



**Université Africaine Ahmed draya –Adrar-  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département : Science de la Matière**

Mémoire présenté par  
***Zoui Mohamed Amine***

En vue de l'obtention de diplôme de  
***Master en physique***  
***Spécialité : Physique Energétique et Energie Renouvelable***

***Thème***

**Etude expérimentale d'un module  
thermoélectrique avec réalisation d'une  
application à effet Peltier**

Soutenue publiquement Mai 2017 devant le jury composé de :

Mr D.CHOGGEUR	Président	Professeur- Université -Adrar
Mr S.BENTOUBA	Encadreur	Professeur- Université - Adrar
Mr A.BENATILLAH	Encadreur	Professeur- Université - Adrar
Mr B.OMARI	Examineur	Professeur- Université - Adrar

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail:*

*A mon très Cher Père*

*A ma très Chère Mère*

*A mes très Cher Frères*

*A mes très Chères Sœurs*

*A ma très Chère et Fidèle Epouse*

*A mes très Chères Enfants*

*A mes meilleurs amis*

*A toute la promotion*

*Physique énergétique et énergie renouvelable*

*Zoui Mohamed Amine*

# *Remerciements*

*En premier je remercie le DIEU tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.*

*Je remercie mes encadreurs **Professeur A.BENATILLAH** et **Docteur S.BENTOUBA** enseignants au département sciences de la matière, Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur à l'Université Ahmed Draya-Adrar-, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses encouragements et ses conseils judicieux tout le long de la réalisation de ce mémoire. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury pour avoir accepté d'examiner le travail.*

*Mr **CHOGGEUR DJILALI** Professeur à l'Université Ahmed Draya-Adrar-, pour avoir accepté de présider le jury.*

*Que Mr **OMARI BOUMEDIENE** Professeur à l'Université Ahmed Draya-Adrar-, trouve ici notre reconnaissance pour nous avoir enseigné et pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je tiens également à présenter mes sincères remerciements aux responsables et collègues de travail au sein de la raffinerie d'Adrar sur tout service planning et méthode pour leurs aide et encouragement pendant mes étude.*

*Je remercie Mr **M.BOUZIDI** responsable machine outille pour son aide pendant la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à remercier profondément tous les enseignants du département sciences de la matière et de département sciences technique et tous les étudiants de la promotion.*

*Je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# SOMMAIRE

---

## Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etat de l'art de la thermoélectricité.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1. Introduction:.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.Historique des matériaux thermoélectriques : .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.Situation contemporaine et renaissance :.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4. Matériaux thermoélectriques :.....</b>	<b>6</b>
I.4.1.Matériaux utilisés dans les systèmes actuels : .....	6
I.4.2. Nouveaux matériaux thermoélectriques : .....	9
<b>I.5. Applications en thermoélectricité : .....</b>	<b>10</b>
I.5.1. Modules à effet Peltier :.....	11
I.5.2 Thermo générateurs : .....	12
<b>I.6. Conclusion .....</b>	<b>11</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre II : Formulation mathématique de la thermoélectricité....</b>	<b>18</b>
<b>II.1. Introduction : .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2. Définition de la Thermoélectricité : .....</b>	<b>18</b>
<b>II.3. Propriétés physiques et chimiques : .....</b>	<b>18</b>
II.3.1. La conductivité électrique : .....	18
II.3.2.La conductivité thermique :.....	18
II.3.3.Le coefficient Seebeck : .....	19
Explication du phénomène.....	19
II.3.4. Le coefficient de Peltier d'un matériau :.....	20
Schéma de principe .....	20
Explication du phénomène.....	20
II.3.5. Le coefficient de Thomson :.....	21
II.3.6. Les relations de Kelvin :.....	21
<b>II.4. Bilan thermique du module thermoélectrique.....</b>	<b>22</b>
<b>II.5. Rendement et Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques .....</b>	<b>24</b>
<b>II.6. Conclusion.....</b>	<b>23</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>29</b>
<b>Chapitre III : Etude expérimentale d'un module Peltier .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1. Introduction :.....</b>	<b>31</b>

<b>III.2. Expérience A (détermination des paramètres physique du module) :</b>	<b>31</b>
III.2.1. Introduction :	31
III.2.2. But de l'expérience :	32
III.2.3. Schéma du montage	32
III.2.4. Protocole de l'expérience :	33
III.2.5.2. Paramètres calculée.	34
III.2.6. Interprétation des résultats :	35
III.2.6.1. Calcule de la résistance à Température ambiante $R_{am}$ du module TE.	35
III.2.6.2. Variation de la résistance en fonction de la température :	35
III.2.6.3. Calcule du pouvoir thermoélectrique (S) du module TE :	36
III.2.6.4. Calcule de la chaleur dégager et absorbé par le module :	37
III.2.6.5. Calcule du coefficient de performance COP :	38
<b>III.3. Expérience B (refroidissement avec dissipateur de chaleur) :</b>	<b>39</b>
III.3.1. Introduction :	39
III.3.2. But de l'expérience :	40
III.3.3. Schéma du montage	40
III.3.4. Protocole de l'expérience :	41
III.3.5. Résultats expérimentales :	41
III.3.5.1. Paramètres d'entrée et mesurée :	41
III.3.5.2. Paramètres calculée :	42
III.3.6. Interprétation des résultats :	43
III.3.6.1. Résistance $R_{am}$ :	43
III.3.6.2. Coefficient Seebeck S.	43
III.3.6.3. Chaleur absorbée $Q_f$ et coef de performance COP:	44
On trace les deux courbes représentant la chaleur absorbé dans les deux expériences.	44
III.3.6.4. Le rendement des deux systèmes :	45
III.3.6.5. Vitesse de ventilation :	46
<b>III.4. Conclusion :</b>	<b>46</b>
<b>Chapitre IV : Conception et réalisation d'une fontaine fraîche</b>	
<b>thermoélectrique</b>	<b>48</b>
<b>IV.1. Introduction :</b>	<b>48</b>
<b>IV.2. Définitions :</b>	<b>48</b>
IV.2.1. Fontaine d'eau fraîche :	48
IV.2.2. Eau fraîche :	48

IV.2.3. Besoin journalier en eau par individu :.....	48
<b>IV.3.Cahier des charges du projet.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.4. Etude théorique et expérimentale :.....</b>	<b>50</b>
IV.4.1. Capacité du module à refroidir un volume d'eau .....	50
IV.4.2. Choix du récipient : .....	51
IV.4.3. Calcule des pertes thermiques de la bonbonne :.....	51
IV.4.3.1. Protocole de l'expérience : .....	52
IV.4.4. Installation du module dans la bonbonne : .....	53
IV.4.5. Mise à l'épreuve du prototype :.....	55
IV.4.5.1. Protocole de l'essai :.....	55
IV.4.5.2. Résultats :.....	55
IV.4.5.3. Graphe température en fonction du temps :.....	56
IV.4.5.4. Interprétation des résultats :.....	57
<b>IV.5. Installation des accessoires : .....</b>	<b>57</b>
<b>IV.5.1. Séparateur :.....</b>	<b>57</b>
IV.5.2 Affichage de la température : .....	58
IV.5.3 Branchement électrique : .....	58
IV.5.4. montage finale : .....	59
<b>IV.6.Conclusion :.....</b>	<b>59</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>47</b>

## Liste des figures et tableaux

### Chapitre I : Etat de l'art de la thermoélectricité

<b>Figure I.1:</b> Facteur de mérite réduit des matériaux thermoélectriques de type n en fonction de la température.....	6
<b>Figure I.2:</b> Facteur de mérite réduit des matériaux thermoélectriques de type p en fonction de la température.....	6
<b>Figure I.3:</b> Structure cristallographique d'une skutterudite.....	8
<b>Figure I.4:</b> Structure cristallographique d'un clathrate de type I (a) et de type II (b).....	9
<b>Figure I.5:</b> Microprocesseur et glacière de camping équipés de modules à effet Peltier.....	11
<b>Figure I.6:</b> Représentation et description d'un RTG.....	11
<b>Figure I.7:</b> Représentations de générateurs thermoélectriques équipant des prototypes de véhicule.....	12
<b>Figure I.8:</b> Montre et appareil médical (oxymètre à pouls) alimentés par des dispositifs thermoélectriques.....	13

### Chapitre II : Formulation mathématique de la thermoélectricité

<b>Figure II.1:</b> Principe de l'effet Seebeck.....	18
<b>Figure II.2 :</b> Principe de l'effet Peltier.....	19
<b>Figure II.3:</b> Thermocouples fonctionnant en réfrigération (a) ou en génération d'électricité(b).....	23
<b>Figure II.4:</b> Conductivité électrique, coefficient Seebeck $S$ , conductivité thermique $\lambda$ et le facteur de puissance $S^2$ en fonction de la concentration des porteurs de charge.....	26
<b>Tableau II.1:</b> Valeurs des grandeurs thermoélectriques, à température ambiante pour : isolants, semi-conducteurs et métaux.....	27.

### Chapitre III : Etude expérimentale d'un module Peltier

<b>Figure III.1 :</b> Le module Peltier utilisé dans les expériences.....	30
<b>Figure III.2:</b> Schéma banc d'essai expérience. A.....	31
<b>Figure III.3:</b> Photo banc d'essai expérience A Laboratoire de l'université d'Adrar.....	31
<b>Figure III.4:</b> Courbe $I=f(U)$ .....	34
<b>Figure III.5:</b> Résistance en fonction de la température.....	35
<b>Figure III.6:</b> Tension $U_s$ en fonction de $dT$ .....	35



<b>Figure III.7:</b> Courbes chaleur en fonction de la tension.....	36
<b>Figure III.8:</b> le COP et Ec en fonction de la tension.....	37
<b>Figure III.9:</b> Rendement du module TE.....	38
<b>Figure III.10 :</b> Schéma banc d’essai (expérience B).....	39
<b>Figure III.11 :</b> Photo du banc d’essai expériences B laboratoire d’Adrar.....	39
<b>Figure III.12 :</b> Changement de Ram dans les deux expériences.....	42
<b>Figure III.13 :</b> Coefficient Seebeck des deux expériences .....	43
<b>Figure III.14 :</b> Chaleur absorbée exp A et B.....	43
<b>Figure III.15 :</b> COP exp A et B.....	44
<b>Figure III.16 :</b> Rendement des deux expériences.....	44
<b>Figure III.17 :</b> Impact de la vitesse de refroidissement.....	45
<b>Tableau III.1 :</b> Valeur d’entrée et de mesure.....	32
<b>Tableau III.2 :</b> Valeurs calculée.....	33
<b>Tableau III.3 :</b> Valeurs d’entrée et mesurée.....	40
<b>Tableau III.4 :</b> Valeurs calculée.....	41
<b>Chapitre IV : Conception et réalisation d’une fontaine fraiche thermoélectrique</b>	
<b>Figure IV.1:</b> Glacière bonbonne choisi.....	50
<b>Figure IV.2 :</b> Calcule des pertes Thermiques.....	50
<b>Figure IV.3 :</b> Influence des pertes thermiques sur le système.....	52
<b>Figure IV.4 :</b> Dispositif d’absorbeur de chaleur.....	52
<b>Figure IV.5 :</b> Absorbeur installé dans l’enceinte.....	52
<b>Figure IV.6 :</b> Schéma de montage de la fontaine fraiche.....	53
<b>Figure IV.7 :</b> Montage de la pompe à chaleur.....	53
<b>Figure IV.8 :</b> $T = f(t)$ .....	55
<b>Figure IV.9 :</b> Système de séparation et ajustement de volume des réservoirs.....	56
<b>Figure IV.10 :</b> Système de mesure de la température.....	57
<b>Figure IV.11 :</b> Schéma électrique et source d’alimentation.....	57
<b>Figure IV.12 :</b> Photo de la fontaine fraiche terminée.....	58

## SOMMAIRE

---

<b>Tableau IV.1</b> : Valeurs nutritionnelles de référence pour l'eau.....	48
<b>Tableau IV.2</b> : Calcule des pertes thermiques.....	51
<b>Tableau IV.3</b> : Teste de la fontaine à 20°C.....	54
<b>Tableau IV.4</b> : Teste de la fontaine à 27.6°C.....	55

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

## Introduction Générale

Les problématiques de production d'énergie et de protection de l'environnement se révèlent parmi les enjeux majeurs de ce début de XXIème siècle. La production d'énergie actuelle se base principalement sur l'exploitation des énergies fossiles qui sont polluantes, émettrices de gaz à effet de serre et dont les ressources s'épuiseront dans quelques décennies. Parmi les autres sources d'énergies possibles, la filière nucléaire, qui semblerait être la seule à pouvoir permettre de répondre à une demande massive en énergie, voit actuellement son essor mondial fortement limité suite à l'accident nucléaire de la centrale de Fukushima Daiichi (Japon) en mars 2011.

L'avenir énergétique passe probablement par une diminution nécessaire de l'énergie mondiale consommée et par le développement et l'utilisation de plus en plus de sources d'énergie multiples et renouvelables (solaire, éolien, hydrolienne, ..... ) en appoint aux sources d'énergie actuellement exploitées.

La consommation algérienne d'hydrocarbures a doublé en 10 ans, et le ministère de l'Energie prévoit une augmentation entre 2013 et 2030 de 16 à 30 millions de tonnes pour les carburants, et de 32 à 60 milliards de m<sup>3</sup> pour le gaz naturel. On constate que le pays est en train de devenir l'un des modèles les plus énergivores en Afrique et en Méditerranée avec un taux de croissance qui a atteint ou même dépassé les 14% par an pour l'électricité. La consommation énergétique nationale est en croissance importante et continue.

Il faut aboutir à une stratégie énergétique où toutes les forces vives du pays participent (les départements ministériels, les universités, les organisations syndicales, la société civile au sens large). La mise en place d'un bouquet énergétique permettra d'une part, de créer de la richesse en développant à marche forcée les énergies renouvelables, notamment le solaire thermique et photovoltaïque, la géothermie et l'éolien.

Parmi ces différentes sources d'énergie, la thermoélectricité s'affirme actuellement comme une source d'énergie alternative prometteuse pour le futur, les matériaux thermoélectriques ayant en effet la particularité de convertir directement un flux de chaleur en énergie électrique (effet Seebeck) et inversement un courant électrique en flux thermique (effet Peltier). L'utilisation de la thermoélectricité semble particulièrement judicieuse en «offrant l'opportunité» de recycler l'énergie perdue sous forme de chaleur (notamment produite par l'industrie ou les transports routiers en particulier) en électricité. Ces dispositifs sont en outre particulièrement fiables, silencieux et ne génèrent pas de vibrations car leur fonctionnement ne requiert aucune pièce mobile.

Un effort important pour développer techniquement la conversion énergétique utilisant des matériaux solides a été engagé à partir des années 1950. C'est au cours des années 1960 qu'ont été développés les programmes de recherche les plus importants dans ce domaine à partir des matériaux semi-conducteurs. Les propriétés désirées pour les matériaux sont déterminées par le biais du facteur de mérite ZT qui dépend des propriétés de transport du matériau comme la résistivité électrique, le coefficient de Seebeck et la conductivité thermique.

Actuellement, les dispositifs thermoélectriques délivrent une puissance électrique limitée (typiquement inférieure à 7% du rendement de Carnot) Mais la fiabilité et la simplicité de ces dispositifs contrebalancent ce problème.

Ainsi, la thermoélectricité, ou conversion d'énergie à partir de la chaleur, fait partie de ces nouvelles sources d'énergies renouvelables.

La conversion d'énergie thermique en énergie électrique est l'un des piliers des temps modernes. Des millions de tonnes d'énergie fossile sont chaque jour sacrifiées à la fée électricité pour notre confort. Pourtant, une large part de cette énergie se perd dans l'atmosphère sous forme de chaleur dans les centrales électriques, ne pouvant pas être efficacement exploitée.

La conversion thermoélectrique apporte une nouvelle voie à la demande croissante en source d'énergie électrique. La conversion thermoélectrique n'utilise pas des systèmes mécaniques, aussi complexes que fragiles et coûteux en entretien. Elle est non-polluante contrairement aux batteries parce que les générateurs thermoélectriques ont une durée de vie presque illimitée.

La conversion thermoélectrique a déjà fait ses preuves, notamment comme production d'énergie électrique pour les sondes spatiales lointaines. Outre cet aspect d'apport d'électricité, les matériaux thermoélectriques sont utilisés pour la réfrigération (effet Peltier) avec de nombreuses applications dans le domaine de l'électronique. Bien que découverte il y a plus d'un siècle, la conversion thermoélectrique n'est pas encore passée au stade d'application à grande échelle du fait des efficacités limitées des générateurs thermoélectriques dues essentiellement au faible facteur de mérite ZT.

Actuellement, la majorité des dispositifs existant concernent des modèles réalisés à partir de matériaux à base de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  solides et de ses dérivés. Mais ces matériaux ne sont à la fois ni biocompatibles (matériaux toxiques), ni intégrables à petite échelle.

Boire de l'eau est vitale pour l'homme et dans les régions chaude et surtout en été devient une nécessité instantanée de boire d'eau fraîche, qui est pour les pluparts est impossible vu leurs mode de vie (les nomades bédouins) ou leurs système et lieu de travail.

Pour résoudre ce problème et on exploitant le pouvoir de refroidissement des modules thermoélectriques avec faible puissance qui peut être alimenté soit avec un petit panneau solaire ou batterie (prise 12V d'une voiture) ou même une prise 220V du réseau publique (par l'intermédiaire d'un transformateur), on va étudier la possibilité de réaliser une fontaine fraîche portative à faible consommation et divers source d'alimentation déjà citée, donnent l'opportunité à l'individu de boire de l'eau fraîche à tout moment et tout lieux.

Dans le premier chapitre nous présentons l'historique des matériaux thermoélectriques ; les technologies actuelles ainsi que les technologies de conversion thermique.

Le deuxième chapitre est consacré à les différentes notions abordées en thermoélectricité, notamment la figure de mérite ZT servant à caractériser les performances des composés thermoélectriques.

Le troisième chapitre, deux expériences ont été réalisées pour permettre d'extraire ou de calculer les grandeurs physique d'un module Peltier en Basant sur les théories et lois qui agisse sur la thermoélectricité et nous avons discutés les résultats de notre expérience.

Le quatrième chapitre a été consacré à concevoir une glacière (fontaine fraîche) qui refroidit l'eau et de le conserver à une température acceptable avec un module Peltier de faible puissance. Enfin une conclusion générale clôture ce mémoire de master.

# *Chapitre I*

---

*ETAT DE L'ART DE LA THERMOELECTRICITE*

---

# Chapitre I :

## ETAT DE L'ART DE LA THERMOELECTRICITE

### I.1. Introduction:

Ce chapitre introductif a pour objectif de décrire chronologiquement les différentes découvertes effectuées dans cette thématique. Les recherches en thermoélectricité, effet liant le flux de chaleur qui traverse un matériau au courant électrique qui le parcourt, Ceci nous amènera ensuite à présenter différentes applications, actuelles et futures, exploitant les systèmes de conversion thermoélectriques, production de courant électrique à partir d'une source de chaleur et vice-versa connaissent actuellement un développement important lié aux recherches portant sur de nouvelles sources d'énergies non polluantes pour le futur, les problèmes environnementaux et d'accès à l'énergie s'avérant parmi les enjeux majeurs du XXIème siècle.

A la fin de ce chapitre sont présentés différents composés thermoélectriques étudiés actuellement pour des applications en thermoélectricité.

### I.2. Historique des matériaux thermoélectriques :

Volta semble être le premier en 1794 à avoir mis en évidence un phénomène thermoélectrique. Le livre de Mario Glozzi « Storia della Fisica » de 1796, comporte une section « effets thermoélectriques » Il y indique que Volta avait mis une extrémité d'un conducteur en fer dans de l'eau bouillante et constate l'effet d'un courant électrique sur une grenouille. C'est donc un phénomène thermoélectrique.

Mais ce n'est qu'en 1821 que Thomas Johann Seebeck, physicien allemand, met en évidence la différence de potentiel qui se crée à la jonction entre deux matériaux lorsqu'ils sont soumis à un gradient de température [1]. Composé d'un simple anneau de moitié bismuth et de moitié cuivre, son expérience montra qu'en chauffant la jonction entre ses deux métaux, un courant apparaît et circule dans l'anneau, capable de dévier une aiguille aimantée [2]. Bien qu'il attribue faussement ce résultat à l'apparition d'un champ magnétique, il venait d'inventer la pile thermoélectrique utilisant un nouvel effet qui prendra plus tard son nom: l'effet Seebeck.

En 1834, un horloger et inventeur français installé à Genève, Jean Peltier, découvre le second effet thermoélectrique : une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de natures différentes soumis à un courant électrique.

En 1838, un physicien germano balte, Heinrich Lenz, montre que de la chaleur est absorbée ou libérée à une jonction thermoélectrique suivant le sens du courant.

En 1851, un physicien anglais, William Thomson, (Lord Kelvin) montre que les effets Seebeck et Peltier sont liés [3]: un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Réciproquement, un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de



chaleur. La différence fondamentale entre les effets Seebeck et Peltier considérés séparément et l'effet Thomson est l'existence de ce dernier pour un seul matériau et l'inutilité d'une jonction.

En 1909, un thermodynamicien allemand, Edmund Altenkirch, calcule pour la première fois correctement l'efficacité énergétique d'un générateur thermoélectrique fondé sur l'effet Seebeck.

En 1949, un académicien et chercheur russe A.F. IOFFE a développé une théorie sur les semi-conducteurs thermoélectriques [4]. En 1956, le même auteur a conçu l'idée de l'alliage, ou former des solutions solides, semi-conducteurs isomorphes dans le but de réduire la conductivité thermique des matériaux thermoélectriques [5].

Du fait d'une absence de progrès jusque dans les années 1970, il a été postulé qu'un ZT de 1 était une sorte de barrière d'efficacité thermoélectrique. Cette limite empirique a altéré grandement l'intérêt porté aux recherches dans le domaine de la thermoélectricité, sachant qu'un ZT d'au moins 3 est nécessaire pour concurrencer les systèmes de réfrigération classiques utilisant des fluides caloporteurs.

Au début des années 1990, l'espoir renaît avec les travaux théoriques de Hicks et Dresselhaus [6,7] qui proposent d'utiliser des matériaux présentant des structures de basse dimensionnalité. Selon leurs calculs, l'utilisation de Tellure de Bismuth ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) avec une structure de type multi-puits quantiques permettrait de multiplier par 13 le facteur de mérite du  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  massif [6]. De même, un ZT spectaculaire de 1.4 est prédit pour des fils quantiques à base de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [7]. De telles prédictions à l'époque même où les nanotechnologies explosent ont donc provoqué un regain d'intérêt pour la recherche en thermoélectricité. Cependant, il faut attendre le début des années 2000 pour voir apparaître les premiers matériaux thermoélectriques nanostructurés, présentant des ZT dépassant la limite empirique de 1. Venkatasubramanian et al. [8] mettent en avant en 2001 des super réseaux constitués de couches minces de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  et de Tellure d'Antimoine ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) présentant un ZT record de 2,4 à température ambiante. L'année suivante Harman et al. Présentent des super-réseaux à boîtes quantiques à base de  $\text{PbSeTe}$  comportant un ZT de 1,6 à température ambiante [9]. Plus tard, en 2004, Hsu et al. Proposent un matériau massif à base de  $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$  comportant des inclusions nanométriques riches en Ag-Sb avec un  $\text{ZT} \sim 2,2$  à la température de 800K [10]. Bien que cette température soit trop élevée pour envisager des applications en réfrigération, ce type de matériau peut tout de même être intéressant pour la génération d'énergie électrique.

En 2008, Poudel et Al proposent de réaliser la mécano-synthèse d'alliages massifs de  $\text{BiSbTe}$  constitués d'une multitude de grains nanométriques. Les matériaux obtenus présentent alors un ZT maximum de 1,4 à la température de 100°C [11]. La même année, deux travaux dévoilent des ZT de 0,6 à 300 K et de 1 à 200 K pour des nanofils de silicium, alors que le ZT du silicium massif est de l'ordre de 0,01 à 300 K [12].

