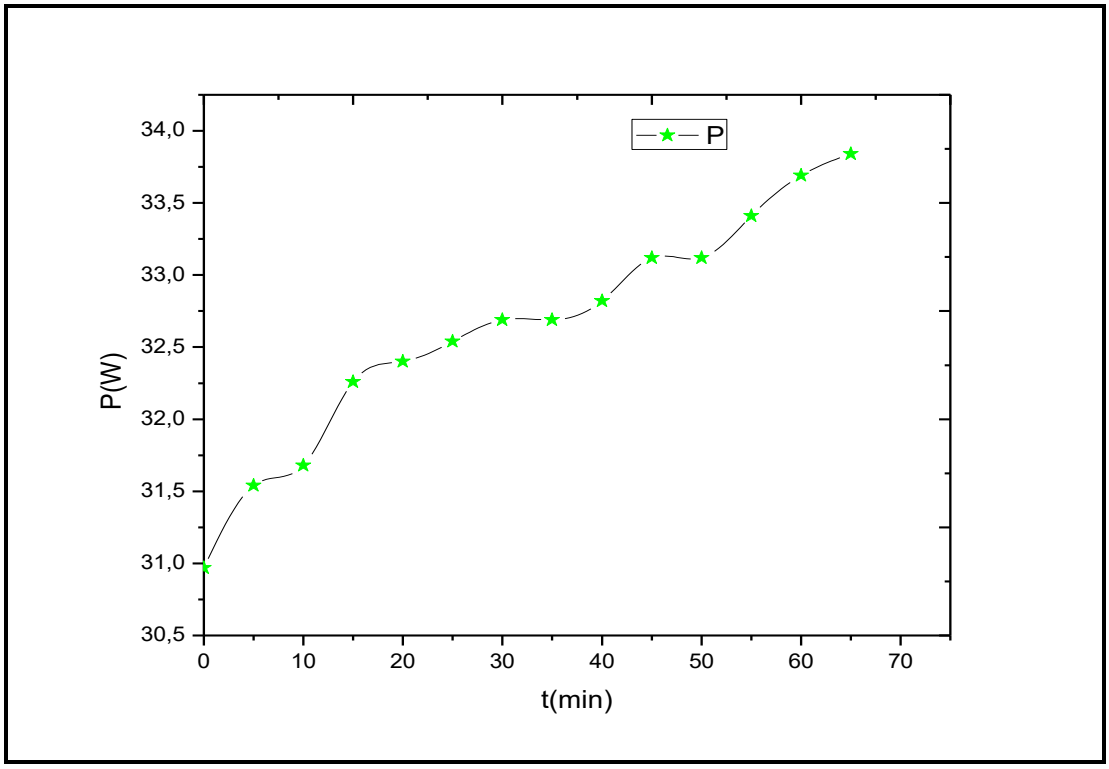


Figure IV.5:La variation de la puissance électrique en fonction du temps

La ligne courbe montre que la puissance électrique du réfrigérateur thermoélectrique augmente graduellement avec la température.

L'augmentation de la puissance électrique est plus rapide à basse température, puis se ralentit progressivement.

Ce graphe montre que le réfrigérateur thermoélectrique consomme plus d'électricité lorsqu'il doit refroidir un espace interne plus chaud.

Cela est probablement dû au fait que le réfrigérateur thermoélectrique doit travailler plus dur pour maintenir la différence de température souhaitée entre l'espace interne et l'environnement externe lorsque la température ambiante est plus élevée.

Une fois que le réfrigérateur thermoélectrique a atteint la température souhaitée, il est capable de maintenir une puissance électrique constante.

Ce graphe montre que le réfrigérateur thermoélectrique consomme plus d'électricité lorsqu'il doit refroidir un espace interne plus chaud.

IV.5. Le coefficient de performance réel :

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) 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.