De nos jours, la recherche dans ce domaine se concentre autour d'une optimisation du facteur de mérite, qui a pris toute son ampleur depuis le début des années 2000 avec le développement fulgurant des nanotechnologies et plus particulièrement des techniques de nano-fabrication. La nano-structuration permet effectivement de moduler les propriétés des matériaux indépendamment les unes des autres et apporte donc, en ce sens, un renouveau dans le domaine de recherche de la thermoélectricité [13].

### **I.3.Situation contemporaine et renaissance :**

Depuis 1960, la recherche scientifique en matière de thermoélectricité était devenue insignifiante et aucune école de par le monde n'enseignait plus cette discipline, tandis qu'à l'INPI, seules quelques très rares demandes de brevets y avaient encore été déposées pour des applications.

Le premier choc pétrolier de 1973 n'avait rien changé à cette situation. Aux États-Unis, la NASA avait cependant encore produit quelques thermopiles pour le domaine spatial, tandis qu'en France, trois petites entités s'occupaient encore de thermoélectricité,

En 1996 se produisit un fait nouveau : l'INPI enregistra soudainement de très fortes demandes de brevets d'inventions en matière de thermoélectricité. Les demandes ne cessèrent de progresser d'année en année et en 2005, cette progression devint quasi exponentielle.

Ainsi, aujourd'hui, soit un demi-siècle après Abram Ioffé, on enregistre plusieurs centaines de demandes de brevets à l'INPI, chaque année pour la thermoélectricité, alors qu'avant 1996, les demandes étaient réduites à une ou deux unités par an et le plus souvent, à aucune !

À présent, la thermoélectricité est à nouveau enseignée, y compris dans les écoles les plus prestigieuses de par le monde. Pour l'instant, il n'existe pas d'explication prouvée pour ce regain d'intérêt, mais par contre on sait que cette renaissance a bien démarré en France si l'on se base sur le nombre de brevets déposés et sur le nombre de thèses universitaires réalisées.

### **I.4. Matériaux thermoélectriques :**

#### **I.4.1. Matériaux utilisés dans les systèmes actuels :**

Cette partie a pour objectif de présenter les principaux matériaux thermoélectriques selon leur intervalle de température d'application mais aussi de justifier le choix de ceux qui seront utilisés et développés par la suite dans ce manuscrit, les siliciures de germanium. Les matériaux thermoélectriques n'ont de bonnes performances thermoélectriques que dans un intervalle de température restreint, où leur facteur de mérite réduit atteint un maximum et reste à peu près constant. Ainsi, la température moyenne d'application impose le choix du matériau thermoélectrique [14]. Il est donc souhaitable de considérer les matériaux thermoélectriques en fonction d'une gamme de température. Pour cela, des graphiques, comme ceux de C. Godart en 2009 [15], répertorient les évolutions de ZT en fonction de la température des principaux matériaux thermoélectriques de type n (Figure I.1) et de type p (Figure I.2).

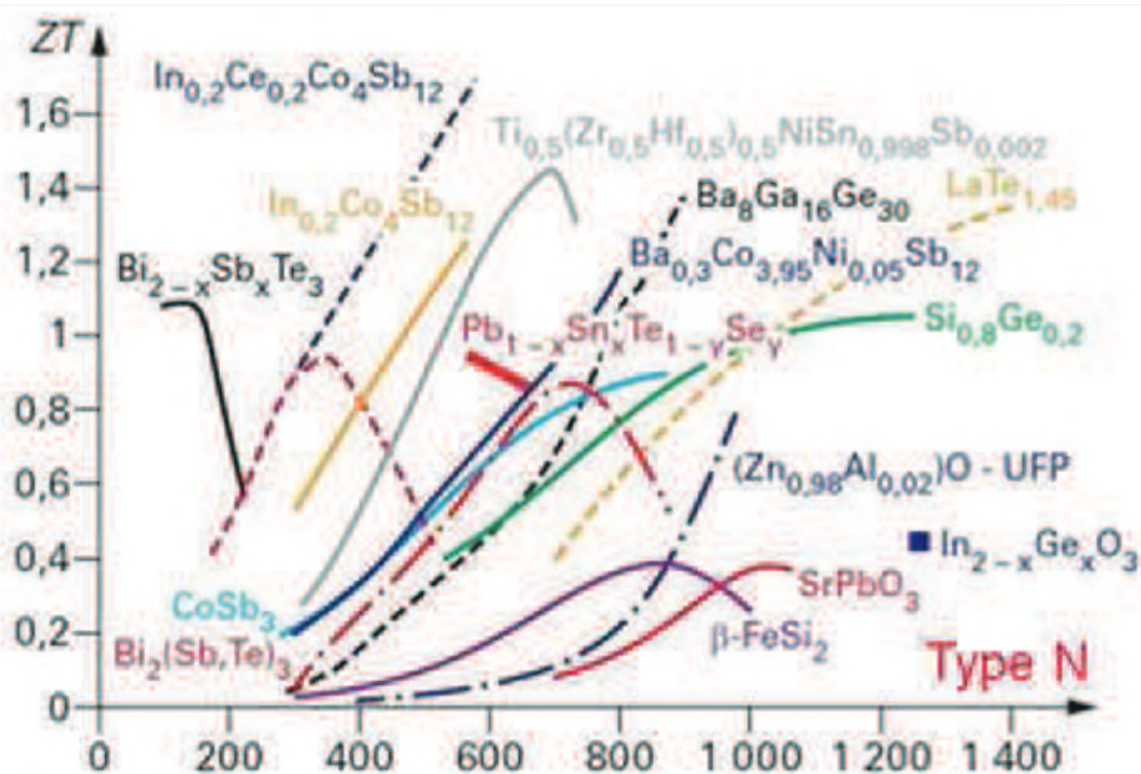


Figure I.1: Facteur de mérite réduit des matériaux thermoélectriques de type n en fonction de la température [15]

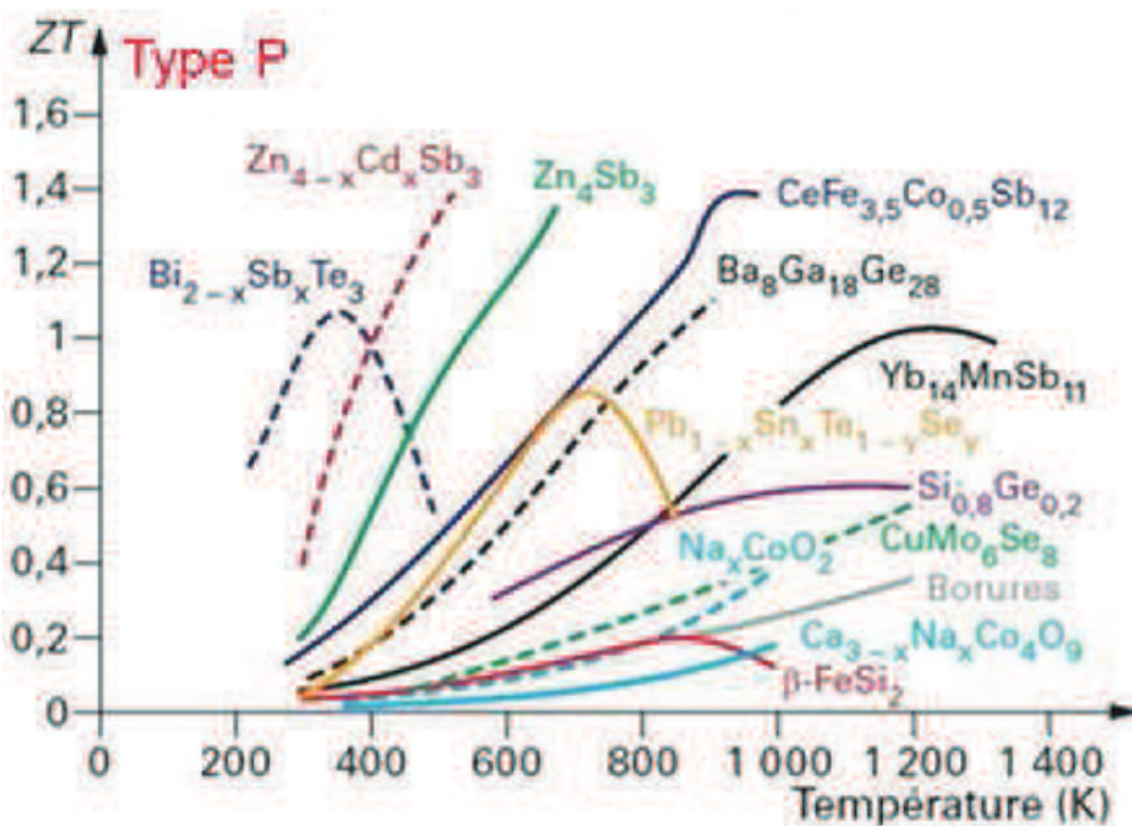


Figure I.2: Facteur de mérite réduit des matériaux thermoélectriques de type p en fonction de la température [15]

Les matériaux thermoélectriques performants dans les différentes gammes de température sont détaillés ci-dessous.

### A. Basses températures :

Le matériau thermoélectrique le plus fréquemment utilisé aux basses températures (150 K-200 K), est constitué sur la base de  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  (alliage de bismuth et d'antimoine) et ne présente malheureusement de bonnes propriétés thermoélectriques qu'en type n (conduction par les électrons), ce qui restreint le rendement de conversion du dispositif puisque aucun matériau n'est efficace en type p dans cette gamme de température (rappelons qu'un dispositif de conversion thermoélectrique est constitué à la fois de branches p et n). Curieusement, tandis que ses propriétés sont assez moyennes ( $ZT \sim 0,6$ ), l'application d'un champ magnétique sert à doubler le facteur de mérite qui dépasse alors l'unité. Ce matériau est par conséquent le plus souvent utilisé en association avec un aimant permanent. [16]

### B. Voisinage de la température ambiante :

Le matériau le plus étudié à l'heure actuelle est  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (alliage de bismuth et de tellure). Il est utilisé dans l'ensemble des systèmes fonctionnant au voisinage de la température ambiante, ce qui inclut la majorité des systèmes de réfrigération thermoélectrique. Les meilleures performances sont obtenues quand il est allié à  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (alliage d'antimoine et de tellure) qui possède la même structure cristalline [17]. Des échantillons de type p comme de type n peuvent être obtenus par de petites variations de composition au voisinage de la stœchiométrie. Dans les deux cas, des valeurs du facteur de mérite  $ZT$  proches de 1 sont obtenues au voisinage de la température ambiante [18]. Ces bonnes valeurs de  $ZT$  sont obtenues en partie grâce à la très faible conductivité thermique  $\lambda$ , proche de  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  dans les meilleurs matériaux.

### C. 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  $\text{PbTe}$  et ses alliages ( $\text{PbSnTe}$ ) ( $\text{Sn} = \text{étain}$ ). Les deux composés  $\text{PbTe}$  et  $\text{SnTe}$  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 [19]. Cependant, ces valeurs sont obtenues seulement dans les matériaux de type n.  $\text{PbTe}$  ne peut par conséquent pas à l'heure actuelle former à lui seul les deux branches d'un thermo-élément. La branche p est par conséquent le plus souvent constituée d'un matériau de type TAGS (pour Tellure-Antimoine-Germanium-Argent), qui quant à lui permet d'obtenir des facteurs de mérite supérieurs à l'unité à 700 K seulement en type p [20]. Il apparaît par conséquent essentiel de développer un nouveau matériau qui puisse être utilisé à la fois en type p et en type n dans cette gamme de température. 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). [21]

### D. Hautes températures :

Les alliages à base de silicium et germanium possèdent de bonnes caractéristiques thermoélectriques aux hautes températures (au-dessus de 1 000 K) et sont surtout utilisés pour la

génération d'électricité dans le domaine spatial [22] [23]. Ce sont surtout des alliages de ce type qui sont utilisés pour l'alimentation en électricité de la sonde Voyager.

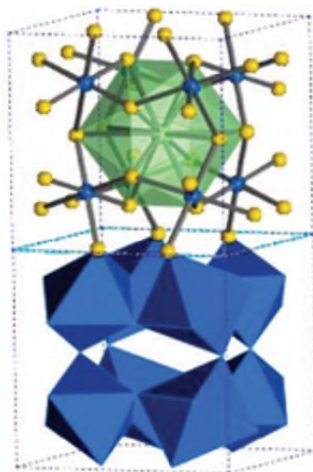
### I.4.2. Nouveaux matériaux thermoélectriques :

Ce sont des matériaux Intermétalliques:

#### A. Skutterudites :

Les skutterudites ont une structure cubique (de type  $\text{CoAs}_3$ ) composée de 8 octaèdres  $\text{TX}_6$  (avec  $T = \text{Co}, \text{Rh}, \text{Ir}$  et  $X = \text{P}, \text{As}, \text{Sb}$ ) qui sont liés entre eux par les sommets (figure I.3) Les vibrations de l'atome inséré dans le site vacant va permettre de diminuer la conductivité thermique du matériau par diffusion des phonons et permet d'améliorer ainsi les performances thermoélectriques du matériau [24] Plus l'atome inséré est petit et lourd, plus les amplitudes de vibration de l'atome seront importantes et conduiront à une diminution significative de la conductivité thermique de réseau.

La figure de mérite  $ZT$  atteint une valeur proche de 1,4 pour des températures supérieures à  $900^\circ\text{C}$  [25] L'inconvénient majeur de ces composés demeure leur instabilité en raison de la sublimation de l'élément  $\text{Sb}$  à haute température.

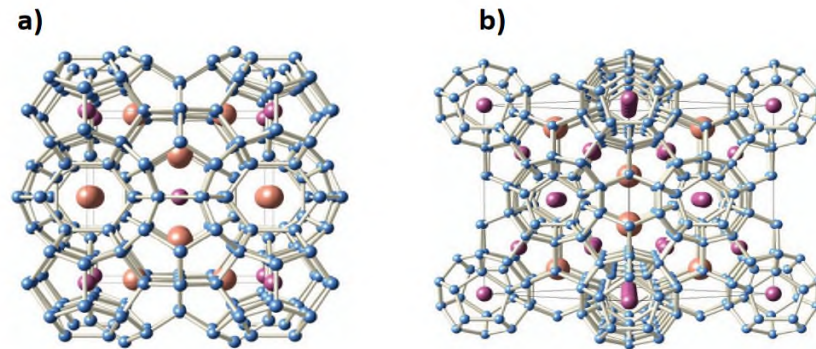


**Figure I.3:** Structure cristallographique d'une skutterudite.

L'atome hôte se situe dans la structure verte, entourée d'atomes jaunes (éléments  $\text{Bi}, \text{Sb}, \text{As}, \text{P}$  ou  $\text{N}$ ). Les sites métalliques sont représentés en bleu. L'environnement octaédrique de ces sites est représenté en bleu dans la partie inférieure de la figure [26].

#### B. Clathrates :

Les clathrates sont des solides périodiques dans lesquels des atomes (typiquement  $\text{Si}, \text{Ge}$  ou  $\text{Sn}$ ), reliés entre eux sous forme de tétraèdres, vont former un réseau de cages dans lesquelles peuvent être insérés d'autres types d'atomes [27] figure I.4 En effet, ces matériaux présentent une conductivité thermique très faible, un remplissage total ou partiel de la structure est possible. Ceci permet de contrôler le taux de dopage et ainsi ajuster le facteur de puissance du matériau.



**Figure I.4:** Structure cristallographique d'un clathrate de type I (a) et de type II (b).

Le réseau atomique est représenté en bleu tandis les atomes hôtes sont représentés en orange et violet en fonction de la cage qu'il occupe [26]

De ce fait la chimie de ces composés est également très riche car il est possible de moduler les propriétés thermoélectriques de ces matériaux en fonction de la nature des atomes remplisseurs mais aussi de travailler sur des substitutions atomiques pour optimiser les propriétés de transport électrique [28]. L'une des valeurs de ZT les plus élevées observées dans ce type de matériaux a été reportée pour le composé  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$  ( $\text{ZT} = 1,35$  à 900 K)[29]. Cependant, le contrôle de la stœchiométrie du composé est difficile et peut engendrer l'apparition de phases secondaires. De plus, les clathrates présentent une résistance à la corrosion insuffisante dans l'air et leur point de fusion est bas [30].

### C. Phases de Zintl :

Parmi les différents matériaux «PGEC» actuellement développés, les composés ternaires polycristallins de type p dérivés des phases de Zintl  $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$  se révèlent parmi les plus prometteurs. Ces composés sont d'ailleurs très étudiés par la NASA afin d'être intégrés dans des thermo-générateurs RTG car leurs performance thermoélectrique à haute température ( $>900\text{k}$ ) sont quatre fois supérieures à celles des alliages SiGe actuellement utilisé [31].

## I.5. Applications en thermoélectricité :

Si la découverte des phénomènes thermoélectriques remonte au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'idée d'utiliser ces effets comme source d'énergie électrique ou thermique n'a été envisagée qu'en 1885 par Rayleigh [32].

Jusqu'à récemment l'application courante de ce phénomène a été le thermocouple pour la mesure de la température. Les dispositifs thermoélectriques, appelés également «modules», sont constitués d'un assemblage de semi-conducteurs de type p et n connectés entre eux électriquement en série et thermiquement en parallèle, cet assemblage étant disposé généralement entre deux plaques céramiques.

De par leur mode d'utilisation, les modules sont extrêmement fiables car ils ne possèdent aucune pièce mobile. Ces dispositifs sont totalement silencieux car leur fonctionnement n'entraîne aucune vibration.

Jusqu'à récemment, ces dispositifs ont été utilisés dans des secteurs de niche du fait de leur coût élevé (procédé d'élaboration, composants utilisés). De plus, la faible performance de ces systèmes limita leur emploi aux domaines où il n'y avait pas d'autre source d'énergie alternative (notamment dans le domaine du spatial).

De nos jours, il est devenu facile de se procurer des dispositifs thermoélectriques, en particulier comme systèmes de refroidissement (modules à effet Peltier). Par ailleurs, de nombreux projets portent sur le développement de nouveaux thermogénérateurs pour la production d'électricité à partir de chaleur perdue (notamment produite par les moteurs thermiques).

### **I.5.1. Modules à effet Peltier :**

Les performances actuelles des dispositifs thermoélectriques sont bien adaptées à leur utilisation en réfrigération (réfrigérateurs alimentaires (figure I.5), conteneurs utilisés pour le transport d'organes).

Les modules à effet Peltier disponibles dans le commerce sont très utilisés pour le refroidissement de composants et systèmes électroniques (microprocesseurs sur-cadencés (figure I.5), diode laser,...) afin de limiter l'échauffement des composants et ainsi augmenter leurs performances et durée de vie. Ces dispositifs thermoélectriques sont également utilisés pour le refroidissement de systèmes électroniques où la génération de vibrations doit être évitée (autodirecteur de missiles air-air infrarouges) [33].

Les industriels travaillent actuellement à l'utilisation de l'effet Peltier pour créer des systèmes de climatisations. Dans le secteur automobile, cette technologie particulièrement fiable conduirait à la réalisation de systèmes climatiseurs réversibles plus performants que ceux actuellement utilisés.

De plus, ces systèmes thermoélectriques sont plus compacts et plus simples à fabriquer que les systèmes actuels. Enfin, ceux-ci n'utilisent aucun gaz réfrigérant (impact sur l'effet de serre) [34]. Dans ce domaine, la société Amerigon commercialise depuis 1999 un modèle de siège automobile chauffant ou refroidissant basé sur l'utilisation de dispositifs thermoélectriques.

D'autres groupes de recherche travaillent également à l'intégration de micro-dispositifs à effet Peltier à des fibres textiles, voire à la fabrication de textiles thermoélectriques, afin de réaliser des vêtements intelligents, capables de réchauffer (ou refroidir) la peau [35]. Ces recherches intéressent beaucoup les militaires afin d'équiper de systèmes de climatisation portables de faible masse les soldats intervenant dans des milieux désertiques ou polaires. Ces vêtements intelligents pourraient être également utilisés par des personnes travaillant dans des zones de fortes températures (pompiers mais également ouvriers sidérurgistes, artisans verriers, .....).

Enfin, les modules offrant un contrôle très précis de la température (thermo-stabilisation), ils sont donc utilisés dans certains appareils de mesure où la température doit être parfaitement ajustée et stabilisée (polarimètre par exemple) [36].



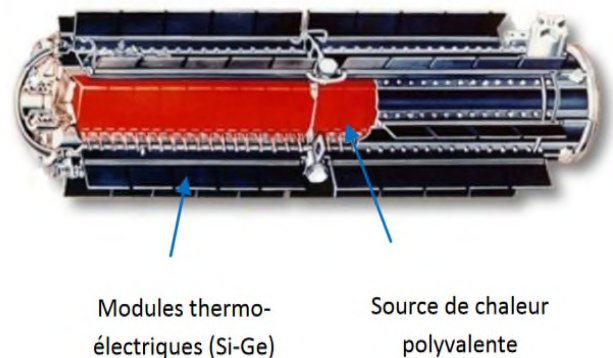
**Figure I.5:** Microprocesseur et glacière de camping équipés de modules à effet Peltier

### I.5.2 Thermo générateurs :

Les thermo générateurs les plus connus sont les Radio-isotopes Thermoélectrique Générateurs (RTG) [37]. Ces dispositifs utilisent le rayonnement naturel de la décomposition d'un élément radioactif ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  ou  $^{210}\text{Po}$  par exemple) comme source de chaleur ( $1000^{\circ}\text{C}$ ). Ces systèmes ont été développés pour l'alimentation électrique d'équipements requérant une source d'énergie stable et fiable, sur plusieurs années et sans maintenance.

Ces générateurs sont utilisés par exemple, pour l'alimentation électrique de systèmes placés dans des environnements isolés ou inaccessibles (phares et balises de navigation [38], stations météo [39], ou encore, de manière surprenante, dans certains pacemakers [40]).

L'utilisation la plus connue des RTG concerne les sondes spatiales (figure 6) [41]. Dans ce cas précis, l'utilisation de ce type de générateurs est impérative car, lorsqu'une sonde est envoyée au-delà de Mars, les panneaux solaires ne reçoivent plus assez de rayonnement solaire pour l'alimentation des instruments de la sonde. Les thermogénérateurs RTG ont prouvé la grande fiabilité des dispositifs thermoélectriques. En effet, nous pouvons citer l'exemple de la sonde spatiale américaine Voyager qui a été lancée en 1967 et qui continue à transmettre des informations depuis les confins du système solaire, plus de 40 ans après son lancement.



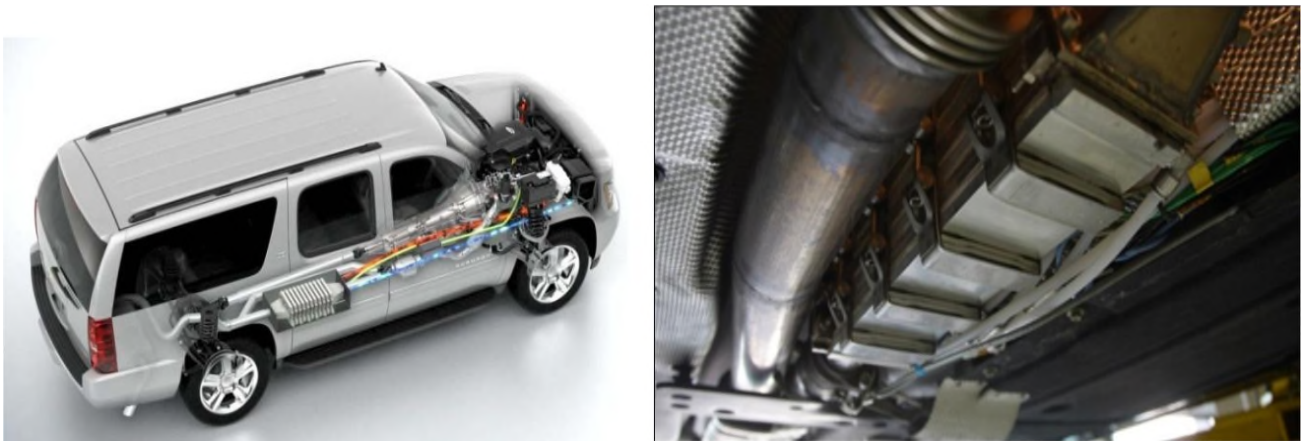
**Figure I.6:** Représentation et description d'un RTG



Actuellement, l'utilisation la plus prometteuse de thermogénérateurs concerne le recyclage de chaleur perdue en énergie électrique, notamment en utilisant les énormes quantités de chaleur produites par l'industrie et le secteur automobile. Concernant l'automobile, 70% de l'énergie produite par un moteur thermique lors de la combustion du carburant est perdue sous forme de chaleur [42] [43].

L'utilisation de thermogénérateurs placés sur la ligne d'échappement permettrait la transformation de cette chaleur en énergie électrique et pourrait alimenter les différents dispositifs électroniques de la voiture (figure I.7). L'énergie produite par ces thermogénérateurs permettrait de réduire l'utilisation d'un alternateur, entraînant ainsi une diminution de la consommation en carburant.

Des prototypes équipés de ces dispositifs (BMW, GM) roulent actuellement et les tests ont montré qu'à 125 Km/h le dispositif génère suffisamment d'électricité pour se passer d'un alternateur, entraînant ainsi une économie de carburant d'environ 5%. Les thermogénérateurs permettront donc de diminuer la consommation en carburant et donc de réduire les émissions de gaz à effet de serre.



**Figure I.7:** Représentations de générateurs thermoélectriques équipant des prototypes de véhicule

En utilisant la différence de chaleur entre le corps humain et l'air ambiant il devient possible de réaliser des appareils autoalimentés en énergie. L'exemple le plus connu est la montre Thermique de Seiko (figure I.8) [44]. Le gradient de température entre le poignet et l'air ambiant est de 1 K. Des modules implantés dans la montre délivrent au maximum  $22\mu\text{W}$  sous 300mV et un amplificateur de tension est donc utilisé pour augmenter la tension à 1,5 V. De cette manière, il devient possible d'alimenter la batterie de la montre.

L'utilisation de thermogénérateurs est également expérimentée pour l'alimentation électrique d'appareils médicaux qui sont utilisés pour le suivi de certains patients (figure I.8). Cela évite ainsi aux patients les fréquents passages nécessaires dans les centres médicaux liés au changement de la batterie équipant l'appareil d'analyse. L'autonomie fortement accrue de ces appareils médicaux permet ainsi un suivi à distance du patient et une amélioration de son confort de vie [45].



**Figure.I.8:** Montre et appareil médical (oxymètre à pouls) alimentés par des dispositifs thermoélectriques

Différents travaux portent également sur la réalisation de textiles thermoélectriques. Pour les militaires, la possibilité d'équiper les soldats du futur de «vêtements thermoélectriques» permettrait d'alimenter l'ensemble de l'équipement tactique de combat porté par les soldats (GPS, système de transmission d'informations, ...). En utilisant ces textiles, un gain de poids (jusqu'à 30%) est espéré car l'utilisation de ces thermogénérateurs permettrait de se passer des batteries habituellement utilisées pour l'équipement tactique. Dans le domaine civil, l'utilisation de ces textiles permettrait la création de «vêtements intelligents» permettant le rechargement d'un téléphone portable par exemple.

## I.6. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, les différents phénomènes de conversion thermique électrique (effet Seebeck) et électrique thermique (effet Peltier) de l'énergie ont été décrits.

Après les recherches de A.F. IOFFE en 1956 sur les semi-conducteurs thermoélectriques. Le domaine de la thermoélectricité a passé une dure période où aucun progrès a été signalé, jusqu'à les années 90 où un intérêt international inexplicable donne à la thermoélectricité sa renaissance par la découverte de nouveaux matériaux thermoélectriques augmentant le facteur de mérite à des valeurs dépassant 1.

Un certain nombre d'exemples d'application dans le domaine de la récupération d'énergie ou génération d'électricité à partir d'une source de chaleur ont été examinés, et l'utilisation de la thermoélectricité comme pompe à chaleur dans certaines applications.

On conclut de ce chapitre qu'on est seulement au point de départ dans ce domaine et la thermoélectricité va jouer un rôle majeur dans la conversion de l'énergie et même éliminer certaines procédures classiques comme par exemple la pompe à chaleur utilisant du gaz frigorigène.

## Bibliographie

- [1] - Le Dictionnaire des Inventeurs et des Inventions-Larousse édition-2000.
- [2] - Thomas Seebeck, Magnetische polarisation der metalle und erze durch tremperaturdifferenz, , 1895disponible en version numérisée sur [[http://libcoll.mpiwg.berlin.mpg.de/libview?url=/mpiwg/online/permanent/einstein\\_exhibition/sources/7X568YX0/index.meta&pn=1&mode=txttool](http://libcoll.mpiwg.berlin.mpg.de/libview?url=/mpiwg/online/permanent/einstein_exhibition/sources/7X568YX0/index.meta&pn=1&mode=txttool)]
- [3] - William Thomson, la théorie dynamique de la chaleur. Sér. I, 17, (1852), page 209-252  
Disponible on version numérisée [<http://visualiseur.bnf.fr/ConsulterElementNum?O=NUMM16396&Deb=217&Fin=260&E=PDF>]
- [4] - A.I. Ioffe, Energeticheskie osnovi termoelektricheskikh battery poluprovodnikov, Academy of Science of the USSR Moscow (1949).
- [5] - A. F. Ioffe, Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling, Info search London (1957)
- [6] - L.D. Hicks and M.S. Dresselhaus, 'Effect of quantum-wellstructures on the thermoelectric figure of merit', Physical Review B, 1993, 47, 12727-12731.
- [7] - L.D. Hicks and M.S. Dresselhaus, 'Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor', Physical Review B, 1993, 47, 16631-16634.
- [8] - R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts and B. O'Quinn, 'Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit', Nature, 2001, 413, 597-602
- [9] - T.C. Harman, P.J. Taylor, M.P. Walsh and B.E. LaForge, 'Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices', Science, 2002, 297, 2229-2232
- [10] - K.F. Hsu, S. Loo, F. Guo, W. Chen, J.S. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E.K. Polychroniadis and M.G. Kanatzidis, 'Cubic AgPbmSbTe<sub>2+m</sub>: bulk thermoelectric materials with high figure of merit', Science, 2004, 303, 818-821
- [11] - A.I. Boukai, Y. Bunimovich, J. Tahir-Kheli, J.-K. Yu, W.A. Goddard III and J.R. Heath, 'Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials', Nature, 2008, 451, 168-171.
- [12] J.S Heron, T. Fournier, N. Mingo and O. Bourgeois, 'Mesoscopic size effects on the thermal conductance of silicon nanowires', Nano Letters, 2009, 6, 1861-1865.
- [13] - H. Kim, I. Kim, H.-J. Choi and W. Kim, 'Thermal conductivities of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> nanowires with different germanium concentrations and diameters', Applied Physics Letters, 2010, 96, 233106.
- [14] R.D.ABELSON, "Space missions and applications", in Thermoelectrics Handbook: macro to nano, CRC/Taylor & Francis, D. M. Rowe, p. 56.1-56.29, (2006).
- [15] C.GODART, "Matériaux à effets thermoélectriques", Techniques de l'ingénieur, Référence N1500, (2009).
- [16] -W. M. Yim and A. Amith, Bi-Sb alloys for magneto-thermoelectric and thermomagnetic cooling, Solid-State Electron., Vol. 15, No. 10 (1972), pp. 1141.

- [17] - O. Yamashita and S. Tomiyoshi, Effect of annealing on thermoelectric properties of bismuth telluride compounds, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 42 (2003), pp. 492.
- [18] - H. Goldsmid, *Thermoelectric refrigeration*, 1964
- [19] - Z. H. Dughaish, Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation, *Physica B*, Vol. 322 (2002), pp. 205.
- [20] - J. W. Sharp, Some properties of Ge-Te based thermoelectric materials, *Proc 22nd International Conference on Thermoelectrics*, La Grande Motte, France, 2003, pp. 267.
- [21] - fiche Internationale de sécurité pour le tellure: <http://www.cdc.gov/niosh/ipcsnfrn/nfrn0986.html>
- [22] - 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.
- [23] - O. Yamashita and N. Sadatomi, Thermoelectric properties of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x < 0.10$ ) with alloy and dopant segregations, *Journal of Applied Physics*, Vol. 88, No. 1 (2000), pp. 245.
- [24] - 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
- [25] - B.C. Sales, D. Mandrus, R.K. Williams, Filled skutterudite antimonides: A new class of thermoelectric materials, *Science*, 272 (1996) 1325
- [26] - G.S. Nolas, J. Poon, M. Kanatzidis, Recent developments in bulk thermoelectric materials, *MRS Bulletin*, 31 (2006)
- [27] J.S. Kaspar, P. Hagemuller, M. Pouchard and al., Intermetallic clathrates, *Science*, 150 (1965) 1713
- [28] - Y. Mudryk, P. Rogl, C. Paul and al., Thermoelectricity of clathrate I type Si- and Ge-phases, *Journal of Physics - Condensed Matter*, 14 (2002) 7991
- [29] - A. Saramat, G. Svensson, A.E.C. Palmqvist, C. Stiewe, E. Mueller, D. Platzek, S.G.K. Williams, D.M. Rowe, J.D. Bryan, G.D. Stucky, Large thermoelectric figure of merit at high temperature in Czochralski-grown clathrate  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ , *Journal of Applied Physics*, 99 (2006) 023708
- [30] - J. V. Zaikina, K. A. Kovnir, F. Haarmann, W. Schnelle, U. Burkhardt, H. Borrmann, U. Schwarz, Yu. Grin, A. V. Shevelkov, The first silicon-based cationic clathrate III with high thermal stability:  $\text{Si}_{172-x}\text{PxTey}$  ( $x=2y$ ,  $y > 20$ ), *Chemistry a European Journal*, 14 (2008) 5414
- [31] - S.R. Brown, S.M. Kauzlarich, F. Gascoin, G.J. Snyder,  $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$ : New high efficiency thermoelectric material for power generation, *Chemistry of Materials*, 18[7](2006)1873
- [32] - D. M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, Boca Raton, FL, (1995)
- [33] - H. J. Goldsmid, *Electronic Refrigeration*, Pion Limited, London, 1986
- [34] - J.H. Yang, FR Stabler, Automotive Applications of Thermoelectric Materials, *Journal of Electronic Materials*, 38 [7] (2009) 1245
- [35] - S. Chatterjee, thermoelectrically heated/cooled wheeled stretcher, *Proceedings: 6th European Conference on Thermoelectrics, ECT2008, Paris, France*

- [36] - L.B. Ershova, G.G. Gromov, Optimal thermoelectric cooling in laser diode sub-assemblies, Proceedings: 6th European Conference on Thermoelectrics, ECT2008, Paris, France, p. O-18, 4-6 jul. 2008
- [37] - R.C. O'Brien, R.M. Ambrosi, N.P. Bannister, S.D. Howe, H.V. Atkinson, Safe radioisotopes thermoelectric generators and heat sources for space applications, Journal of Nuclear Materials, 377[3](2008) 506
- [38] - E. Levnor, I. Linkov, J.M. Proth, Strategic Management of Marine Ecosystems, Springer, (2005) 21, ISBN 1-4020-3158-0
- [39] - Office of Polar Programs Environment Section, Environmental Action Memorandum, Installation, Maintenance and Removal of Automatic Weather Stations in Antarctica, OPP opp93102 (202/357-7766), 1993
- [40] - C. Chauvel, T. Lavergne, A. Cohen, P. Ducimetière, J.Y. Leheuzey, J. Valty, L. Guize, Radioisotopic Pacemaker -Long-Term Clinical-Results, Pacing and Clinical Electrophysiology, 18[2] (1995) 286
- [41] - R.C. O'Brien, R.M. Ambrosi, N.P. Bannister, S.D. Howe, H.V. Atkinson, Safe radioisotopes thermoelectric generators and heat sources for space applications, Journal of Nuclear Materials, 377[3](2008) 506
- [42] - J.H. Yang, FR Stabler, Automotive Applications of Thermoelectric Materials, Journal of Electronic Materials, 38 [7](2009) 1245
- [43] - N. Espinosa, M. Lazard, L. Aixala, H. Scherrer, Modeling a Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery, Journal of Electronic Materials, 39[9](2010)
- [44] - M. Kishi, H. Nemoto, T. Hamao, M. Yamamoto, S. Sudou, M. Mandai and al., Micro-thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source,
- [45] V. Leonov, T. Torfs, R.J.M. Vullers, C. Van Hoof, Hybrid Thermoelectric-Photovoltaic Generators in Wireless Electroencephalography Diadem and Electrocardiography Shirt, Journal of Electronic Materials, 39[9](2010) 16748th International conference on thermoelectric, (1999) 301

# *Chapitre II*

---

*FORMULATION MATHEMATIQUE DE LA  
THERMOELECTRICITE*

---

## Chapitre II :

### FORMULATION MATHEMATIQUE DE LA THERMOELECTRICITE

#### II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous exposons les lois mathématiques permettant de décrire les performances d'un dispositif thermoélectrique lors de son fonctionnement, en réfrigération ou en production d'énergie électrique, puis les lois décrivant les propriétés de transport électrique et thermique au sein des matériaux. Ce paragraphe abordera notamment l'expression de la figure de mérite sans dimensions  $ZT$  qui est utilisée dans la caractérisation et la comparaison des performances thermoélectriques des matériaux.

Les effets thermoélectriques les plus connus sont l'effet Seebeck qui permet de transformer un gradient de température  $dT$  en gradient de potentiel électrique  $dV$ , et l'effet inverse, l'effet Peltier, qui transforme  $dV$  en  $dT$ . Ces deux effets permettent des applications dans le domaine de la récupération d'énergie ou pour le refroidissement. Ces effets thermoélectriques sont également d'excellentes sondes des propriétés électroniques des matériaux, très sensibles à la structure de bande, au dopage, ou aux transitions magnétiques.

#### II.2. Définition de la Thermoélectricité :

L'effet thermoélectrique est un phénomène physique caractéristique de certains matériaux contribuant à la conversion de l'énergie. Un matériau thermoélectrique permet de transformer directement de la chaleur en électricité (génération d'électricité) ou de déplacer des calories par l'application d'un courant électrique (application de réfrigération).

#### II.3. Propriétés physiques et chimiques :

Les matériaux thermoélectriques sont caractérisés par ces paramètres essentiels, suivants :

##### II.3.1. La conductivité électrique :

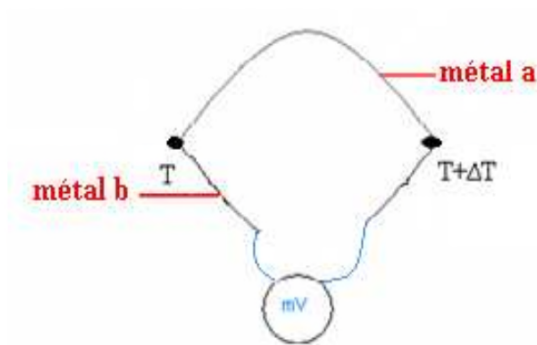
Notée  $\sigma$  il est l'inverse de la résistivité électrique ( $\rho$ ). Elle correspond à la conductance d'une portion de matériau de 1 m de longueur et de 1 m<sup>2</sup> de section. Parmi les meilleurs conducteurs, il y a les métaux (comme le cuivre ou l'aluminium) pour lesquels les porteurs de charge sont les « électrons libres ». Certains matériaux, comme les semi-conducteurs, ont une conductivité qui dépend d'autres conditions physiques, comme la température ou l'exposition à la lumière.

##### II.3.2. La conductivité thermique :

C'est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée  $\lambda$ , elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre [1].

### II.3.3. Le coefficient Seebeck :

Schéma de principe



**Figure II.1:** Principe de l'effet Seebeck.

Une différence de température  $dT$  entre les jonctions de deux matériaux A et B implique une différence de potentiel électrique  $dV$  selon l'équation suivante :

$$S_{AB} = \frac{dV}{dT} \quad (\text{eq.II.1})$$

- $dT$  : la différence de la température (K).
- $dV$  : la différence de tension (V).

Le coefficient Seebeck, également appelé « Pouvoir Thermoélectrique » s'exprime en  $V.K^{-1}$  (ou plus généralement en  $\mu V.K^{-1}$  au vu des valeurs de ce coefficient dans les matériaux usuels).

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

$$S_{AB} = S_A - S_B \quad (\text{eq.II.2})$$

- $S_A$  : coefficient Seebeck du matériau (A), (V/K).
- $S_B$  : coefficient Seebeck du matériau (B), (V/K)

### Explication du phénomène

Lorsqu'un métal est soumis à un gradient de température  $\Delta T$ , l'énergie moyenne des électrons étant plus élevée du côté chaud que du côté froid, il en résulte un gradient énergétique. Celui-ci va donner naissance à une force qui va entraîner la diffusion des électrons du côté chaud vers le côté froid. Cette diffusion entraîne la polarisation du matériau (accumulation des porteurs majoritaires négatifs du côté froid et les porteurs majoritaires positifs du côté chaud) qui induit un champ électrique  $E$  dont l'effet est d'aider les électrons froids à diffuser vers le côté chaud [2,3].



### II.3.4. Le coefficient de Peltier d'un matériau :

Schéma de principe

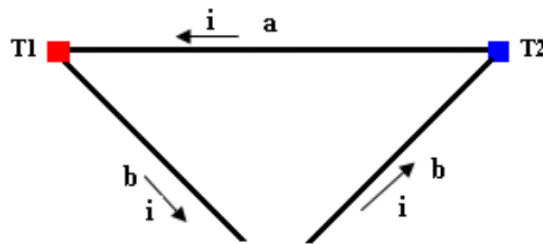


Figure II.2 : principe de l'effet Peltier

Dans le cas de l'effet Peltier, un courant électrique  $I$  est imposé à un circuit composé de deux matériaux, ce qui entraîne une libération de chaleur  $Q$  à une jonction et une absorption de chaleur à l'autre jonction, selon l'équation suivante :

$$\Pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad (\text{eq.II.3})$$

- $Q$  : la chaleur libérée ou absorbée (W).
- $I$  : le courant électrique (A) [4].

#### Explication du phénomène

Lorsque les porteurs de charge passent d'un niveau de basse énergie à un niveau d'énergie plus élevé  $e$  (par exemple lors du passage d'un matériau de type p à un matériau de type n), ils reçoivent de l'énergie de la part du système avec lequel ils interagissent. Or ce système ne peut être que le réseau cristallin sur lequel ils effectuent des collisions. Ainsi, le réseau cristallin cède de l'énergie aux porteurs de charge et par conséquent l'effet Peltier se traduit par un refroidissement de la jonction. Si au contraire, les porteurs de charge passent d'un niveau de haute énergie à un niveau de basse énergie quand ils traversent une jonction, l'énergie perdue est cédée au réseau et l'effet Peltier se traduit par un échauffement de la jonction. C'est donc la différence de nature entre les matériaux  $a$  et  $b$  et le sens du courant qui les traverse qui sont les causes d'un gradient de température dans l'échantillon (Voir Figure II-2) [5].

Selon l'équation suivant [6]

$$dQ_s = (\Pi_A - \Pi_B) \vec{j} \cdot \vec{u}_{AB} \quad (\text{eq.II.4})$$

- $dQ_s$  : représente la quantité de chaleur émise (comptée en positif) ou absorbée (comptée en négatif) par unité de surface à l'une des deux jonctions (en  $W.m^{-2}$ ).

- $\Pi_A$  et  $\Pi_B$  sont respectivement les coefficients de Peltier des matériaux A et B (en V).
- 
- $\vec{j}$ : Le flux de charge (ou la densité surfacique de courant) (en  $A.m^{-2}$ ).
- $\vec{u}_{ab}$ : le vecteur unitaire adimensionnel dirige du matériau A vers le matériau B au niveau de la jonction considérée.

Ainsi, le passage d'une densité de courant dans le circuit provoque le refroidissement de la jonction ou le courant circule du matériau dont le coefficient Peltier est le plus faible vers le matériau dont le coefficient Peltier est le plus fort (dans le cas de la Figure II- 3,  $\Pi_A > \Pi_B$ ), et provoque l'échauffement de l'autre jonction.

### II.3.5. Le coefficient de Thomson :

Contrairement aux coefficients Seebeck et Peltier, le coefficient Thomson peut être défini directement pour un seul matériau. Lorsque sont présents simultanément un gradient de température et un courant électrique, il y a génération ou absorption de chaleur dans chaque segment de matériau pris individuellement.

Le gradient de flux thermique au sein du matériau est alors sous la forme suivante :

$$dQ_v = -\beta \times \frac{\partial T}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{j} \quad (\text{eq.II.5})$$

Avec :

- $dQ_v$  : représente la quantité de chaleur émise (comptée en positif) ou absorbée (Comptée en négatif) par unité de volume du matériau (en  $W.m^{-3}$ ).
- $\beta$  : le coefficient de Thomson (en  $V.K^{-1}$ ).
- $T$  : la température du matériau (en K).
- $r$  : le point.
- le vecteur  $\vec{j}$  : le flux de charge (en  $A.m^{-2}$ ) [7].

### II.3.6. Les relations de Kelvin :

Le physicien Lord Kelvin est également à l'origine des deux lois qui relient les trois coefficients thermoélectriques entre eux : les relations de Kelvin. Ces trois coefficients sont effectivement interdépendants. La première relation fait un lien entre le coefficient Seebeck et le coefficient Peltier d'une jonction de deux matériaux conducteurs (A et B). Pour une jonction standard A/B,

la première relation de Kelvin est :

$$S_{AB} = \frac{\Pi_{AB}}{T} \quad (\text{eq.II.6})$$

- $S_{AB}$  : le coefficient Seebeck (V/K).
- $T$  : la température absolue de la jonction p/n (K).
- $\Pi_{AB}$  : le coefficient de Peltier d'un matériau (V).

La seconde relation de Kelvin fait le lien entre les coefficients Seebeck et Thomson :

$$\frac{\partial S_{AB}}{\partial T} = \frac{\beta_A - \beta_B}{T} \quad (\text{eq.II.7})$$

Avec :

- $S_{AB}$  : le coefficient Seebeck (V/K).
- $T$  : la température absolue de la jonction p/n (K).
- $\beta_A$  et  $\beta_B$  : sont les coefficients Thomson respectifs des matériaux A et B formant la jonction (V/K) [8].

Le couplage entre les phénomènes électriques et thermiques ouvre la voie à deux applications possibles, à savoir la réfrigération et la génération électrique. La réfrigération est rendue possible par le flux de chaleur qui s'établit suite à l'imposition de courant électrique aux bornes d'un matériau. Ce flux permet d'évacuer la chaleur d'un Corps à réfrigérer vers une zone où la chaleur est dissipée vers le milieu ambiant.

La génération de courant peut se produire quand une chaleur extérieure impose une différence de température aux extrémités du matériau. Une tension électrique s'établit et elle peut être exploitée pour générer un courant dans une résistance de charge.

#### II.4. Bilan thermique du module thermoélectrique.

Les transferts thermiques au sein d'un module thermoélectrique peuvent être modélisés en quantifiant trois contributions :

La première correspond à la chaleur transférée par effet Peltier. Sur la face froide, la chaleur prélevée

$$\text{Est } Q_f = S_m \times T_f \times I. \quad (\text{eq.II.8})$$

Sur la face chaude, la chaleur injectée

$$\text{Est } Q_c = S_m \times T_c \times I. \quad (\text{eq.II.9})$$

- $I$  est le courant traversant le module Peltier

- $Q_f$  est la chaleur absorbée par le côté froid du Peltier
- $Q_c$  est la chaleur rejetée par le Peltier
- $S_m$  est le coefficient d'effet Seebeck du module
- $T_f$  est la température du côté froid
- $T_c$  est la température du côté chaud

Il faut ensuite considérer la chaleur due à l'effet Joule qui va s'appliquer sur les 2 faces du module et qui va augmenter avec l'alimentation de celui-ci. La chaleur prélevée côté froid est donc à diminuer

$$\text{De } \frac{1}{2} \times R_m \times I^2 \quad (\text{eq.II.10})$$

- $R_m$  est la résistance électrique du module

La chaleur injectée côté chaud doit être augmentée de la même valeur.