Tableau IV.6:Le coefficient de performance

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
coefficient de performance *COP*	0,89	0,80	0,78	0,72	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,63	0,63	0,61	0,58	0,57

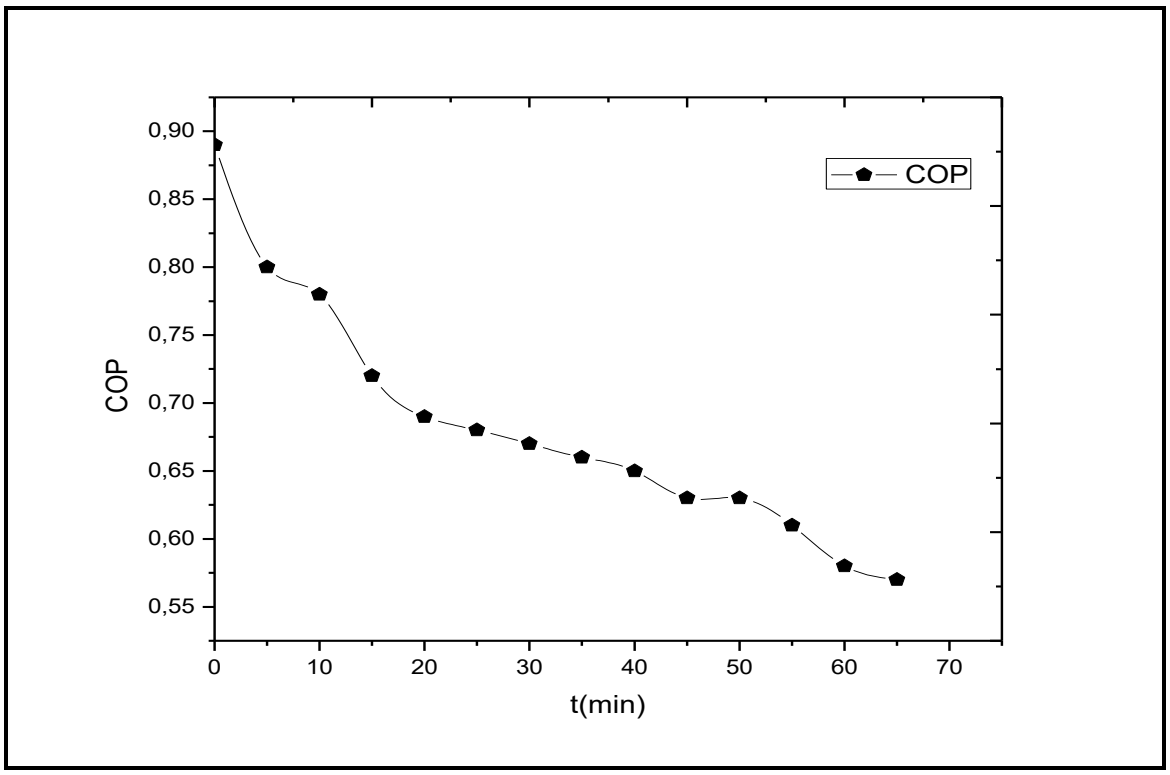


Figure IV.6:La variation du coefficient de performance réel en fonction du temps

Les points de données représentent le coefficient de performance du réfrigérateur thermoélectrique à différentes températures.

La ligne courbe montre que le coefficient de performance du réfrigérateur thermoélectrique diminue graduellement avec la température. La diminution du coefficient de performance est plus rapide à basse température, puis se ralentit progressivement.

Ce graphe montre que le réfrigérateur thermoélectrique est plus efficace lorsqu'il doit refroidir un espace interne à une température plus basse. Cela est probablement dû au fait que le réfrigérateur thermoélectrique est capable de transférer plus d'énergie thermique lorsqu'il y a une plus grande différence de température entre l'espace interne et l'environnement externe.

IV.6.facteur de mérite :

La valeur de ZT parait 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.

$$Z = \frac{2\Delta T_{\max}}{\left(T_c - \Delta T_{\max}\right)^2} = \frac{2 \times 74}{\left(299 - 74\right)^2} = 0,0029 \qquad \text{(IV.8)}$$

$$ZT = \frac{Z\left(T_c + T_f\right)}{2} = \frac{0,0029\left(299 + 275\right)}{2} = 0,83 \qquad \text{(IV.9)}$$

Conclusion générale :

La technologie de réfrigération thermoélectrique semble être une solution prometteuse qui utilise des matériaux semi-conducteurs pour substituer les compresseurs classiques. Pour ce projet de master, nous avons effectué une étude et une analyse d'un réfrigérateur thermoélectrique intégré qui satisfait aux normes d'énergie durable.