Enfin, il faut également tenir compte de la conduction thermique qui s'oppose à l'effet voulu il faut donc diminuer la chaleur prélevée en face froide

$$\text{De, } K_m \times \Delta T \quad (\text{eq.II.11})$$

- $K_m$  est la conductance thermique du module
- $\Delta T = T_c - T_f$

et diminuer d'autant la chaleur rejetée en face chaude.

Finalement on a une chaleur prélevée côté froid qui vaut

$$Q_f = S_m \times T_f \times I - \frac{1}{2} \times R_m \times I^2 - K_m \times \Delta T \quad (\text{eq.II.12})$$

Cette expression est difficilement exploitable, d'autant plus que les coefficients, , varient en fonction de la température. Pour pouvoir utiliser correctement les modules Peltier, les fabricants fournissent des courbes donnant la différence de température en fonction du courant appliquée et de la chaleur transférée.

La tension aux bornes du module est

$$V = S_m \times \Delta T + I \times R_m \quad (\text{eq.II.13})$$

On tient compte de l'effet Joule et de l'effet Seebeck.

La chaleur rejetée par le module est

$$Q_c = S_m \times T_c \times I + \frac{1}{2} \times R_m \times I^2 - K_m \times \Delta T \quad (\text{eq.II.14})$$

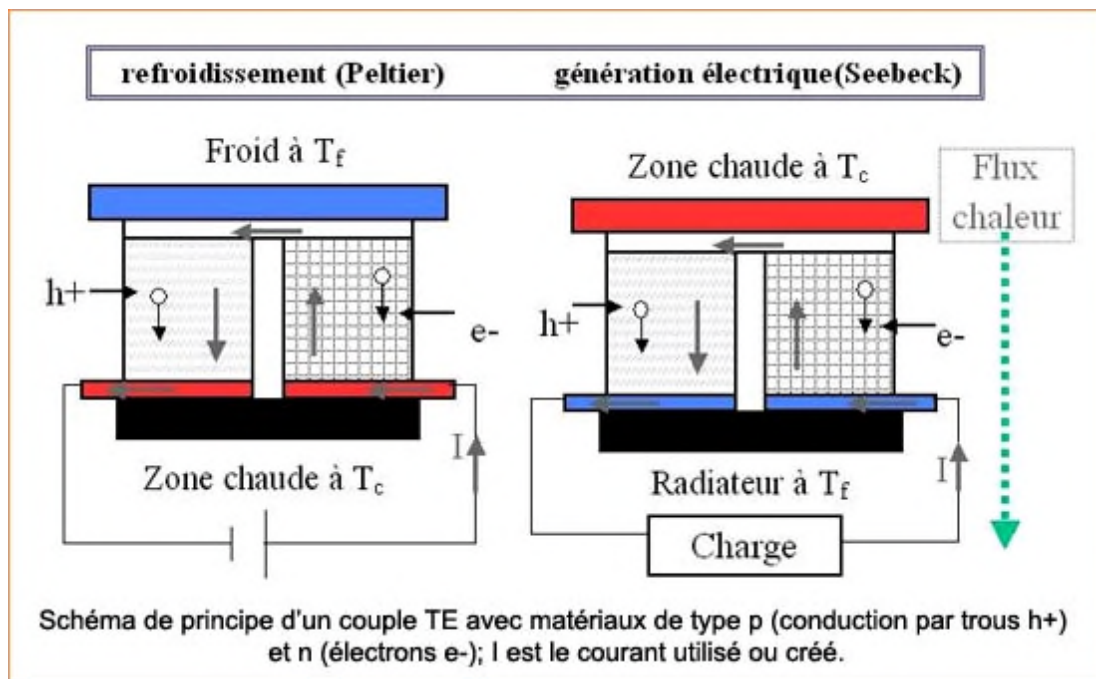
$$\text{Soit } Q_c = Q_f + V \times I \quad (\text{eq.II.15})$$

En voie que la Chaleur absorbée et chaleur produite par le module lui-même et non homogène [9].

## II.5. Rendement et Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques

Les dispositifs thermoélectriques peuvent être utilisés comme système réfrigérant ou comme générateur électrique (figure II-3). Ces dispositifs sont constitués de matériaux semi-conducteurs p et n reliés entre eux par des connexions métalliques.

Lorsqu'un générateur de courant électrique alimente le dispositif thermoélectrique constitué d'un seul thermocouple, il y aura, sous l'effet du passage de courant, soit absorption soit dégagement de chaleur au niveau des jonctions métal/semi-conducteur. Si on met un objet en contact avec la jonction froide, il sera alors possible de le refroidir. Le dispositif fonctionne alors comme un réfrigérateur.



**Figure II.3:** thermocouples fonctionnant en réfrigération (a) ou en génération d'électricité(b)

L'efficacité des systèmes réfrigérants est caractérisée par le Coefficient de Performance (COP), traduit par la relation:

$$COP = \frac{Q_f}{P} \quad (\text{eq.II.15})$$

- \$Q\_f\$ : la puissance calorifique absorbée par l'objet disposé du côté froid du thermocouple
- \$P\$ : la puissance fournie par le générateur.

Dans le cas où le système est disposé dans un gradient de température, celui-ci génère alors un courant du fait du déplacement des porteurs de charges dans les branches p et n. Le générateur thermoélectrique peut alors être caractérisé par son rendement énergétique \$\eta\$ (inférieur à l'unité):

$$\eta = \frac{P_u}{Q_c} \quad (\text{eq.II.16})$$

- \$P\_u\$ : la puissance électrique utile générée

- $Q_c$  : la puissance calorifique apportée par la partie chaude du gradient thermique.

Les coefficients COP et  $\eta$  peuvent cependant être maximisés en optimisant le courant électrique provenant de la source dans le premier cas, ou bien la géométrie des semi-conducteurs p et n (second cas). Les coefficients COP et  $\eta$  maximisés peuvent alors s'écrire:

$$(COP)_{max} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \frac{\sqrt{1 + Z_{pn}T_m} - \frac{T_c}{T_f}}{\sqrt{1 + Z_{pn}T_m} + 1} \quad (\text{eq.II.17})$$

$$\eta_{max} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \frac{\sqrt{1 + Z_{pn}T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z_{pn}T_m} + \frac{T_f}{T_c}} \quad (\text{eq.II.18})$$

- $T_m$  : la température moyenne de fonctionnement,
- $T_c$  et  $T_f$  : indiquent respectivement les températures des parties chaude et froide du gradient thermique.

Le coefficient  $Z_{pn}$  est appelé le Facteur de Mérite du thermocouple (exprimé en K-1) et est décrit par la relation:

$$Z_{pn} = \frac{(S_p - S_n)^2}{(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2} \quad (\text{eq.II.19})$$

- $\rho$  : représente la résistivité électrique du matériau (p ou n)
- $\lambda$  : sa conductivité thermique.

Les performances des dispositifs thermoélectriques ne peuvent dépasser celles correspondants à une machine idéale (machine de Carnot) car ceux-ci sont assimilés à des machines thermiques diathermes et obéissent donc aux lois de la thermodynamique. L'expression des coefficients  $(COP)_{max}$  et  $\eta_{max}$  montre que le rendement de conversion des dispositifs thermoélectriques est donc lié à la différence de température aux bornes du dispositif et à la valeur du facteur  $Z_{pn}$ . Dans les deux cas (réfrigérateur ou générateur), plus la valeur du coefficient  $Z_{pn}$  sera élevée, plus le rendement de conversion sera important.

Lorsque l'on s'intéresse aux propriétés thermoélectriques d'un matériau donné, il faut alors prendre uniquement en compte le Facteur de Mérite thermoélectrique pour ce seul matériau:

$$Z = \frac{S^2}{\rho \lambda} = \frac{S^2 \sigma}{\lambda} = \frac{PF}{\lambda} \quad (\text{eq.II.20})$$

Le paramètre définit  $PF=S^2\sigma$  le Facteur de Puissance qui indique la puissance utile libérée par le matériau lorsque celui-ci génère du courant. Le facteur  $Z$  étant dépendant de la température, on le représente le plus souvent sous la forme  $ZT$ , le Facteur de Mérite adimensionnel. Donnée par la relation

$$ZT = TS^2 \frac{\sigma}{\lambda} \quad (\text{eq.II. 21})$$

- T : la température absolue (K).
- S : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient de Seebeck (V.K-1).
- $\sigma$  : la conductivité électrique ( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ).
- $\lambda$  : la conductivité thermique (W/m. K)[10].

Ainsi il est possible de caractériser les propriétés thermoélectriques du matériau à une température donnée.

D'un point de vue qualitatif, un bon matériau thermoélectrique doit posséder :

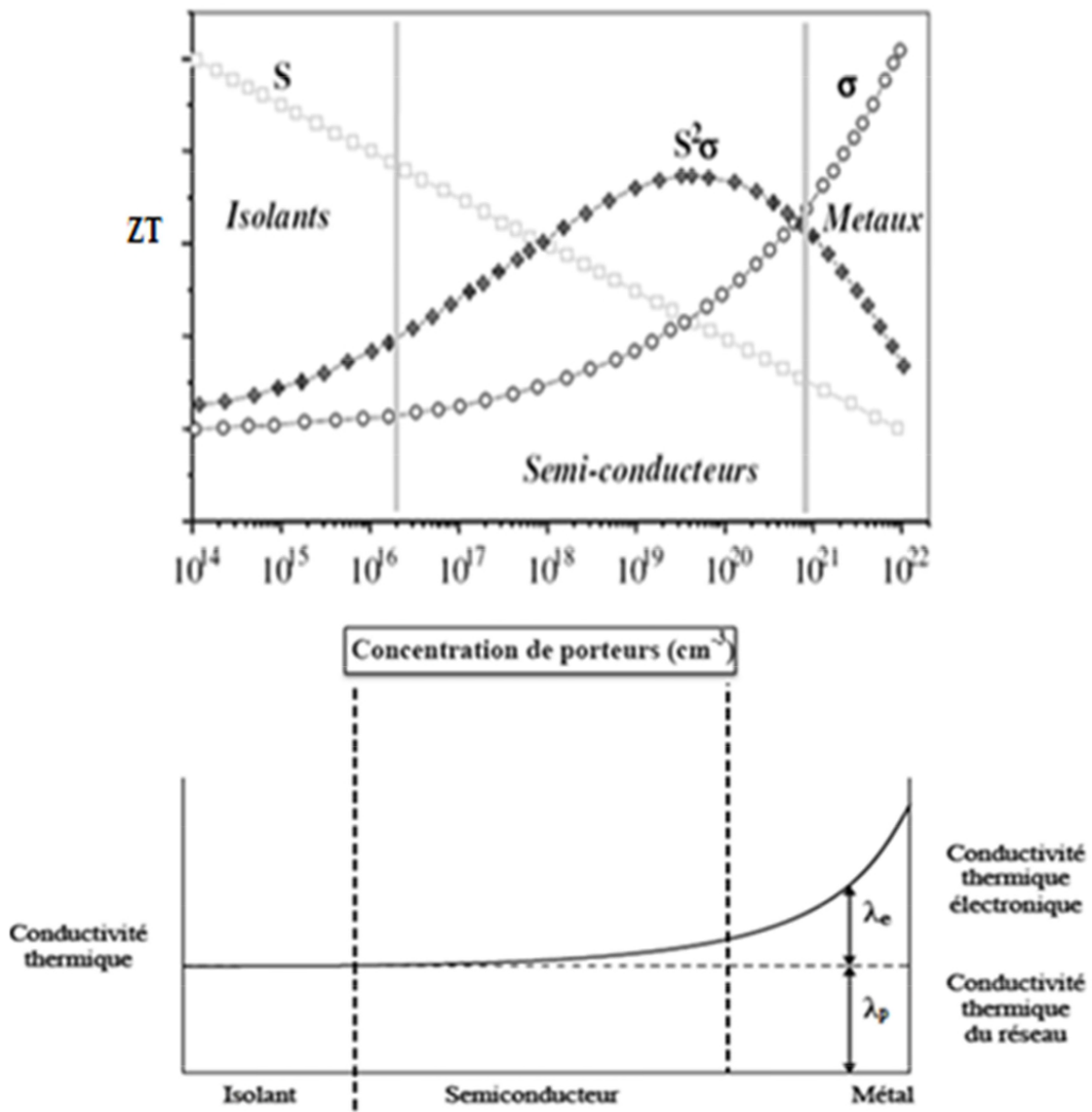
- Un bon coefficient Seebeck S pour générer les effets attendus
- Une bonne conductivité électrique  $\sigma$  pour minimiser les pertes de chaleur par effet joule donc pour augmenter le courant qui traverse la charge
- Une faible conductivité thermique  $\lambda$  pour maintenir un gradient de température appréciable aux bornes du matériau [11].

Les trois coefficients S,  $\lambda$  et  $\sigma$  interviennent dans la définition du facteur de mérite ZT, ils ne sont pas indépendants les uns des autres.

La recherche des matériaux de grand facteur de mérite consiste donc à trouver des composés qui répondent simultanément aux trois exigences [12].

Toutefois, cette mission n'est pas simple puisque les propriétés déterminant le facteur de mérite sont mutuellement liées, et ce de manière défavorable [13].

En effet, pour augmenter la conductivité électrique il faut augmenter la concentration des porteurs de charge, mais en général ceci a pour conséquence la diminution du coefficient Seebeck et l'augmentation de la conductivité thermique. Par conséquent, le facteur de mérite décroît ou n'augmente pas. Cette influence des porteurs de charge sur les propriétés thermoélectriques est représentée sur la Figure II- 4 représente les variations de ses trois paramètres en fonction du logarithme de la concentration en porteurs de charge, pour trois groupes des matériaux, isolants, semi-conducteurs et métaux [14].



**Figure II.4:** Conductivité électrique, coefficient Seebeck S, conductivité thermique  $\lambda$  et le facteur de puissance  $S^2$  en fonction de la concentration des porteurs de charge.

D’après la Figure II.5, il en résulte que ni les métaux, ni les isolants n’ont des facteurs de mérite appropriés car, pour les premiers, malgré leur excellente conductivité électrique  $\sigma$ , le coefficient Seebeck S est très faible et la conductivité thermique  $\lambda$  est très élevée [15].

Les isolants, au contraire, ont des faibles conductivités thermiques et des grands coefficients Seebeck, mais ceci ne suffit pas pour compenser leurs trop faibles conductivités électriques. Il apparaît donc clairement que seuls les semi-conducteurs peuvent atteindre des bons facteurs de mérite Z [16]. De plus, dans le cas des semi-conducteurs, il est possible de contrôler la concentration des porteurs de charge en ajustant la dose de dopage.

Les meilleurs facteurs de mérite sont obtenus pour des concentrations de porteurs de charge de  $10^{19}$  à  $10^{21} \text{cm}^{-3}$ , ce qui correspond aux semi-conducteurs fortement dopés [17]. La capacité d’un matériau d’être dopé pour atteindre ces valeurs de concentration de charge, aussi bien pour les porteurs du type p, que du type n, est donc considérée comme un critère important du point de vue de l’optimisation du facteur de mérite. Le Tableau II.1 indique les valeurs typiques des grandeurs thermoélectriques pour les trois catégories des matériaux : isolants, semi-conducteurs et métaux [18].



Grandeur			Matériaux		
Non	Symbole	Unité	Isolants	Semiconducteurs	Métaux
<i>coefficient Seebeck</i>	S	$\mu\text{V}/^\circ\text{K}$	1000	200	5
<i>conductivité électrique</i>	$\sigma$	$\Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$	$10^{-10}$	$10^5$	$10^8$
<i>conductivité thermique</i>	$\lambda$	$\text{W}/(\text{m}.\text{K})$	0.1 - 1	1 - 100	10 - 100

**Tableau II.1:** Valeurs des grandeurs thermoélectriques, à température ambiante pour : isolants, semi-conducteurs et métaux.

Ces grandeurs macroscopiques résultent des caractéristiques microscopiques du matériau. En effet, du point de vue microscopique, le coefficient Seebeck et la conductivité électrique sont corrélés au transport des porteurs de charge (électrons ou trous) dans le matériau, tandis que la conductivité thermique est liée au transport de la chaleur à la propagation des phonons, mais également au transport des porteurs de charge [19].

Ainsi, le facteur de mérite est lié à la structure des bandes, à la dynamique du réseau (diffusion des phonons), ainsi qu'aux mécanismes de diffusion des porteurs déchargés. La complexité d'optimisation du facteur de mérite réside dans l'interdépendance entre le transport des porteurs de charge et celui des phonons.

En effet, la conductivité thermique est composée de deux contributions: d'une part, celle des phonons et, d'autre part, celle des électrons [20] :

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_e \quad (\text{eq.II.22})$$

- $\lambda_p$  : représente la partie de la conductivité thermique liée à la propagation des phonons :  $\text{W}/(\text{m.K})$ .
- $\lambda_e$  : la partie résultant du transport des électrons :  $\text{W}/(\text{m.K})$ .

## II.6.Conclusion :

En conclusion,  $\sigma$ , S et  $\lambda$  et dépendent tous les trois de la concentration en porteur. Il est donc complexe d'optimiser le facteur de mérite réduit. Afin de procéder à une recherche systématique de bons matériaux thermoélectriques, les trois propriétés de transport doivent être exprimées par des propriétés plus fondamentales, telles que la concentration en porteurs, leur masse effective et le temps de relaxation des phonons.

Ainsi, H. J. Goldsmid [21] a montré en 1986 que les semi-conducteurs sont les matériaux thermoélectriques les plus adaptés, car ils ont une grande mobilité de porteur, une grande masse effective, et une faible conductivité thermique.

## Bibliographie

- [1] M. Beekman, G. S. Nolas Synthesis and thermal conductivity of type II silicon clathrates *Physica B*, Vol.383, pp.111, (2006).
- [2] J.G.Stockholm « La thermoélectricité applications et perspectives », matériaux 2006,13-17 novembre, Dijon, France, 2008.
- [3] A.LINDER « la Thermoélectricité » presse universitaire de France n°1381, 1970.
- [4] T. Kajikawa, « Thermoelectric Power Generation System Recovering Industrial Waste Heat », in *Thermoelectrics handbook: macro to Nano*, CRC/Taylor & Francis., D. M. Rowe, 2006, p. 50.1-50.28.
- [5] V.RICHOUX « Elaboration électrochimique en mode pulse de Tellure de Bismuth  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  et de l'alliage ternaire  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  ».Thèse de doctorat à l'université de PAUL VERLINE-METZ, France, 2008.
- [6] B. C. Sales, « Novel thermoelectric materials », *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 2, no. 3, p. 284-289, 1997.
- [7] A. F. Ioffe, *Semiconductor thermoelements, and thermoelectric cooling*. Info search, ltd., 1957.
- [8] M. Kishi et al., « Micro thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source », in *18th International Conference on Thermoelectrics*, 1999, p. 301-307.
- [9] Zheng YUAN Etude et réalisation de microgénérateurs thermoélectriques planaires en technologie silicium
- [10] S. Priya et D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies*. Springer, 2008.
- [11] G. S. Nolas, J. Sharp, et H. J. Goldsmid, *Thermoelectrics: basic principles and new materials developments*. Springer, 2001.
- [12] G. L. Bennett, « Space Nuclear Power: Opening the Final Frontier », 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 26-29 June 2006, San Diego, California, USA.
- [13] S. D. Mahanti et T. P. Hogan, *Chemistry, physics, and materials science of thermoelectric materials: beyond bismuth telluride*. Springer, 2003.
- [14] T. M. Tritt, *Thermal conductivity: theory, properties, and applications*. Springer, 2004.
- [15] J. Fairbanks, « Thermoelectric Applications in Vehicles-Status 2008 », presented at the 6th European Conference on Thermoelectric, Paris, France, 2008, p. 1-8.
- [16] M. Quiret, « Quand la chaleur se mue en électricité », *Echos*, no. 19818, p. 14, 2006
- [17] F. J. DiSalvo, « Thermoelectric Cooling and Power Generation », *Science*, vol. 285, no. 5428, p. 703 -706, 1999.
- [18] L. Bell, « Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with

Thermoelectric systems », Science, vol. 321, no. 5895, p. 1457-1461, 2008.

[19] T. M. Tritt, « Thermoelectric phenomena, materials, and applications », Annual Review of Materials Research, vol. 41, no. 1, p. 433-448, 2011.

[20] V. A. Semenyuk, « Thermoelectric cooling of electro-optic components », in Thermoelectric Handbook: macro to nano, CRC/Taylor & Francis, 2006, p. 58.1-58.21.

[21] H.J. GOLDSMID, "Electronic Refrigeration (European conference on thermophysical properties)", published by V. Penguin, (1986).

# *Chapitre III*

---

***ETUDE EXPERIMENTALE D'UN MODULE  
THERMOELECTRIQUE***

---

## Chapitre III :

### ETUDE EXPERIMENTALE D'UN MODULE THERMOELECTRIQUE

#### III.1. Introduction :

Dans les chapitres précédents nous avons pris connaissance sur le phénomène de la thermoélectricité théoriquement ainsi que quelques applications des modules thermoélectriques et les types des éléments thermoélectriques et leur évolution.

Basés sur ces théories et lois qui agissent sur la thermoélectricité on peut concevoir une ou plusieurs expériences qui permettent d'extraire ou de calculer les grandeurs physiques d'un module Peltier.

Le module thermoélectrique choisi est un module de dimension 40x40x4.2 mm type TEC 7212 de constructeur chinois voir Fiche technique annexe (1).

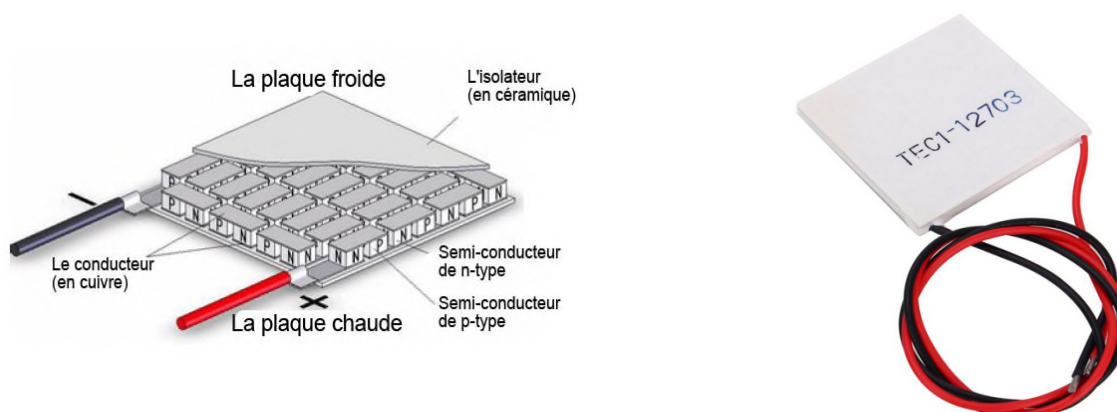
Les résultats obtenus vont nous donner le potentiel qui peut avoir ce module pour prévoir une application qui sera présentée au chapitre IV.

#### III.2. Expérience A (détermination des paramètres physiques du module) :

##### III.2.1. Introduction :

La fiche technique du module TE du constructeur chinois (voir figure III.2) représente des critères déterminés selon des paramètres idéaux avec des modules bien choisis, ainsi les graphes donnés sont difficilement exploitables, donc l'utilisation de ces données techniques peut nous conduire à de faux résultats.

Pour cela on va mettre le module à l'épreuve au sein du laboratoire de l'université pour réaliser une fiche technique personnelle qui comporte des graphes indiquant les performances du module.



**Figure III.1 :** Le module Peltier utilisé dans les expériences

### III.2.2. But de l'expérience :

Le but de cette expérience est de déterminer certains paramètres physiques caractérisant le module TE (tension de fonctionnement, coefficient de Seebeck, rendement .....etc.), ainsi les relations qui les relient et en fin évaluer la performance du TEC.

### III.2.3. Schéma du montage

L'expérience était réalisée au niveau du laboratoire de physique de l'université d'Adrar d'une durée de deux jours

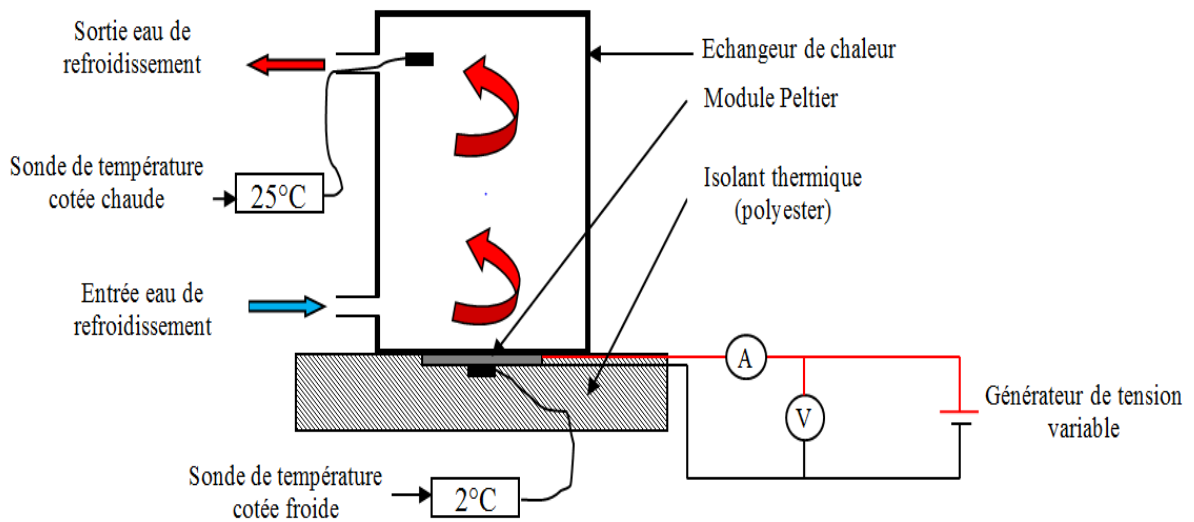


Figure III.2: Schéma banc d'essai expérience A

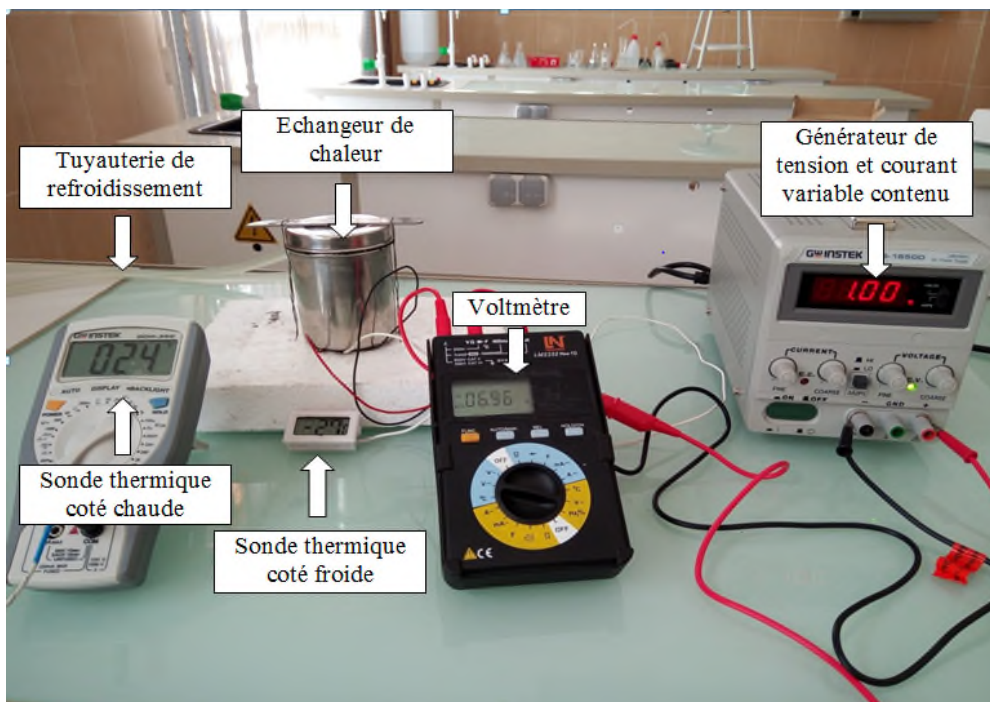


Figure III.3: Photo banc d'essai expérience A Laboratoire de l'université d'Adrar

### III.2.4. Protocole de l'expérience :

- A l'aide du générateur on alimente le module TE en courant contenu commençant de 1 V jusqu'à 19 V avec un pas de 1V.
- A chaque ajustement de la tension on met l'interrupteur reliant la source électrique au module TE en position ouvert.
- A chaque essai on note la valeur du courant I qui s'affiche sur le générateur en premier et la valeur du courant  $I_f$  après stabilité du système.
- Dans chaque fin d'essai est quand on met l'interrupteur en position ouvert on note la valeur de la tension  $U_s$  qui génère le module puisque ces deux surfaces sont en différences de température.
- La valeur de l'intensité I et de la tension  $U_s$  varie brusquement, un enregistrement vidéo est nécessaire pour l'acquisition précise des données.
- A chaque essai on mesure la température de la face froide  $T_f$  et la face chaude  $T_c$  (température de l'eau de refroidissement) et après stabilité de la température.
- Avant chaque teste on doit remettre les deux surface a la même température on laisse le circuit de refroidissement en marche et alimentation coupé.
- L'utilisation d'une pâte thermique entre les surfaces en contacte pour diminuer la résistance thermique est nécessaire.

### III.2.5. Résultats expérimentales.

#### III.2.5.1. Paramètres d'entrée et mesurée.

Tableau III.1 : Valeur d'entrée et de mesure.

U (v)	I (A)	$I_f$ (A)	$T_c$		$T_f$		$U_s$ (V)
			K	°C	K	°C	
1	0,23	0,12	299	26	294,1	21,1	0,23
2	0,4	0,25	299,1	26,1	289,4	16,4	0,507
3	0,56	0,38	299,1	26,1	285,3	12,3	0,738
4	0,73	0,52	299,1	26,1	281,3	8,3	0,931
5	0,91	0,67	299,2	26,2	276,9	3,9	1,117
6	1,13	0,85	299,1	26,1	272,8	-0,2	1,309
7	1,29	0,99	299	26	270,1	-2,9	1,45
8	1,32	1,17	299	26	267,2	-5,8	1,603
9	1,64	1,34	299	26	264,8	-8,2	1,761
10	1,733	1,41	298,5	25,5	262,9	-10,1	1,727
11	1,987	1,61	298,5	25,5	261,1	-11,9	1,742
12	1,976	1,79	298,5	25,5	259,5	-13,5	1,802
13	2,49	2	298,4	25,4	258,1	-14,9	1,982
14	2,72	2,2	298,4	25,4	257,2	-15,8	1,967
15	2,87	2,4	298,4	25,4	256,5	-16,5	2,077
16	2,98	2,6	298,4	25,4	256,3	-16,7	2,063
17	3,41	2,71	296,8	23,8	257,7	-15,3	2,04
18	3,58	2,94	296,4	23,4	257,4	-15,6	2,146
19	3,5	3,09	296,3	23,3	258,3	-14,7	2,216

**Valeur d'entrée :**

$U$  : tension en volte.

**Valeurs mesurées :**

$I$  : intensité du courant en ampère (le premier courant marqué à la mise sous tension).

$I_f$  : intensité du courant en ampère (le courant marqué après stabilité du système).

$T_f$  : température de la face froide.

$T_c$  : température de la face chaude.

$U_s$  : tension de Seebeck en volte.

**III.2.5.2. Paramètres calculée.****Tableau III.2 :** Valeurs calculée.

U (v)	R <sub>am</sub> (Ω)	R <sub>v</sub> (Ω)	P (W)	T <sub>moy</sub> (°C)	ΔT (°C)	S (V/K)	Q <sub>c</sub> (W)	Q <sub>f</sub> (W)	COP	Ec	η(%)
1	4,35	8,33	0,12	23,55	4,9	0,05	1,68	1,65	13,80	60,02	23,00
2	5,00	8,00	0,5	21,25	9,7	0,05	3,90	3,78	7,56	29,84	25,35
3	5,36	7,89	1,14	19,2	13,8	0,05	6,07	5,79	5,09	20,67	24,60
4	5,48	7,69	2,08	17,2	17,8	0,05	8,13	7,65	3,68	15,80	23,28
5	5,49	7,46	3,35	15,05	22,3	0,05	10,04	9,29	2,77	12,42	22,34
6	5,31	7,06	5,1	12,95	26,3	0,05	12,65	11,54	2,26	10,37	21,82
7	5,43	7,07	6,93	11,55	28,9	0,05	14,85	13,41	1,94	9,35	20,71
8	6,06	6,84	9,36	10,1	31,8	0,05	17,63	15,75	1,68	8,40	20,04
9	5,49	6,72	12,06	8,9	34,2	0,05	20,63	18,27	1,51	7,74	19,57
10	5,77	7,09	14,1	7,7	35,6	0,05	20,41	17,98	1,28	7,38	17,27
11	5,54	6,83	17,71	6,8	37,4	0,05	22,38	19,57	1,11	6,98	15,84
12	6,07	6,70	21,48	6	39	0,05	24,68	21,46	1,00	6,65	15,02
13	5,22	6,50	26	5,25	40,3	0,05	29,35	25,38	0,98	6,40	15,25
14	5,15	6,36	30,8	4,8	41,2	0,05	31,34	27,01	0,88	6,24	14,05
15	5,23	6,25	36	4,45	41,9	0,05	35,50	30,51	0,85	6,12	13,85
16	5,37	6,15	41,6	4,35	42,1	0,05	38,01	32,65	0,78	6,09	12,89
17	4,99	6,27	46,07	4,25	39,1	0,05	41,96	36,43	0,79	6,59	12,00
18	5,03	6,12	52,92	3,9	39	0,06	47,95	41,64	0,79	6,60	11,92
19	5,43	6,15	58,71	4,3	38	0,06	53,39	46,54	0,79	6,80	11,66

**Valeurs calculées**

$R_{am}$ : resistance a temperature ambiante  $R_{am} = U/I$  (Ω).

$R_v$ : resistance a temperature  $T_{moy}$   $R_v = U/I_f$  (Ω).

$P$ : puissance électrique fournie  $P = U * I_f$  (W).

$T_{moy}$ : température moyenne  $T_{moy} = (T_c + T_f)/2$  (°C).

$\Delta T$  : différence de température  $\Delta T = T_c - T_f$  (°C).



**S**: coefficient de Seebeck  $S = U_s / \Delta T$  (V/K).

**Q<sub>c</sub>** : chaleur libérée  $Q_c = T_c * S * I_f$  (W).

**Q<sub>f</sub>** : chaleur libérée  $Q_f = T_f * S * I_f$  (W).

**COP** : coef de performance  $COP = Q_f / P$  (sans unité).

**E<sub>c</sub>** : efficacité de Carnot  $E_c = T_f / T_c - T_f$  (sans unité).

**η** : le rendement du module Peltier  $\eta = (100 * COP) / E_c$  (%).

### III.2.6. Interprétation des résultats :

#### III.2.6.1. Calcul de la résistance à Température ambiante R<sub>am</sub> du module TE :

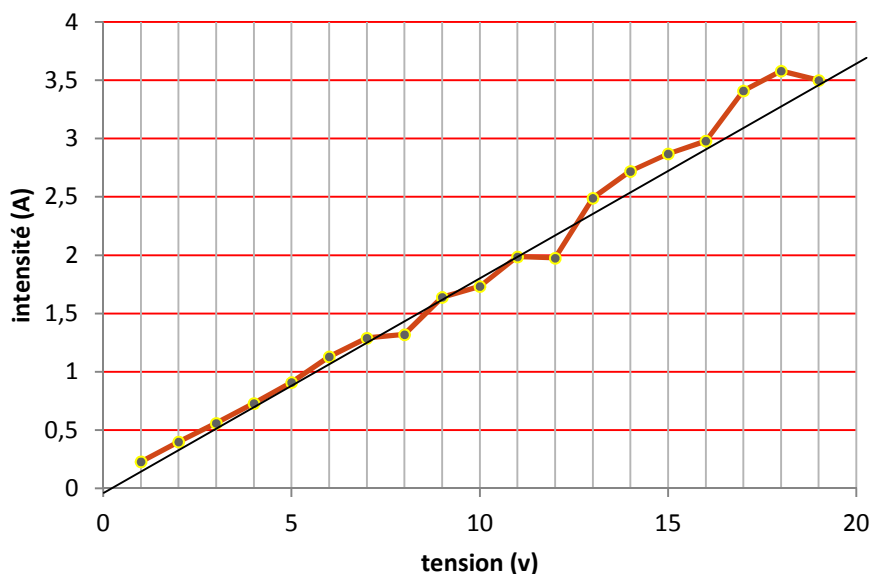


Figure III.4: Courbe  $I = f(U)$

On trace le graphe de l'intensité  $I$  du courant en fonction de la tension  $U$  en suite en trace la droite de la courbe de tendance que devra passer par le point (0,0).

L'inverse de la pente  $I/U$  en  $U=3$  et en  $U=19$  V donne la résistance.

$$\text{Donc } R_{\text{am}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{19-3}{3.5-0.56} = 5.44 \Omega.$$

Cette valeur représente la résistance du module à une Température ambiante moyenne de 25 °C.

#### III.2.6.2. Variation de la résistance en fonction de la température :

On tracer le graphe de la résistance variable  $R_v$  qui varie selon la Température moyenne  $T_{\text{moy}}$  de la face chaude et froide du module TE.

La pente de la droite de la courbe de tendance représente cette variation  $V$ .

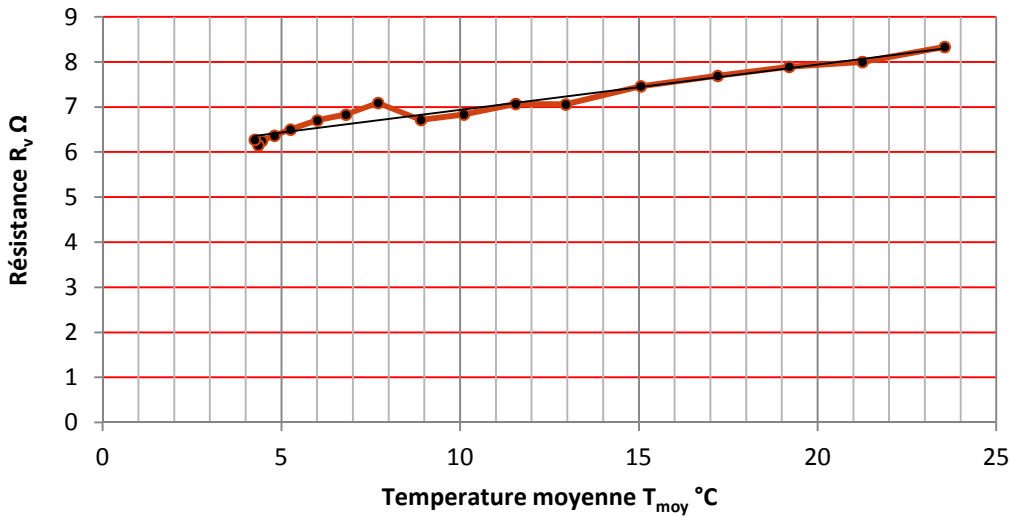


Figure III.5: Résistance en fonction de la température

Donc  $V = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{8.33 - 7.07}{23.55 - 11.55} = 0.105 \text{ } \Omega/^{\circ}\text{C}$ .

Donc quand la température monte ou descend de 1 degré la Résistance monte ou descend de 0.105 Ω.

**III.2.6.3. Calcule du pouvoir thermoélectrique (S) du module TE :**

Rappelons La définition du coefficient Seebeck S (V/K)

Une différence de température dT entre les jonctions de deux matériaux A et B implique une différence de potentiel Electrique dV voir l'équation (eq.II.1).

Pendant les tests on a remarqué qu'il y a une tension générée par le module quand on coupe la source d'alimentation, cela est dû à la réversibilité du système, et puisque les deux faces du module sont à une température différente le module génère du courant électrique.

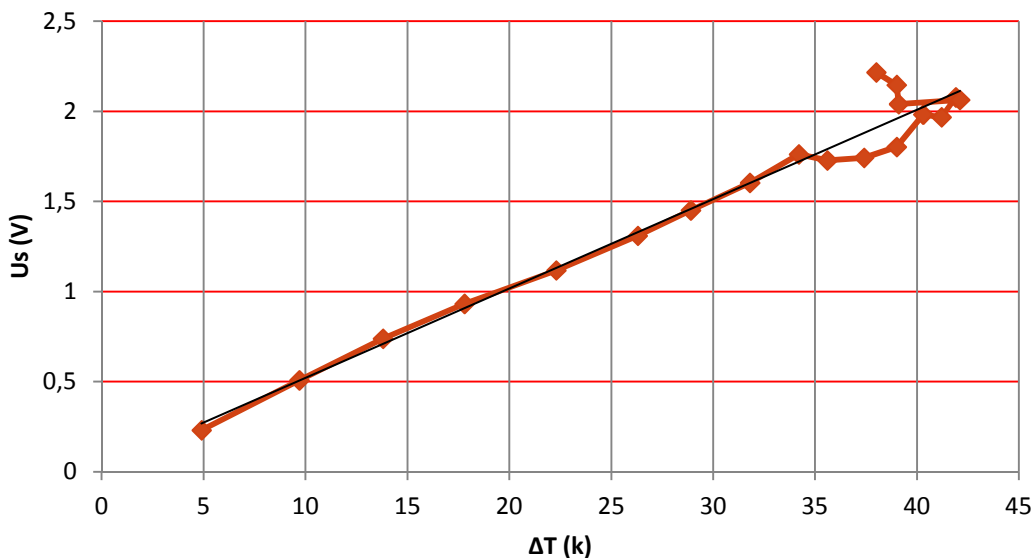


Figure III.6: Tension U<sub>s</sub> en fonction dT

Cette tension est enregistrée dans le tableau III-1 mentionnée  $U_s$ , permettent cette dernier de calculer le pouvoir thermoélectrique du module TE.

En trace la courbe tension de Seebeck en fonction de différence de température en les deux faces

La pente de la droite de la courbe de tendance represente le coef Seebeck S.

$$\text{Donc } S = \frac{\Delta U_s}{\Delta T} = \frac{1.603 - 0.507}{31.8 - 9.7} = 0.049 \text{ V/K.}$$

Cette valeur représente coef Seebeck pour 128 couples de la jonction P-N qui comporte le module

Donc pour un seul couple on a :

$$S_{\text{couple}} = \frac{0.049 \times 10^6}{128} = 387.44 \mu\text{V/K.}$$

La courbe de tension en fonction de la température est une courbe linéaire de 4.9 °C à 34.2°C Mais après cet intervalle la courbe perturbe : on déduit que le coefficient de Seebeck S du matériau est sensible à la température (T).

### III.2.6.4. Calcule de la chaleur dégager et absorbé par le module :

Pour une jonction a température T, la chaleur dégager ou absorbé est :

$$\text{Sur la face froide } Q_f = S_m \times T_f \times I \tag{eq.II.8}$$

$$\text{Sur la face chaude, } Q_c = S_m \times T_c \times I \tag{eq.II.9}$$

- Q : la quantité de chaleur absorbée ou libérée (W).
- S : le coefficient Seebeck (V/K).
- T : la température absolue de la jonction p/n (K).
- I : l'intensité du courant (A).

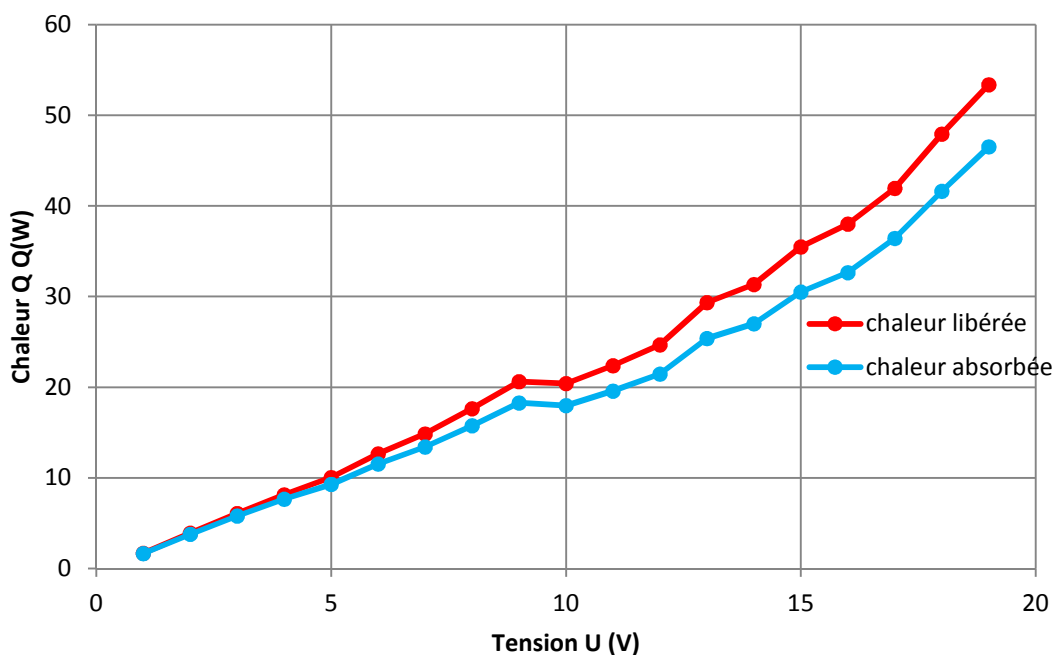


Figure III.7: Courbes chaleur en fonction de la tension

Les deux courbes se suivent qui veut dire qu'il y a une quantité de chaleur transférée de la face froide vers la face chaude, le décalage entre les deux courbes qui augmente avec l'augmentation de la tension représente la quantité de chaleur libérée par effet joule.

### III.2.6.5. Calcul du coefficient de performance COP :

Rappelons l'équation (eq.II.8)

$$COP = \frac{Q_f}{P}$$

- $Q_f$  : la puissance calorifique absorbée par l'objet disposé du côté froid du thermocouple
- $P$  : la puissance fournie par le générateur.