Les expériences menées ont révélé une nette variation de température d'environ 16°C, ce qui est encourageant et prometteur. Ces résultats ont fait l'objet d'une analyse approfondie et d'un débat approfondi.

Les avantages potentiels de la technologie thermoélectrique incluent une consommation d'énergie réduite, l'absence de refroidisseurs et une taille plus compacte par rapport aux systèmes traditionnels. Le réfrigérateur compact que nous proposons s'inscrit dans cette approche, proposant une solution énergétique économe pour les besoins de chaleur. Grâce à l'analyse des résultats obtenus, nous pourrons repérer les atouts du système et les améliorations nécessaires.

Grâce à sa performance énergétique et à son coût d'investissement, le réfrigérateur étudié dans le cadre de ce projet a le potentiel de rivaliser avec d'autres prototypes novateurs. Néanmoins, il reste encore des problèmes et des phénomènes à résoudre pour améliorer encore davantage le système. La régulation de certains paramètres de fonctionnement, le stockage des aliments dans le réfrigérateur et le poids de l'appareil sont parmi les sujets abordés.

Référence:

[1] Rowe, D. M. (2006). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. CRC Press.

[2] Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. Science, 321(5895), 1457-1461.

[3] DiSalvo, F. J. (1999). Thermoelectric cooling and power generation. Science, 285(5428), 703-706.

[4] nyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 7(2), 105-114.

[5] Dresselhaus, M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R. G., Lee, H., Wang, D. Z., ... & Gogna, P. (2007). New directions for low-dimensional thermoelectric materials. Advanced Materials, 19(8), 1043-1053.

[6] EDF, “Explained: Thermoelectricity | MIT News.” http://news.mit.edu/2010/explained-thermoelectricity-0427 (accessed Jun. 11, 2020).

[7] http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Effet%20Seebeck/fr-fr/

[8] Nozariasbmarz, A., Collins, H., Dycus, J. H., Liu, F., & Zhang, Y. (2020). Thermoelectric power generation: An in-depth review of materials, fabrication, devices, and applications. Applied Materials Today, 20, 100746.

[9] Encyclopaedia Britannica. (2023). Thermoelectric power generator. In Encyclopaedia Britannica. Retrieved from https://www.britannica.com/technology/thermoelectric-power-generator

[10] Science Struck. (2021). Applications of Thermoelectricity. Retrieved from https://sciencestruck.com/applications-of-thermoelectricity

[11] Physics Wave. (2021). Thermoelectric Devices: Benefits and Challenges. Retrieved from https://physicswave.com/thermoelectric-devices-benefits-and-challenges/

[12] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, "Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit," Physical Review B, vol. 47, no. 24, pp. 16631-16634, 1993

[13] A. I. Hochbaum et al., "Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires," Nature, vol. 451, no. 7175, pp. 163-167, 2008.

[14] Goldsmid, H. J. (2010). Introduction to Thermoelectricity. Springer Series in Materials Science.

[15] J. Roux-Briffaud, “La Thermoélectricité,” IUT Saint-Nazaire. p. 23, 2008.

[16] B. Aroua, Analyse Expérimentale De La Performance Thermoélectrique Des Modules Générateurs, Université De Montréal, Avril 2015.

[17] La thermoélectricité, Etude bibliographique, Roux-Briffaud jonas MP1 A2, 26/05/2008.

[18] R. Bude, Synthèse et Caractérisation De Matériaux Thermoélectrique Nano-structurés, Université Paris-Saclay Préparée a Centrale Supélec, 16 Avril 2018.

[19] J. Thielmann , Les technologies de refroidissement (les éléments Peltier vont-ils remplacés les compresseurs) , white paper BINDER ,2006.

[20] 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.

[21] 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.