En plus on a la loi d'efficacité du cycle de Carnot d'une pompe à chaleur

$$E_c = T_f / (T_c - T_f) \quad (\text{eq.III.1})$$

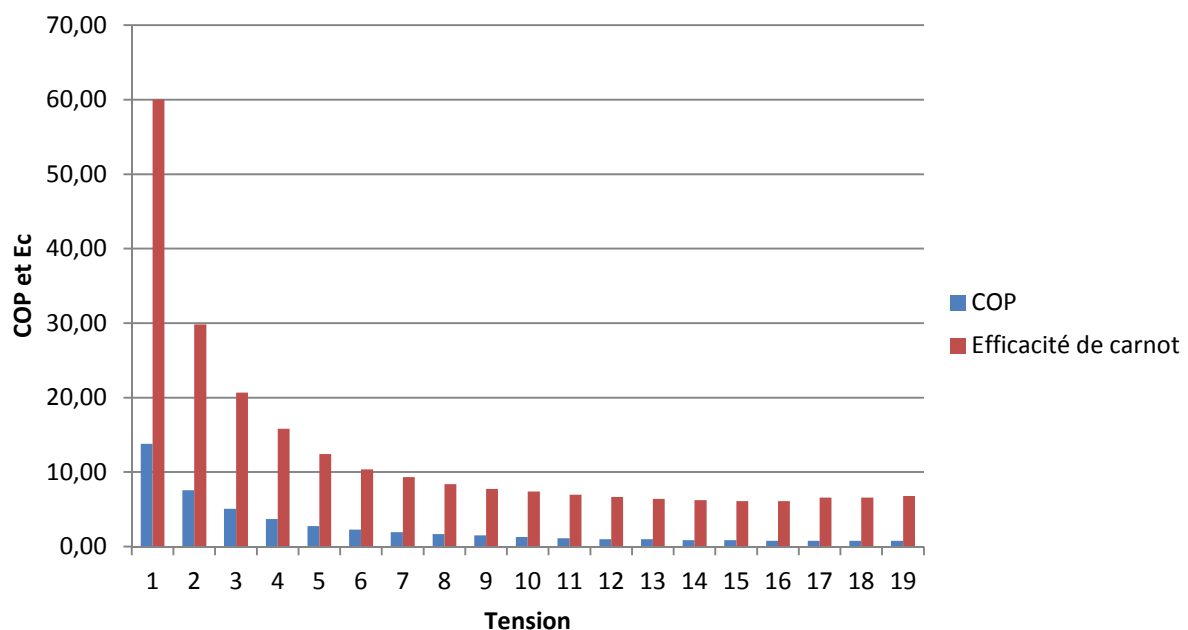


Figure III.8: Le COP et Ec en fonction de la Tension

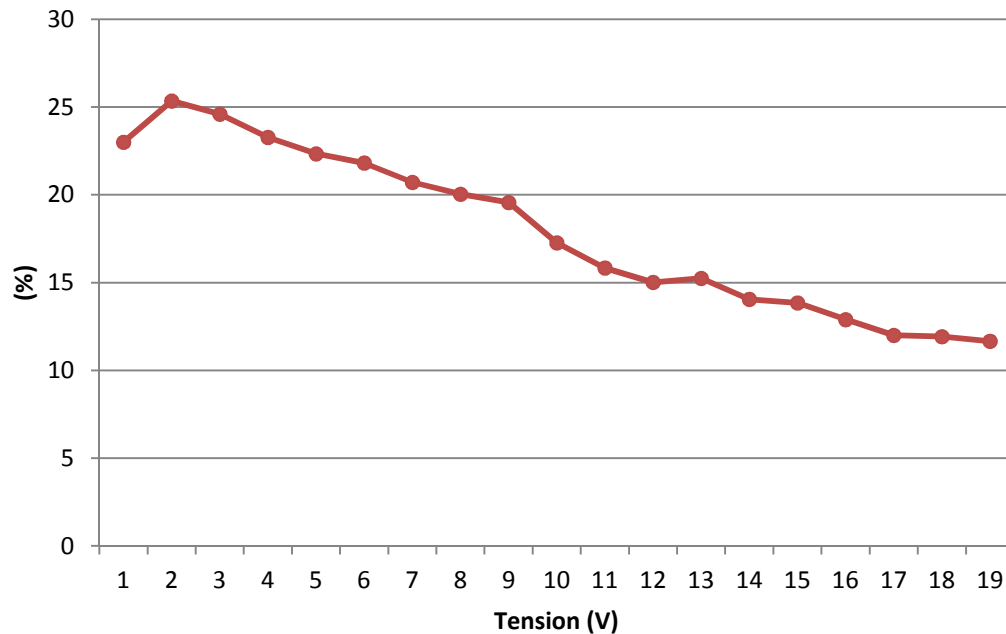
Une pompe à chaleur ne peut pas avoir un rendement supérieur à celui d'un cycle de Carnot. Et comparé ce dernier à notre pompe à chaleur on voit qu'il est loin de sa valeur max cela est dû à la caractéristique physique du module ainsi de la résistance thermique du système qui défavorise le coef de performance.

Dans le graphique qui se suit nous évaluons notre pompe à chaleur par rapport à l'efficacité de Carnot en utilisons l'équation suivante

$$\eta = (100 * COP) / E_c \quad (\text{eq III.2})$$

- $\eta$  : le rendement du module Peltier (%).
- COP : coef de performance (sans unité).

- $E_c$  : efficacité de Carnot (sans unité).



**Figure III.9:** Rendement du Module TE

Le rendement de la machine se dégrade avec l'augmentation de la tension.

Pour justifier cette dégradation il faut voir les deux autres paramètres qui sont en relation directe avec la tension, La différence de température entre les deux surfaces  $\Delta T$  et l'intensité du courant  $I$ .

$\Delta T$  favorise le transport de chaleur à contre-courant du transport fait par effet Peltier donc plus la différence de température est grande plus le retour de chaleur est grand.

Le carré du courant intervient dans l'effet joule qui est une chaleur générée par la résistance interne du module et a pour effet d'augmenté la température de la face froide donc un rendement plus faible.

### III.3. Expérience B (refroidissement avec dissipateur de chaleur) :

#### III.3.1. Introduction :

Pour avoir un bon rendement d'un module TE et dans le cas de refroidissement, l'évacuation parfaite de la chaleur libéré par la face chaude est nécessaire.

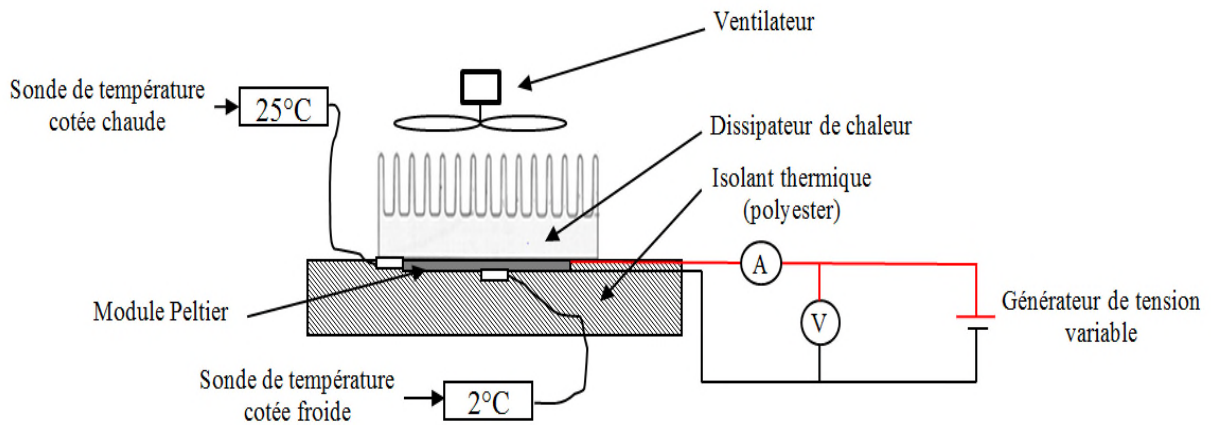
Le refroidissement à l'eau est le meilleur moyen pour absorbé la chaleur libéré par le système, mais l'encombrement que représente ce mode de refroidissement le rend impossible de l'appliquer à notre application désirée.

L'utilisation d'un dissipateur de chaleur avec ventilation forcé pour augmenter la convection (selon le débit d'air injecté), est la solution la moins encombrante mais représente un rendement faible comparé à celle avec l'eau.

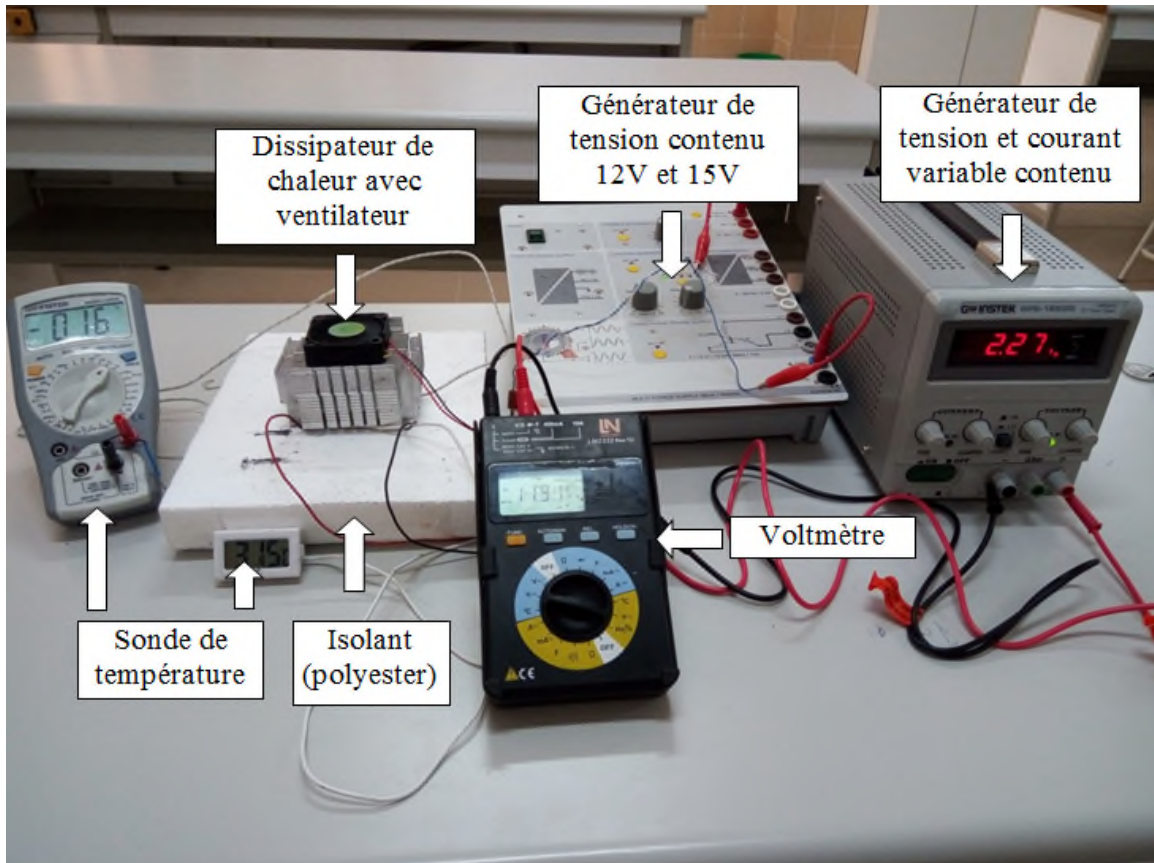
### III.3.2. But de l'expérience :

Le but de cette expérience est de déterminer l'efficacité qui peut avoir un dissipateur de chaleur avec ventilation forcé contre un refroidissement à l'eau, et l'influence de la puissance de ventilation sur le rendement du dissipateur.

### III.3.3. Schéma du montage



**Figure III.10 :** Schéma banc d'essai (expérience B)



**Figure III.11 :** Photo du banc d'essai expériences B laboratoire d'Adrar

### III.3.4. Protocole de l'expérience :

- A l'aide du générateur on alimente le module TE en courant contenu commençant de 1 V jusqu'à 19 V avec un pas de 1V.
- A chaque ajustement de la tension on met l'interrupteur reliant la source électrique au module TE en position ouvert.
- A chaque essai on note la valeur du courant I qui s'affiche sur le générateur en premier et la valeur du courant  $I_f$  après stabilité du système.
- Dans chaque fin d'essai est quand on met l'interrupteur en position ouvert on note la valeur de la tension  $U_s$  qui génère le module puisque ces deux surfaces sont en différences de température.
- La valeur de l'intensité I et de la tension  $U_s$  varie brusquement, un enregistrement vidéo est nécessaire pour l'acquisition précise des données.
- A chaque essai on mesure la température de la face froide  $T_f$  et la face chaude  $T_c$  et après stabilité de la température.
- Avant chaque teste on doit remettre les deux surfaces à la même température on laisse le ventilateur en marche et alimentation coupé.
- L'utilisation d'une pâte thermique entre les surfaces en contact pour diminuer la résistance thermique est nécessaire.
- On utilise deux vitesses de ventilation, la première avec tension 12V et l'autre avec 15V.
- Les paramètres I,  $I_f$ ,  $U_s$  sont pris de la première vitesse de ventilation.

### III.3.5. Résultats expérimentales :

#### III.3.5.1. Paramètres d'entrée et mesurée :

Tableau III.3 : Valeurs d'entrée et mesurée.

U (v)	I (A)	I <sub>f</sub> (A)	ventilateur vitesse 1		ventilateur vitesse 2		U <sub>s</sub> (v)
			T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	
1	0,25	0,12	22,7	15	22,7	14	0,268
2	0,46	0,23	21,8	10	21,8	9	0,539
3	0,68	0,31	22	5	22	4,5	0,808
4	0,95	0,55	22,2	1	22,2	1	1,034
5	1,19	0,82	23,1	-2	23,1	-2	1,245
6	1,43	1,01	24,2	-5	24,2	-5	1,437
7	1,68	1,22	24,9	-8	24,9	-8	1,63
8	1,74	1,44	26	-11	26	-11	1,8
9	2,05	1,68	27,5	-13	26,8	-13	1,522
10	2,27	1,61	27,2	-15	29,1	-14	1,747
11	2,53	2,07	29,4	-16	30,8	-15	1,825
12	2,61	2,3	32,5	-16	31,1	-16	1,852
13	2,75	2,47	34,6	-16	32,9	-17	2,32
14	3,4	2,75	36,3	-17	34,3	-18	2,087
15	3,36	3,13	38,4	-16	36	-17	2,11
16	3,85	3,22	40,5	-15	38,5	-16	2,26
17	4,66	3,42	42,5	-13	40,3	-14	2,3
18	4,66	3,66	44,8	-12	42,3	-13	2,38
19	4,66	3,79	47,2	-10	44,3	-11	2,4

**Valeur d'entrée :**

U : tension en volte.

**Valeurs mesurées :**

I : intensité du courant en ampère (le premier courant marqué à la mise sous tension).

$I_f$  : intensité du courant en ampère (le courant marqué après stabilité du système).

$T_f$  : température de la face froide.

$T_c$  : température de la face chaude.

$U_s$  : tension de Seebeck en volte.

**III.3.5.2. Paramètres calculée :****Tableau III.4 :** Valeurs calculée.

U (v)	$R_{am}(\Omega)$	$R_v(\Omega)$	P (W)	ventilation V1	ventilation V2	S (V/K)	Qc (W)	Qf (W)	COP (W)	Ec	$\eta$
				$\Delta T$	$\Delta T$						
1	4,00	8,33	0,12	7,7	8,7	0,03	1,09	1,06	8,87	36.00	24.64
2	4,35	8,70	0,46	11,8	12,8	0,04	2,86	2,74	5,96	21.77	27.37
3	4,41	9,68	0,93	17	17,5	0,05	4,22	3,98	4,28	15.44	27.70
4	4,21	7,27	2,2	21,2	21,2	0,05	7,92	7,35	3,34	12.45	26.83
5	4,20	6,10	4,1	25,1	25,1	0,05	12,04	11,02	2,69	10.84	24.80
6	4,20	5,94	6,06	29,2	29,2	0,05	14,77	13,32	2,20	9.57	22.97
7	4,17	5,74	8,54	32,9	32,9	0,05	18,01	16,02	1,88	8.55	21.94
8	4,60	5,56	11,52	37	37	0,05	20,95	18,35	1,59	7.71	20.68
9	4,39	5,36	15,12	40,5	39,8	0,04	19,31	16,70	1,10	7.22	15.30
10	4,41	6,21	16,1	42,2	43,1	0,04	19,59	16,84	1,05	6.79	15.40
11	4,35	5,31	22,77	45,4	45,8	0,04	24,94	21,20	0,93	6.59	14.13
12	4,60	5,22	27,6	48,5	47,1	0,04	27,63	23,24	0,84	6.59	12.78
13	4,73	5,26	32,11	50,6	49,9	0,05	35,32	29,51	0,92	6.59	13.95
14	4,12	5,09	38,5	53,3	52,3	0,04	33,94	28,09	0,73	6.40	11.40
15	4,46	4,79	46,95	54,4	53	0,04	38,80	32,02	0,68	6.59	10.35
16	4,16	4,97	51,52	55,5	54,5	0,04	41,86	34,45	0,67	6.79	9.85
17	3,65	4,97	58,14	55,5	54,3	0,04	45,70	37,66	0,65	7.22	8.97
18	3,86	4,92	65,88	56,8	55,3	0,04	50,06	41,11	0,62	7.46	8.37
19	4,08	5,01	72,01	57,2	55,3	0,04	52,67	43,26	0,60	7.97	7.54

**- Valeurs calculées**

$R_{am}$ : resistance a temperature ambiante  $R_{am} = U/I$  ( $\Omega$ ).

$R_v$ : resistance a temperature  $T_{moy}$   $R_v = U/I_f$  ( $\Omega$ ).

P: puissance électrique fournie  $P = U * I_f$  (W).

$\Delta T$  : différence de température  $\Delta T = T_c - T_f$  ( $^{\circ}C$ ).



**S**: coefficient de Seebeck  $S = U_s / \Delta T$  (V/K).

**Q<sub>c</sub>** : chaleur libérée  $Q_c = T_c * S * I_f$  (W).

**Q<sub>f</sub>** : chaleur absorbée  $Q_f = T_f * S * I_f$  (W).

**COP** : coef de performance  $COP = Q_f / P$  (sans unité).

**E<sub>c</sub>** : efficacité de Carnot  $E_c = T_f / T_{amb} - T_f$  ( $T_{amb} = 23^\circ\text{C}$ ).

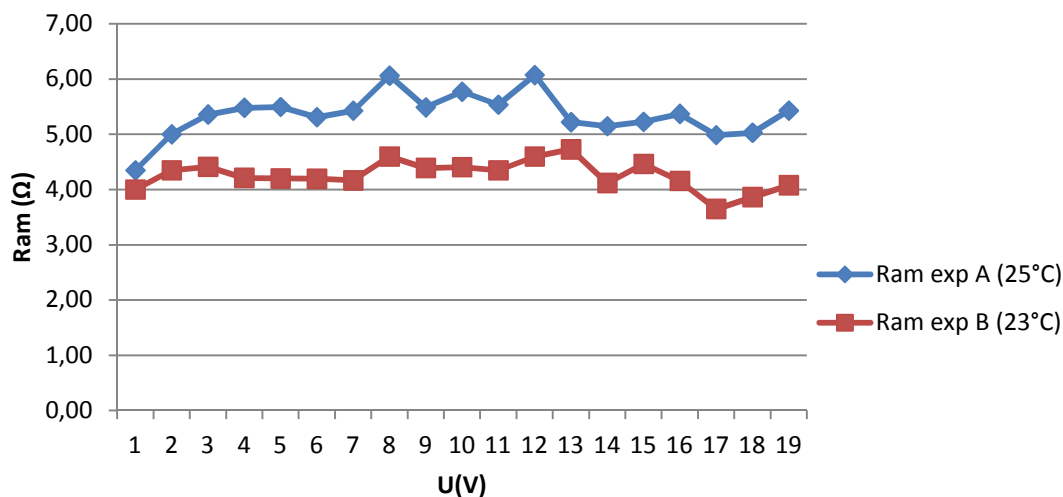
**η** : le rendement du module Peltier  $\eta = (100 * COP) / E_c$  (%).

### III.3.6. Interprétation des résultats :

On utilise le même module TE pour que la comparaison soit limité au niveau de paramètre énergie, mais il est nécessaire de vérifier que les caractéristiques physique du module n'ont pas changé.

#### III.3.6.1. Résistance $R_{am}$ :

On tracer les deux graphes de la résistance a température ambiante des deux expériences.



**Figure III.12** : Changement de  $R_{am}$  entre les deux expériences

Les deux courbes ont la même allure avec un décalage moyenne de 0,9 Ω (prendre en considération la différence de la température ambiante), cela est dû à la forte charge mécanique et physique qui a subit le module sachant que L'expérience (B) était faite en premier avant l'expérience (A) donc les charger qui a subit le module ont fait augmenté sa résistance interne et la tension max conseillé par le constructeur est de 15V.

#### III.3.6.2. Coefficient Seebeck **S**.

On trace les deux courbes représentant le coefficient Seebeck en fonction de la tension des deux expériences.

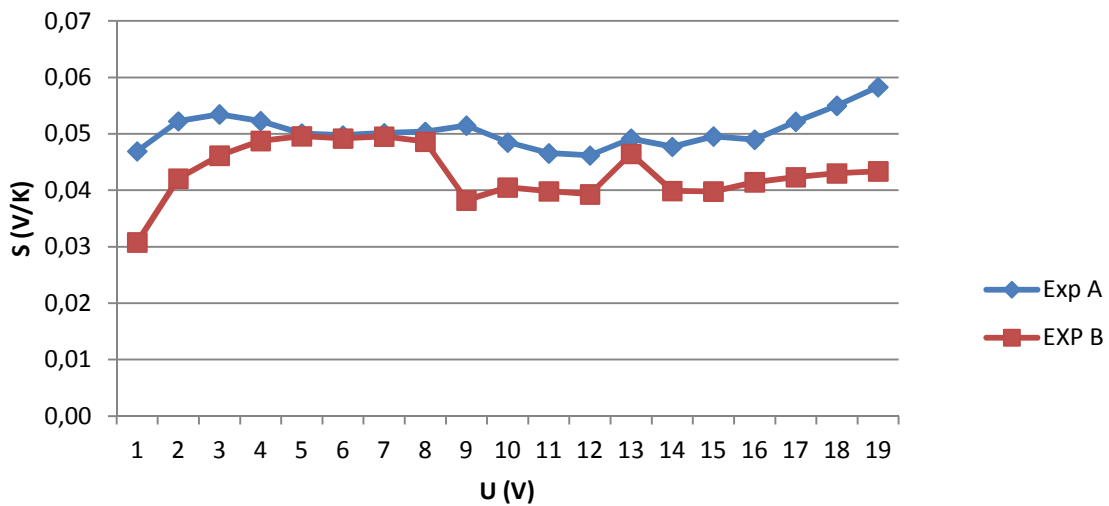


Figure III.13 : Coef de Seebeck des deux experiences

D'une vue générale les deux courbe se suivent sauf dans quelques points où on remarque la diminution de l'écart formé entre les deux courbes.

Puisque le coef de Seebeck est influé par la température, et la température interne du module est moins stable (libération faible de la chaleur vers l'extérieur) comparé à la première expérience, cela justifie l'allure perturbée de la courbe

### III.6.3. Chaleur absorbée $Q_f$ et coef de performance COP:

On trace les deux courbes représentant la chaleur absorbée dans les deux expériences.

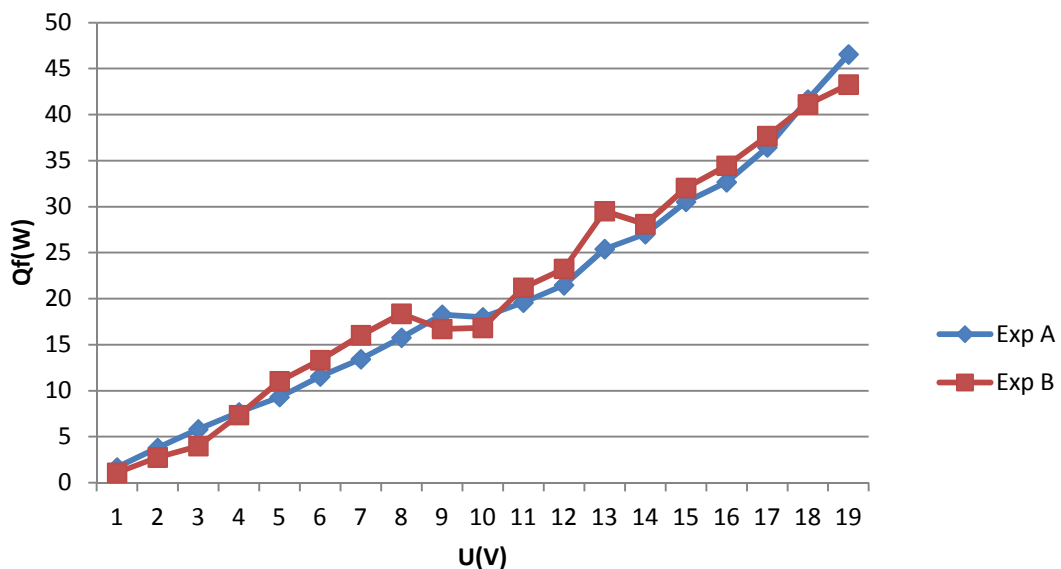


Figure III.14: Chaleur absorbée Exp A et B

Ainsi on trace les deux courbes représentant le coefficient de performance des deux expériences

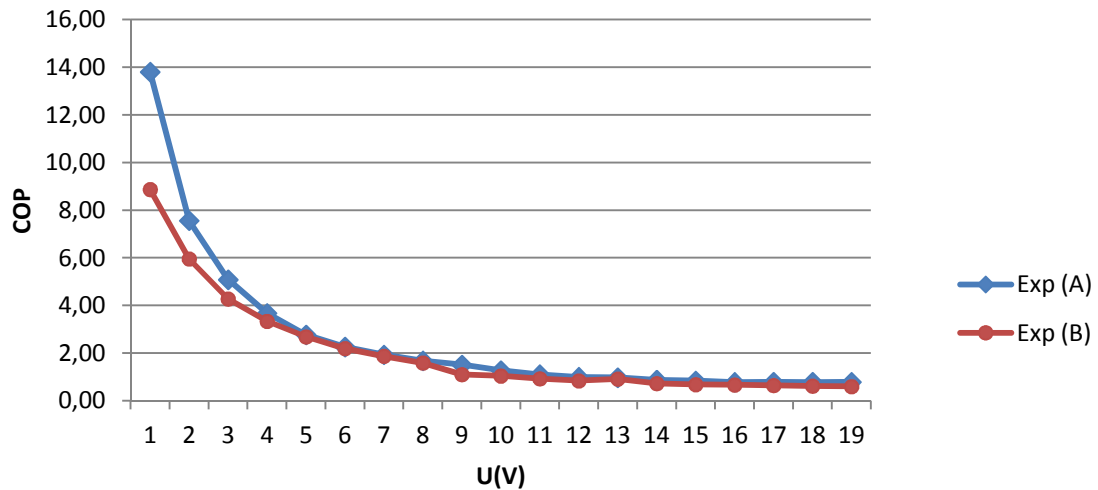


Figure III.15 : COP Exp A et B

Les deux courbes dans les deux graphes se superposent malgré qu'on doive avoir la courbe de l'expérience (A) plus haute que l'autre courbe, mais l'énergie qu'on devra gagner en plus dans l'expérience (A) comparé à l'expérience (B) (le refroidissement à l'eau est plus efficace) est perdue par effet joule puisque la résistance de l'expérience (A) est plus grande.

### III.3.6.4. Le rendement des deux systèmes :

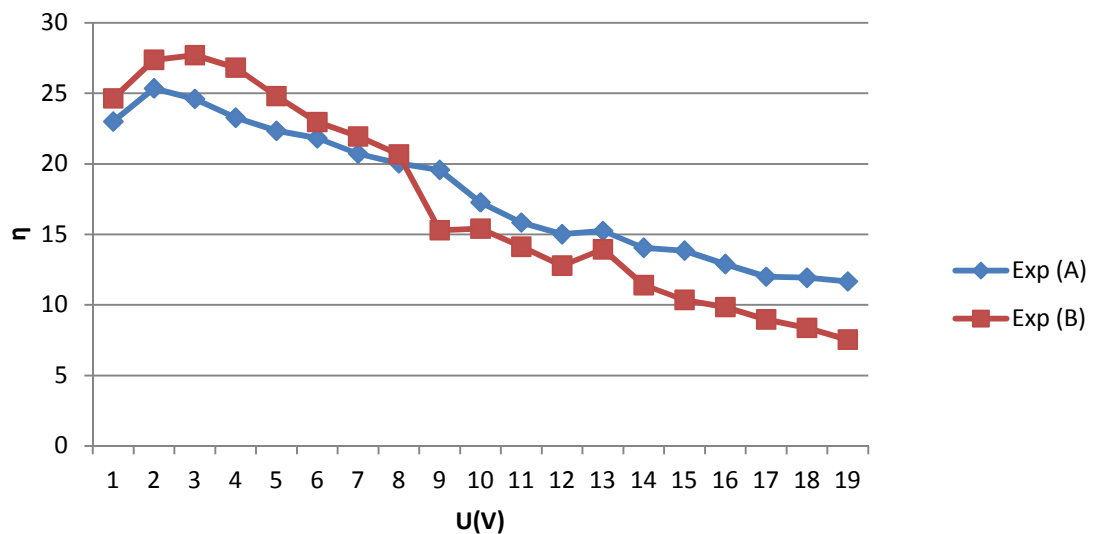


Figure III.16 : Rendement des deux système

Dans ce graphe on remarque bien que dans l'intervalle 1V-8V le rendement de l'exp (B) est meilleur que celui de l'exp (A) puisque il a l'avantage d'avoir une faible résistance et faible température ambiante, ici le rôle du type de refroidissement n'a pas encore apparaitre car la quantité de chaleur libéré et celle généré par l'effet joule est petite par rapport à la capacité des deux type de refroidissement.

Dans le reste de l'intervalle en remarque bien la supériorité du refroidissement à l'eau vu l'augmentation progressive de la température de la face chaude du module.

### III.3.6.5. Vitesse de ventilation :

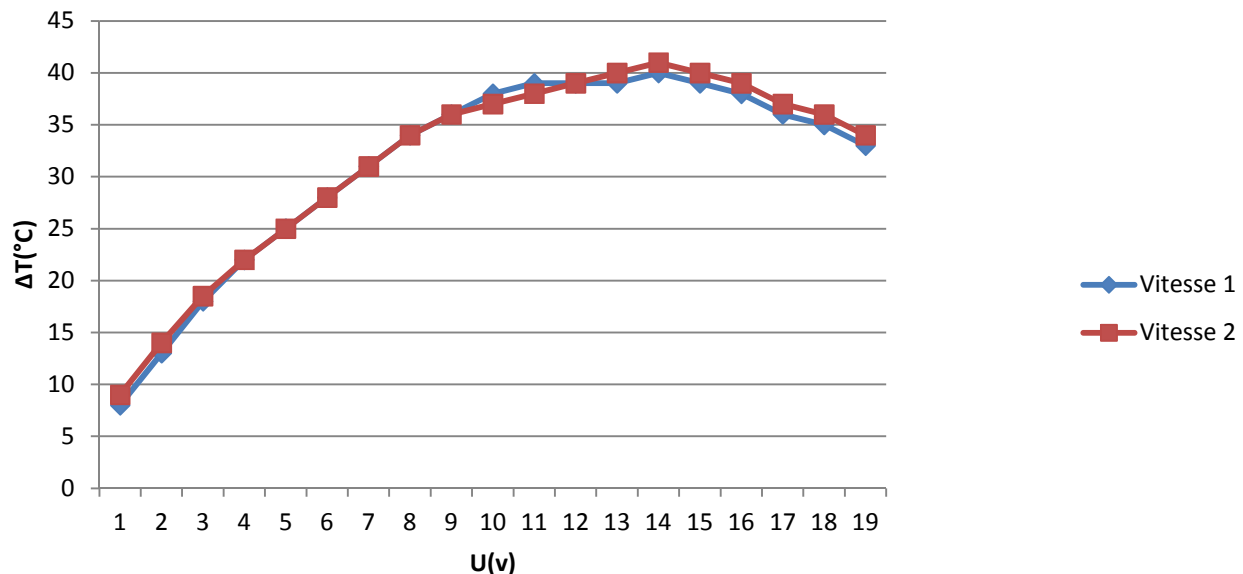


Figure III.17: Impact de la vitesse de refroidissement

La première vitesse de ventilation est alimentée avec 12V, 1.68W et la deuxième vitesse avec 15V, 2.1W (on utilise le même ventilateur).  $\Delta T$  est la différence entre la température ambiante et la température de la face froide.

L'augmentation de la puissance du ventilateur de 0.42W nous a donné un gain en température de la face froide au maximum 2°C.

Mais la remarque la plus importante de ce graphe est qu'il y a une plage de tension ( $U = 12V$  à  $15V$ ) qui représente un meilleur apport de température, cela nous permet de limiter notre choix de tension pour l'alimentation du prototype prévue.

### III.4. Conclusion :

Les résultats obtenus des expériences sont très significatifs et logiques malgré certains paramètres qu'on n'a pas pu les garder constants entre les deux expériences comme la résistance interne du module et la température ambiante, ces derniers ont influé sur l'interprétation de certains résultats, mais cette imprévue nous a permis de conclure deux points :

- La résistance interne et la température ambiante sont des paramètres majeurs dans le système.
- Le module TE est très fragile mécaniquement et physiquement et ces derniers peuvent engendrer la dégradation de ces caractéristiques physiques ou même la destruction du module (notre module est claqué lors d'une expérience complémentaire).

Le système de refroidissement à l'eau est la méthode la plus idéale pour un bon rendement d'un module Peltier, mais il n'est pas pratique pour notre application (système complexe et dépendant), ce qui limite notre choix à un refroidissement forcé à l'air.

Parmi les difficultés rencontrées dans les expériences,

- Les sondes thermiques qui ne sont pas professionnelles (précision et temps de réponse).
- Le contrôle de la température ambiante.

- La stabilité de la température d'eau de refroidissement (utilisation d'eau du robinet en circuit ouvert).

On conclut de ce chapitre que le module Peltier peut être le candidat idéal pour la réalisation d'un prototype expérimentale, malgré son rendement faible comparé à une pompe à chaleur classique il a l'avantage d'être moins volumineux et absence de pièce mobile ainsi très pratique dans les petites applications.

# *Chapitre IV*

---

***CONCEPTION ET REALISATION D'UNE FONTAINE  
FRAICHE THERMOELECTRIQUE***

---

## Chapitre IV :

### CONCEPTION ET REALISATION D'UNE FONTAINE FRAICHE THERMOELECTRIQUE

#### IV.1. Introduction :

Avoir de l'eau fraîche tout le temps et en été est impossible surtout là où la température atteint des valeurs extrême, comme le cas de la ville d'Adrar (sud d'Algérie) ou la température peut monter à des valeurs extrêmes jusqu'à 55 en été.

La préoccupation des individus est de boire de l'eau fraîche là où ils sont, au lieu de travail (bureau, chantier, chauffeur, zone agricole...Ets), dans leurs résidence (chambre des étudiants, camping...Ets).

Généralement on procure de l'eau fraîche soit d'un réfrigérateur ou d'une fontaine fraîche qui fonctionne avec une pompe à chaleur classique, ces deux représentent l'inconvénient d'être lourd et volumineux (pas possible de l'avoir là où on veut), soit d'une glacière qui on les trouve à plusieurs formes et volumes et ils sont portatives mais il ne produise pas du froid, il le conserve seulement.

Dans ce chapitre nous proposons une solution à cette difficulté qui consiste à concevoir une glacière (fontaine fraîche) qui refroidie l'eau et de la conserver à une température acceptable avec un module Peltier de faible puissance, qui peut être alimenté avec plusieurs sources (prise 12V d'une voiture, prise 220V du réseau publique, et même d'un panneau photovoltaïque).

#### IV.2. Définitions :

##### IV.2.1. Fontaine d'eau fraîche :

Une fontaine d'eau fraîche, également appelée fontaine à eau, refroidisseur d'eau ou distributeur d'eau, est un dispositif électrique permettant la distribution d'eau potable fraîche.

##### IV.2.2. Eau fraîche :

C'est une eau qui est légèrement froide ou qui donne une sensation de froid modéré.

##### IV.2.3. Besoin journalier en eau par individu :

En moyenne on recommande 30 ml par kilo de poids corporel, soit 1 litre à 1,5 litres d'eau auxquels s'ajoute l'eau des aliments comme les fruits et légumes (qui apportent en moyenne 1 litre d'eau par jour). A cela, il faut ajouter un demi-litre de plus par jour, pour chaque degré au-dessus de 38°C.

Les recommandations officielles les plus récentes sur les besoins en eau ont été publiées en 2010 par les Autorités de Santé Européennes (EFSA – Européen Food Safety Authority).

Cette revue scientifique exhaustive a permis de définir des besoins en eaux appropriés, en se basant sur la consommation de boissons en Europe, les niveaux d'osmolarité urinaire souhaités et les apports énergétiques. Ces valeurs de référence sont valables pour un climat tempéré et un niveau modéré d'activité physique.

**Tableau IV.1** : Valeurs nutritionnelles de référence pour l'eau

		Consommation totale d'eau recommandée (Aliments et liquides)	
<b>Nourrisson</b>	0-6 mois	680 mL/jour (PAR LE LAIT)	
	6-12 mois	800-1000 mL/jour	
<b>Enfants</b>	1-2 ans	1100-1200 mL/jour	
	2-3 ans	1300 mL/jour	
	4-8 ans	1600 mL/jour	
	9-13 ans	Garçons	2100 mL/jour
		Filles	1900 mL/jour
> 14 ans	Cf adultes		
<b>Adultes</b>	Hommes	2500 mL/jour	
	Femmes	2000 mL/jour	
<b>Femmes enceintes</b>		+ 300 mL/jour vs adultes	
<b>Femmes allaitantes</b>		+ 600-700 mL/jour vs adultes	
<b>Personnes âgées</b>		Cf adultes	

Donc à 40°C l'adulte consomme 2.5 L/jour soit 0.14 L/heure ou un verre d'eau chaque 2 heures.

### IV.3.Cahier des charges du projet

- le projet est une fontaine fraîche qui assure le besoin en eau fraîche d'un seul individu.
- l'appareil refroidit l'eau à l'aide d'une pompe à chaleur thermoélectrique.
- la puissance max de l'appareil ne dépasse pas 40W.
- au minimum la quantité d'eau fraîche qui assure l'appareil est d'un verre d'eau (250 ml) chaque ½ heure.
- la température de l'eau fraîche doit être inférieure de plus de 10°C de la température ambiante.
- l'appareil doit comporter deux enceintes une pour l'eau froide appelé réservoir froid et l'autre pour l'eau de réserve appelé réservoir chaud.
- le réservoir de l'eau chaude doit avoir un volume moyen de 2 litre.
- l'alimentation de l'appareil doit être assurée par trois sources comme suite.
  - 1- prise 220V du réseau public.
  - 2- prise 12V d'une voiture.
  - 3- d'une source photovoltaïque.
- l'appareil doit comporter un afficheur de température du réservoir froid.



- l'appareil doit avoir une belle allure et une simplicité de manipulation et portatif.

#### IV.4. Etude théorique et expérimentale :

##### IV.4.1. Capacité du module à refroidir un volume d'eau

Nous utilisons les valeurs calculées dans chapitre III (tableau III.4) pour définir d'une façon approximative la capacité du module pour refroidir un litre d'eau dans un système adiabatique et isotrope.

Les tensions d'alimentation idéal du module est entre 12V à 15V (voir figure III.17) avec une quantité de chaleur absorbée de la face froide on ordre égale à 23.24W à 32.02W.

Nous avons les formules suivantes :

$$P = \frac{W}{t} \quad (\text{eq IV.1})$$

P : puissance (W), W : travail (J), t : temps (s)

$$Cp = \frac{E}{m \cdot \Delta T} \quad (\text{eq IV.2})$$

Cp : Capacité thermique massique (J /kg-K)

E : énergie (j)

$\Delta T$  : différence de température (k)

Des deux formules précédentes on a

$$t = \frac{Cp \cdot m \cdot \Delta T}{P} \quad (\text{eq IV.3})$$

Pour 1 kg d'eau et  $\Delta T=1$  k avec  $Cp_{\text{eau}} = 4180$  J/kg.k on a

Pour  $Q_f=23.24$  W (tension 12V) on a :  $t = 180$  s = 3 min

Pour  $Q_f=32.02$  W (tension 15V) on a :  $t = 130$  s = 2 min10 s

Donc à une tension d'alimentation de 12V le module Peltier peut diminuer la température d'un litre d'eau d'un degré dans 3 minutes.

Ce résultat est très satisfaisant mais il y a des pertes qu'il faut les prendre en considération comme :

- Les pertes dues à l'effet joule de la résistance interne du module et les pertes par conduction interne du module de la face chaude vers la face froide.
- Les pertes par conduction et rayonnement externe du module qui dépend du degré d'isolation du système.
- Les résistances thermiques entre face de contacts plus des dissipateurs ou absorbeur de chaleur.

Donc la capacité de la pompe peut être inférieure à la valeur déjà calculer. Le teste finale de la fontaine peut nous donner une idée sur le rendement du système.

#### IV.4.2. Choix du récipient :

Le récipient que on doit concevoir doit avoir le volume de 3 litre pour assurer l'approvisionnement en eau fraîche toute la journée pour un seul individu.

La fabrication d'un récipient pour la fontaine fraîche et difficile surtout coté allure, on va choisir une glacière bonbonne et on installe le système de refroidissement sur elle, la bonbonne est de marque Keep Cool avec une capacité de 3.6 litre.

Cette glacière va être divisée en deux parties, une contient l'eau à refroidir (réservoir froid) de capacité de 1 litre et l'autre contient le réserve d'eau (réservoir chaud) qui alimente le premier récipient, ces deux réservoir sont séparées par un isolant avec un canal permet l'alimentation en eau entre les deux réservoirs.



Figure IV.1: Glacière bonbonne choisi

#### IV.4.3. Calcule des pertes thermiques de la bonbonne :

Le constructeur ne précise pas le niveau d'isolation de la glacière, pour ça on procède à une expérience qui permet de calculer les pertes thermiques de la glacière.

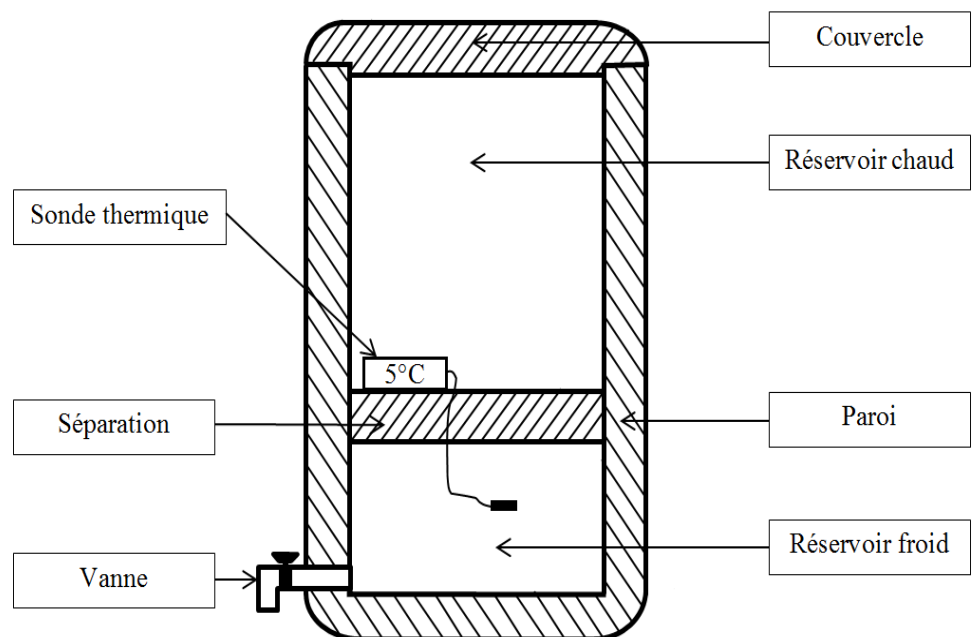


Figure IV.2 : Calcule des pertes Thermiques

### IV.4.3.1. Protocole de l'expérience :

- Le réservoir froid doit contenir 1 litre d'eau sans présence d'air et à une température inférieure à celui de l'ambiant et le réservoir chaud et vide.
- La sonde thermique a pour rôle de mesurer la température de l'eau en fonction du temps pour cela un enregistrement vidéo et nécessaire.
- La séparation est construite en matière isolante.
- Les résultats sont présentés dans tableau suivant.

**Tableau IV.2 :**

t (s)	0	341	541	1134	1653	2343	2773	3418	3692	4108
T <sub>c</sub> (°C)	16,90	17,00	17,1	17,2	17,3	17,40	17,50	17,60	17,70	17,80

t : temps (s)

T<sub>c</sub> : température du réservoir froid (°C).

T<sub>am</sub> : température ambiante égale à 23.3°C.

#### Calcule

De l'équation (eq IV.3) on a

$$P = \frac{C_p * m * \Delta T}{t} \quad (\text{W}) \quad (\text{eq IV.5})$$

Du tableau on a une variation de 0.9°C dans un temps de 4108s.

Donc  $\Delta T = 0.9 \text{ K}$ ,  $t = 4108\text{s}$ ,  $m = 1 \text{ Kg}$ ,  $C_{p\text{eau}} = 4180 \text{ J/kg.k}$

**A.N :**

$$P = (4180 * 1 * 0.9) / 4108 = 0.91 \text{ W}.$$

Donc nous avons un flux de chaleur de 0.91 W pour une différence de température  $\Delta T = T_{\text{am}} - T_c = 6^\circ\text{C}$

$$\text{On peut écrire } Q_p = \frac{P}{\Delta T} \quad \text{W}/^\circ\text{C} \quad (\text{eq IV .6})$$

**A.N :**

$$Q_p = 0.91 / 6 = 0.15 \text{ W}/^\circ\text{C}.$$

Pour bien comprendre l'influence des pertes sur le rendement du système on tracer le graphe suivant  $Q_f = f(\Delta T)$  et  $Q_p = f(\Delta T)$

On conclue du graphe que le flux de chaleur perdue à travers les parois est une fonction linière qui dépend de la différence de température entre le réservoir froid et le milieu extérieur, plus  $\Delta T$  est grand plus la chaleur perdue est grande, par contre le flux de chaleur absorbée par le module est constante et indépendante du  $\Delta T$  (dans des conditions idéal, ce qui ne donne un rendement globale du système décroissent plus  $\Delta T$  augmente.  $Q_p$  n'influe pas beaucoup sur le rendement du système pour des différences de température petite

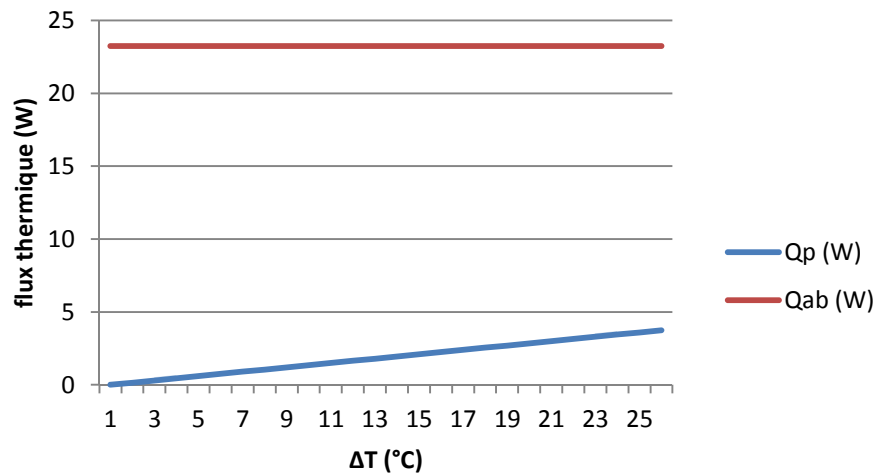


Figure IV.3: Influence des pertes thermique sur le systeme

**IV.4.4. Installation du module dans la bonbonne :**

Pour intégrer le module Peltier dans la bonbonne il faut ouvrir une fenêtre dans la partie inferieur de l’enceinte là où on va avoir le réservoir froid.

Les dimensions de la fenêtre sont de 40\*40mm dans la couche intérieur blanche de l’enceinte et 70\*90mm dans la couche d’isolation et la couche externe rouge en plastique.

Ensuite on installe l’absorbeur de chaleur (en matière d’aluminium) d’une façon de garantir une bonne fixation et étanchéité, on utilise pour ça une plaque de fixation avec vis et joint d’étanchéité comme illustré dans figure et photo qui suit.