[22] C. Ngo , H. Ngo , Introduction à la physique des semi-conducteurs, 2iéme cycle école d’ingénieurs , Dunod

[23] 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.

[24] E. S. Kolesar, “Thermoelectric cooling: Review and application,” 1981.

[25] M. Ilyas, “La structure électronique et les propriétés de transport des matériaux TiX 2 (X = S , Se et Te),” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF, 2017.

[26] D. Zhao and G. Tan, “A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications,” Appl. Therm. Eng., vol. 66, no. 1–2, pp. 15–24, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074.

[27] S. A. Abdul-Wahab et al., “Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator,” Renew. Energy, vol. 34, no. 1, pp. 30–34, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.04.026.

[28] M. Siahmargoi, N. Rahbar, H. Kargarsharifabad, S. E. Sadati, and A. Asadi, “An Experimental Study on the Performance Evaluation and Thermodynamic Modeling of a Thermoelectric Cooler Combined with Two Heatsinks,” Sci. Rep., vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-56672-9.

[29] P. Bellanger « Etude de l’influence des paramètres nano et microstructuraux sur les propriétés thermoélectriques des siliciures de magnésium (Mg2(Si, Sn) de type –n », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2014.

[30] H. Le-Quoc, « Matériaux thermoélectriques du type Mg2Si-Mg2Sn élaborés en couches minces par co-pulvérisation assistée par plasma », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2006.

[31] Z. H. Dughaish, Lead telluride as a thermœlectric material for thermœlectric power generation, Physica B, Vol. 322 (2002), pp. 205.

[32] J. W. Sharp, some properties of Ge-Te based thermœlectric materials, Proc 22nd International Conference on Thermœlectrics, La Grande Motte, France, 20

[33] fiche Internationale de sécurité pour le tellure: http: //www. cdc.gov/niosh/ipcsnfrn /nfrn0986. html

[34] B. Abeles, D. S. Beers, G. D. Cody et coll., Thermal conductivity of Ge-Si alloys at high temperatures, Physical Review, Vol. 125 (1962), pp. 44.

[35] O. Yamashita and N. Sadatomi, Thermœlectric properties of Si1-xGex (x<0.10) with alloy and dopant segregations, Journal of Applied Physics, Vol. 88, No. 1 (2000),

pp. 245.

[36] R. Zirmi « Etude et élaboration du siliciure de manganèse semi-conducteur pour applications thermoélectrique » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2013.

[37] G.S. Nolas, D.T. Morelli, T.M. Tritt, Skutterudites: A phonon-glass-electron crystal approach to advanced thermoelectric energy conversion applications, Annual Review of Materials Science, 29 (1999) 89.

[38] G.S. Nolas, J. Poon, M. Kanatzidis, Recent developments in bulk thermoelectric materials, MRS Bulletin, 31 (2006).

[39] Nolas, G., et al., Semiconducting Ge clathrates: Promising candidates for thermoelectric applications. Applied Physics Letters, 1998. 73(2): p. 178-180.

[40] La thermoélectricité, Etude bibliographique, Roux-Briffaud jonas MP1 A2, 26/05/2008.

[41] Thi thanh xuan vo, nanomatériaux pour applications thermoélectriques, thèse de doctorat, université paris-sud, 2015.

[42] B, Le noir, J.P.Michenaud et A.Dauscher, Thermoélectricité des principes aux applications, Technique de l'ingénieur, 2010.

[43] ' Etude et réalisation d'un réfrigérateur thermoélectrique opérant autour de la température ambiante', Présenté par : M. Abdelmadjid BENKACEM et M. Fethi HAIF, Promotion 2022/2023

[44] Y. Chiba, Y. Marif, A. Boukaoud, K. Brahim, A. Tlemcani, N. Henini. A multi stage study of thermoelectric device based on semi-conductor materials. Lecture Notes in Networks and Systems (2018), pp. 560-565

[45] Kherkhar, A., Chiba, Y., Tlemçani, A., & Mamur, H. (2022). Thermal investigation of a thermoelectric cooler based on Arduino and PID control approach. Case Studies in Thermal Engineering, 36, 102249.