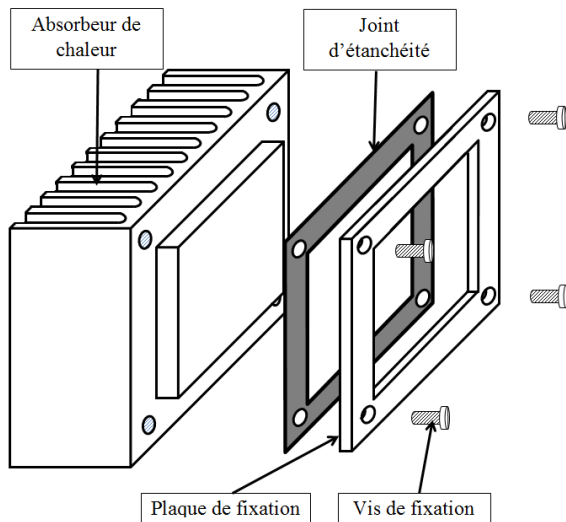


Figure IV.4 : Dispositif d’absorbeur de chaleur

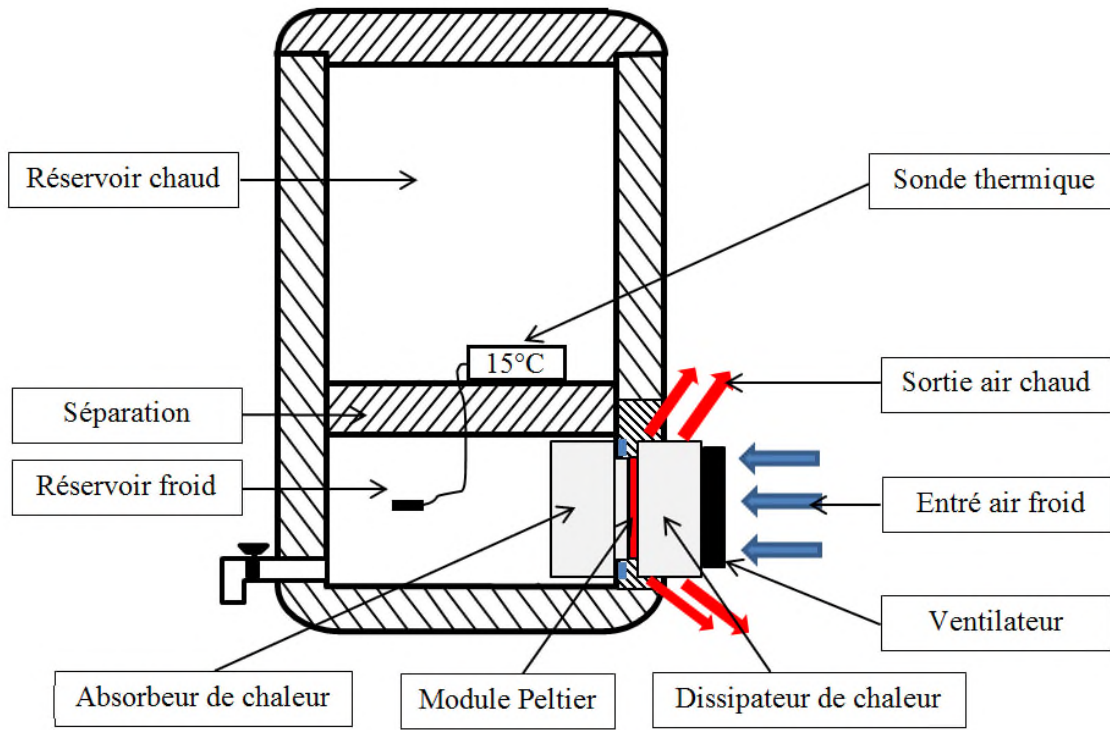


Figure IV.5 : Absorbeur installé dans l’enceinte

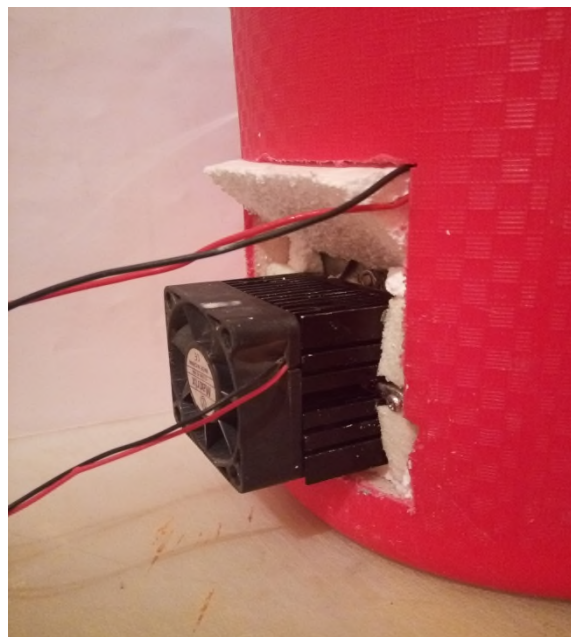
L’étape suivante est de poser le module Peltier sur la face apparente de l’absorbeur et sur l’autre face du module on pose le dissipateur de chaleur, tous le système doit être bien fixé pour

assurer un bon contact, et pour diminuer la résistance thermique entre les surfaces en ajoutant de la pâte thermique entre les surfaces de contact.

Enfin, on monte le ventilateur qui a pour rôle de dissiper rapidement la chaleur dégagée par le module. La figure suivante schématise le montage du système.



**Figure IV.6 :** Schéma de montage de la fontaine fraîche.



**Figure IV.7 :** Montage de la pompe à chaleur.

#### IV.4.5. Mise à l'épreuve du prototype :

Pour valider le bon fonctionnement de l'appareil nous procédons à des tests pour comparer les données théoriques avec les résultats expérimentaux et exploiter ces résultats pour ajuster le prototype avec le cahier de charge du projet.

##### IV.4.5.1. Protocole de l'essai :

- On remplit le réservoir froid avec 1 litre d'eau à température moyenne.
- La mise en tension du système en 12V (module + ventilateur).
- Enregistrement vidéo de la température de l'eau dans la fontaine fraîche (une sonde thermique est installée dans le réservoir) ainsi que la température ambiante.
- Le test sera fait avec deux différentes températures ambiantes.
- Les résultats seront enregistrés dans un tableau et présentés par un graphique.

##### IV.4.5.2. Résultats :

**Tableau IV.3 :** Teste de la fontaine à 20°C

Température ambiante égale 20°C

T : température du réservoir froid

t : temps de refroidissement

T réservoir froid	temps (H:M:S)	totale seconde	$\Delta T$
26	00:00:00	0	0
25	00:05:33	333	1
24	00:05:13	673	2
23	00:17:08	1028	3
22	00:23:25	1405	4
21	00:29:57	1797	5
20	00:36:51	2211	6
19	00:43:59	2639	7
18	00:51:30	3090	8
17	00:59:31	3571	9
16	01:07:53	4073	10
15	01:17:00	4620	11
14	01:26:22	5182	12
13	01:36:42	5802	13
12	01:47:32	6452	14
11	01:58:46	7126	15
10	02:12:39	7959	16
9	02:27:33	8853	17
8	02:44:03	9843	18
7	03:04:45	11085	19
6	03:21:59	12119	20

**Tableau IV.4 :** Teste de la fontaine a 27.6°C

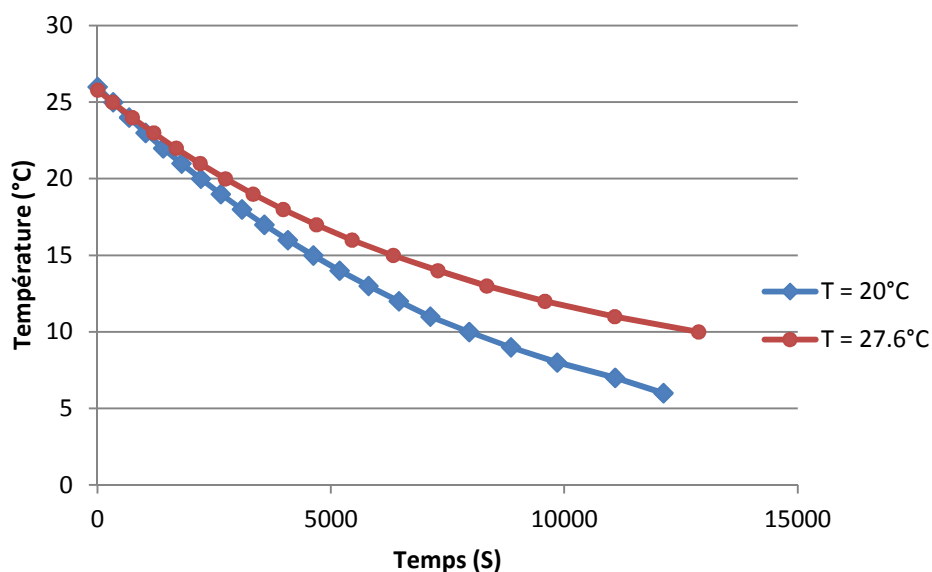
Température ambiante égale **27.6°C**

T : température du réservoir froid

t : temps de refroidissement

T réservoir froid	temps (H:M:S)	totale seconde	$\Delta T$
26	00:00:00	0	0
25	00:05:19	319	1
24	00:12:21	741	2
23	00:20:01	1201	3
22	00:28:03	1683	4
21	00:36:35	2195	5
20	00:45:36	2736	6
19	00:55:29	3329	7
18	01:06:14	3974	8
17	01:18:06	4686	9
16	01:30:49	5449	10
15	01:45:32	6332	11
14	02:01:28	7288	12
13	02:18:54	8334	13
12	02:39:40	9580	14
11	03:04:36	11076	15
10	03:34:32	12872	16

**IV.4.5.3. Graphe température en fonction du temps :**



**Figure IV.8 :** T = f(t)

#### IV.4.5.4. Interprétation des résultats :

Puisque le système est adiabatique (dans le cas idéal), qui contient 1 litre d'eau est refroidi par un flux thermique constant négatif sur une surface déterminé (voir figure IV.4), le refroidissement de l'eau peut suivre la loi de refroidissement de Newton (énoncée : le taux de perte de chaleur d'un corps est proportionnel à la différence de température entre le corps et le milieu) ici le corps est l'eau et le milieu est l'absorbeur de chaleur.

Donc d'après cette loi le graphe de la température en fonction du temps prend l'allure d'une décroissance exponentielle, cela justifie l'allure des courbes obtenues (Figure IV.8).

Le taux de décroissance de la courbe est fonction de la température ambiante plus elle est grande plus le taux de décroissance est petit puisque il influe directement sur le flux thermique du module, cela justifie le décalage entre les deux courbes.

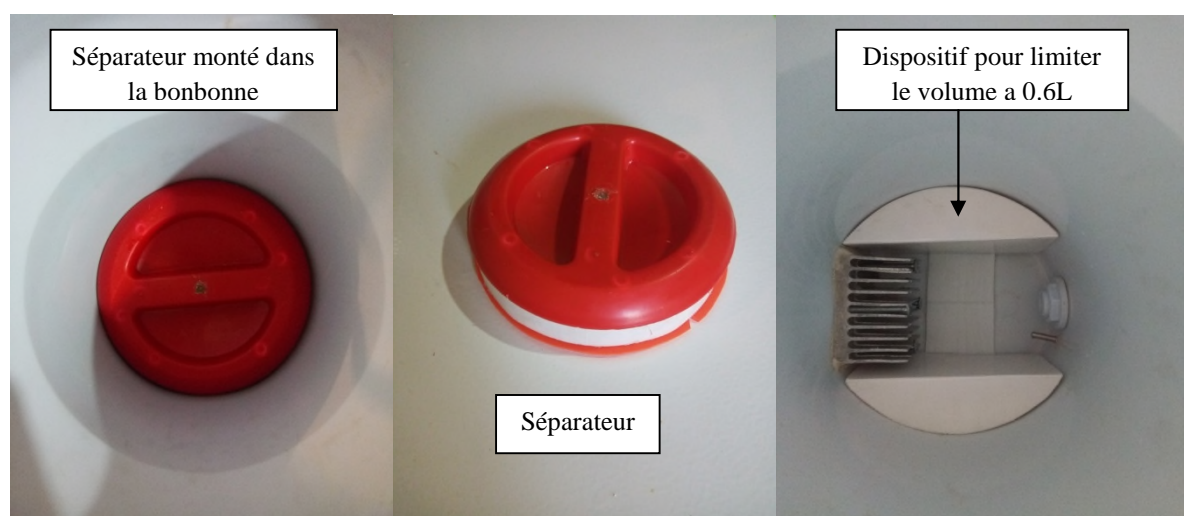
En plus il y a les pertes déjà citées dans la partie (IV.4.1) et la diffusion de la chaleur dans l'eau qui rend le temps de refroidir 1 litre d'eau plus long que celui estimé théoriquement.

#### IV.5. Installation des accessoires :

##### IV.5.1. Séparateur :

Les résultats obtenus dans la partie précédente qui est un refroidissement de moins 10°C dans un temps moyen d'une heure et demi est long si on estime que l'individu cherche à boire d'eau frais chaque une heure. Par contre pour d'autre individu ce temps peut aller jusqu'à deux heures ou plus selon plusieurs critères (température ambiante, activité de l'individu, physiologie de la personne,.....).

Pour cela le choix du volume du réservoir froid est très difficile. la solution possible à ce problème est d'avoir un volume variable allant d'un demi litre jusqu'à volume totale de la bonbonne (dans le cas où on veut conserver la température d'une eau déjà froid).



**Figure IV.9 :** Système de séparation et ajustement de volume des réservoirs.



La figure précédente montre le dispositif de séparation entre les deux réservoirs, ce séparateur joue le rôle d'un isolant thermique et on change sa position dans la bonbonne on va changer le volume des deux réservoirs, et puisque le séparateur dans sa position base nous donne un volume d'un litre on ajoute un volume en plastique (photo à droite) qui peut être démontable, ce qui limitera le volume a 0.6 litre

### IV.5.2 Affichage de la température :

Chaque individu aime boire de l'eau froide à une température bien précise et pour permettre à l'utilisateur de savoir la température de l'eau on installe une sonde thermique avec afficheur digitale comme illustré sur la photo suivante, de cette manière l'utilisateur peut ajuster le volume idéal pour son utilisation.

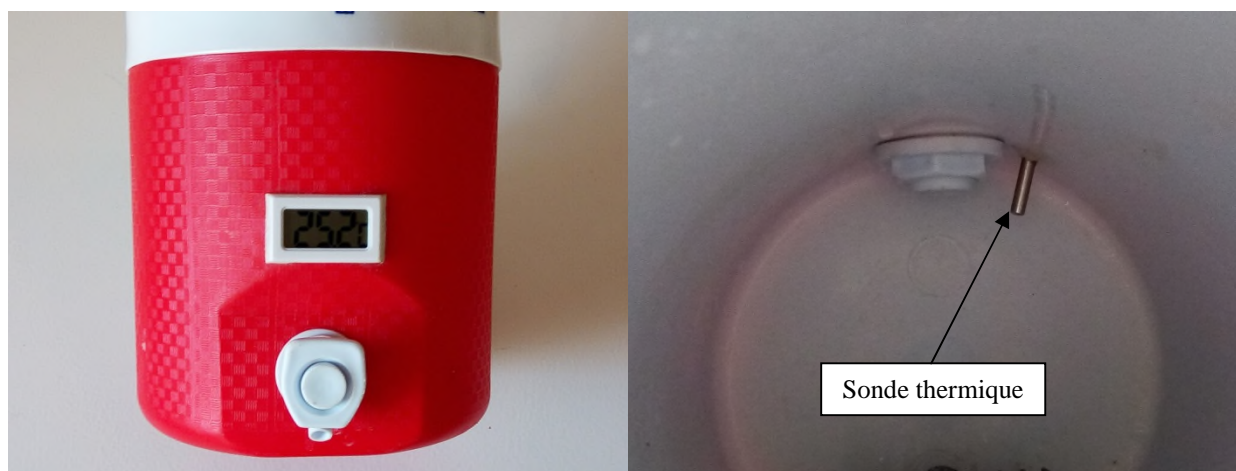


Figure IV.10 : Système de mesure de la température.

### IV.5.3 Branchement électrique :

Le branchement électrique du système est simple (voir schéma suivante), le module et le ventilateur sont alimentés en 12V 30W et on peut l'alimenter de 15V 45W dans le cas où on alimente l'appareil avec un chargeur 12-15V et pour un panneau solaire la variation de la puissance du panneau n'influe pas électriquement sur l'appareil.

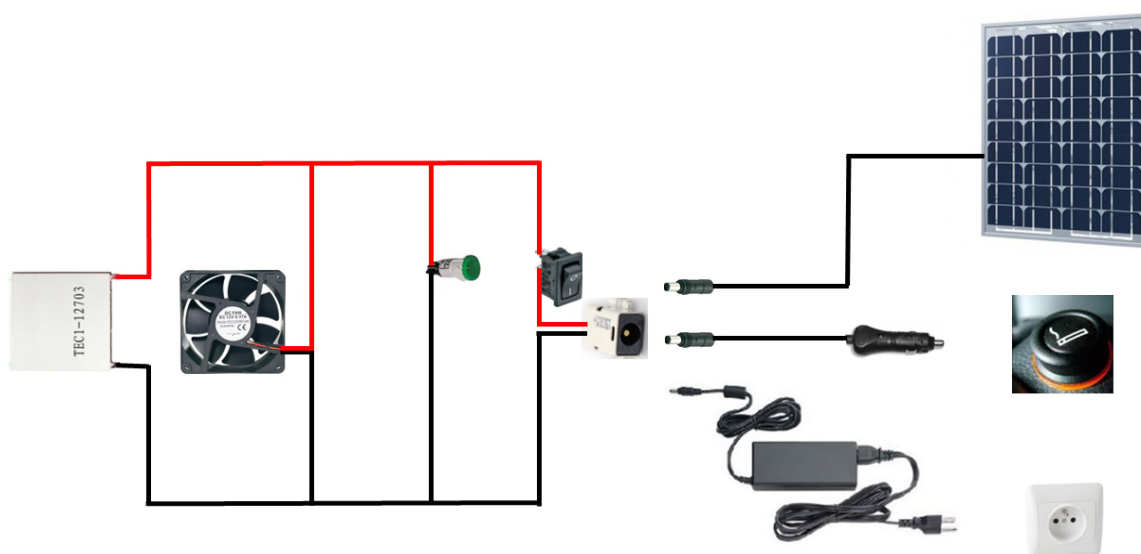


Figure IV.11 : Schéma électrique et source d'alimentation.

#### IV.5.4. montage finale :

Après avoir fait le branchement électrique et le teste du système électrique, on monte le couvercle déjà confectionné qui a pour rôle de protéger les pièces interne de l'appareil et donner un aspect esthétique a la fontaine fraiche comme présenté sur figure suivante.



Figure IV.12 : Photo de la fontaine fraiche terminée

#### IV.6.Conclusion :

Dans ce chapitre on a pu avoir fait la conception et la réalisation d'une fontaine fraiche qui fonction avec un module Peltier de faible puissance à l'aide des données récolter des expériences faites au chapitre III.

Un cahier des charges a été dressé sur des critères visant l'efficacité et la mobilité de l'appareil ainsi le confort de l'utilisateur, ces conditions étaient tous rempli sauf dans le cas où la température ambiante dépasse les 30°C le temps de refroidissement de l'eau sera plus longue mais ça n'empêche pas de l'utiliser.

L'ajustement du volume d'eau à refroidir selon le besoin de l'utilisateur est un avantage, en plus dans le cas où on utilise le volume totale (plus de trois litre) l'appareil peut conserver la température d'un liquide (eau, lait, jus.....) met froid, même le refroidir légèrement.

Parmi les problèmes rencontrés pendant la réalisation de la fontaine fraiche sont l'étanchéité au niveau de la fixation de l'absorbeur de chaleur et le bruit du ventilateur ainsi le manque du matériel de travail (colle spéciale non toxique, outil de confection,.....).

# **CONCLUSION GENERALE**

---

## Conclusion générale

Les travaux décrits dans le présent mémoire ont trait à l'étude de la thermoélectricité afin d'aboutir à la conception et la réalisation d'une application pratique utile dans la vie courante de l'individu. Ainsi, après avoir donné, dans un premier chapitre, un état de l'art de la thermoélectricité, passant également en revue les propriétés physiques et chimiques des matériaux thermoélectriques et les applications thermoélectriques actuelles, on s'est intéressé à réaliser des expériences sur le module thermoélectrique pour exploiter ces données expérimentales à la réalisation d'une fontaine fraîche thermoélectrique.

Nos expériences sont basées sur l'étude de la thermoélectricité, ainsi que les effets thermoélectriques tels que l'effet Seebeck, l'effet Peltier. On s'est intéressée principalement à l'optimisation de plusieurs paramètres, dont la tension d'alimentation du module Peltier afin d'avoir un bon rendement du système à effet Peltier, en plus le choix d'une meilleure manière de transférer de la chaleur des deux faces du module.

Un bon matériau thermoélectrique doit posséder aussi un bon coefficient Seebeck ou Peltier, une bonne conductivité électrique afin d'éviter les pertes par effet Joule et une faible conductivité thermique pour garder une différence de température appréciable aux bornes du matériau.

Les expériences faites sur le module thermoélectrique nous ont permis de conclure que :

- Le temps de réaction du module est rapide.
- La nécessité d'avoir un système de dégagement de chaleur de la face chaude.
- Fragile mécaniquement et électriquement.
- Très efficace dans des petites applications par rapport à une pompe à chaleur classique.
- Rendement faible donc il n'est pas fiable pour des grandes applications devant une pompe à chaleur classique.
- Refroidissement précis et dirigé vers un point en particulier.

Les problèmes rencontrés pendant les expériences :

- Le contrôle de la température ambiante.
- Manque d'un banc d'essai spécial pour le module thermoélectrique.
- La précision des sondes thermiques et leurs faibles temps de réponse.
- Disponibilité de deux modules Peltier seulement.

Les problèmes rencontrés pendant la réalisation de la fontaine :

- Manque d'outillages spéciaux pour la réalisation de certaines pièces.
- Manque d'une colle efficace et non toxique.
- Les délais de réalisation du projet et très courts.

La fontaine fraîche réalisée fonctionnait bien malgré qu'il demande plus d'expérience dans plusieurs environnements et températures pour détecter les problèmes qui peuvent surgir et étudier une solution possible pour arriver à la fin à un produit qui peut être commercialisé.

## ملخص

تجدد الاهتمام بالكهرباء الحرارية في بداية 1990 على الرغم من اكتشافه قبل قرنين من الزمان ويرجع ذلك على وجه الخصوص إلى ظهور مخاوف بيئية حول الغاز المستخدم في التبريد و انبعاث غازات الدفيئة وكذلك الالتزام بتطوير مصادر الطاقة البديلة.

الهدف من عملنا هو دراسة تجريبية لمضخة حرارية كهروحرارية لنخلص الى انجاز نافورة باردة محمولة كهروحرارية تعمل بطاقة منخفضة من بين مصادر تغذيتها طاقة متجددة. وذلك بعد أن قدمنا المفاهيم الأساسية للكهرباء الحرارية و باستعراض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الحرارية والتطبيقات الحرارية الحالية،

كلمات البحث : الكهرباء الحرارية ، غازات الدفيئة ، المضخة الحرارية.

---

## Abstract

A renewed interest in thermoelectricity emerged in the early 1990s despite its discovery two centuries ago, due in particular to the emergence of environmental concerns about gases used in refrigeration and greenhouse gas emissions, as well as the desire to develop alternative sources of energy.

The objective of our work is the experimental study of a thermoelectric heat pump to lead to the realization of a cool portable thermoelectric fountain of low power among his power source is renewable. Thus, after presenting the basic notions of thermoelectricity, also reviewing the physical and chemical properties of thermoelectric materials and current thermoelectric applications,

Key words: thermoelectricity, greenhouse gas effect, heat pump.

---

## Résumé

Un regain d'intérêt à la thermoélectricité est apparu au début des années 1990 malgré sa découverte deux siècles passés, dû en particulier à l'émergence des préoccupations environnementales concernant les gaz utilisés en réfrigération et les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la volonté de développer des sources d'énergies alternatives.

L'objectif de notre travail est l'étude expérimentale d'une pompe à chaleur thermoélectrique pour aboutir à la réalisation d'une fontaine fraîche portable thermoélectrique de faible puissance parmi ses source d'alimentation est renouvelable. Ainsi, après avoir présenté les notions de base de la thermoélectricité, passant également en revue les propriétés physiques et chimiques des matériaux thermoélectriques et les applications thermoélectriques actuelles.

Mots clés: thermoélectricité, gaz à effet de serre, pompe à chaleur.