

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifiques



Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen –
Faculté des Sciences
Département De Physique



Unité de Recherche Matériaux et Énergies Renouvelables
- URMER -

Mémoire présenté par
M^{elle} **SIFI IBTISSEM**

En vue de l'obtention du diplôme de

Master de physique

Spécialité : Physique Énergétique et Matériaux

Thème :

*Étude et Modélisation d'un Générateur
Thermoélectrique*

Soutenue publiquement le 01 Juillet 2013 devant le jury composé de :

M ^r	N.E.CHABANE-SARI	Président	Professeur- Université -Tlemcen
M ^{me}	N.GHELLAI	Encadreur	Professeur- Université -Tlemcen
M ^r	A.BENMANSOUR	Examineur	Professeur- Université -Tlemcen
M ^{me}	K.RAHMOUN	Examinatrice	Professeur- Université -Tlemcen

DEDICACE

Je dédie se travail à

Mes très chers parents pour leur sacrifice, amour, tendresse et

encouragement.

Mon cher frère : Amine.

Toute ma famille

*Mes meilleurs amis : Amel. HAMHAMI, Asma. BENCHERKI, Fatima.
MEHDI*

Melle IBTISSEM- SIFI

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué à l'Unité de Recherche Matériaux et Énergies Renouvelables (URMER), Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.

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 mon encadreur **M^{me} N.GHELLAI** Professeur au département de Physique, Faculté des Sciences à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen-, 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.*

*Mes remerciements pour **Mr A.CHIALI** qui nous a accordé de son temps et qui a contribué par ses précieux conseils et encouragements.*

Mon encadreur et moi, tenons à remercier

*En premier lieu, **M^r N.E.CHABANE-SARI** Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen pour avoir accepté de présider le jury.*

***M^r A.BENMANSOUR** Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen-, tout en lui exprimant notre profond respect pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Que **M^{me} K.RAHMOUN** Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen-, trouve ici notre reconnaissance pour nous avoir enseigné cette année et pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nous tenons à remercier profondément tous les enseignants du département de physique 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

Liste des Symboles

Numéro	Variabl e	Unité en SI (Système International)	Description
1	C_max	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité thermique maximal</i>
2	C_min	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité thermique minimale</i>
3	Cth	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité du circuit thermique</i>
4	Ce	Joule/ Volt (j/V)	<i>Capacité du circuit électrique</i>
5	C _v	Joule / Degré Kelvin (j/°K)	<i>Capacité du circuit thermique</i>
6	dQ _s	Watt /Mètre ² W.m ⁻²	<i>Quantité de chaleur émise ou absorbée</i>
7	dQ _v	Watt /Mètre ³ W.m ⁻³	<i>Quantité de chaleur émise ou absorbée par unité de volume</i>
8	E	Volt /Mètre V/m	<i>Champ électrique</i>
9	K	Watt/ Mètre Degré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique</i>
10	I	Ampère (A)	<i>Courant dans le sous-circuit électrique</i>
11	I _{PV}	Ampère (A)	<i>Courant photovoltaïque</i>
12	I _{TE}	Ampère (A)	<i>Courant thermoélectrique</i>
13	I _{PVTE}	Ampère (A)	<i>Courant photovoltaïque – thermoélectrique</i>
14	I _n	Ampère (A)	<i>Courant dû à la branche de type n</i>
15	I _p	Ampère (A)	<i>Courant dû à la branche de type p</i>
16	\vec{j}	Ampère /Mètre ² A.m ⁻²	<i>Flux de charge densité surfacique de courant</i>
17	K	Watt/mètre Degré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique</i>
18	N	1 (sans dimension)	<i>Nombre d'éléments</i>
19	N _b	1 (sans dimension)	<i>Nombre d'éléments</i>
20	N_max	1 (sans dimension)	<i>Nombre d'élément maximal</i>
21	N_min	1 (sans dimension)	<i>Nombre d'élément minimal</i>

22	P	Watt (W)	<i>L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique</i>
23	P _{PV}	Watt (W)	<i>Puissance photovoltaïque</i>
24	P _{TE}	Watt (W)	<i>Puissance thermoélectrique</i>
25	P _{PVTE}	Watt (W)	<i>Puissance photovoltaïque - thermoélectrique</i>
26	Q	Watt (W)	<i>L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique</i>
27	q ₀	Watt (W)	<i>Flux de chaleur</i>
28	Q _{CJ}	Watt (W)	<i>Part d'effet Joule retournant à la source chaude</i>
29	Q _c	Watt (W)	<i>Puissance thermique absorbée du côté chaud</i>
30	Q _{in}	Watt (W)	<i>Flux de chaleur d'entrée dans le sous-circuit thermique</i>
31	Q _I	Watt (W)	<i>Part d'effet Joule dans les branches</i>
32	Q _Π	Watt (W)	<i>Chaleur de Peltier absorbée à la jonction chaude</i>
33	Q _τ	Watt (W)	<i>Chaleur de Thomson libérée dans les branches</i>
34	r	Ohm (Ω)	<i>Résistance électrique des branches</i>
35	R	Ohm (Ω)	<i>Résistance électrique</i>
36	Re	Ohm (Ω)	<i>Résistance électrique</i>
37	R _{max}	Mètre ² . Degré Kelvin/Watt (m ² .°K/W)	<i>Résistance thermique maximal</i>
38	R _{min}	Mètre ² . Degré Kelvin/Watt (m ² .°K/W)	<i>Résistance thermique minimal</i>
39	R _{th}	Mètre ² . Degré Kelvin/Watt (m ² .°K/W)	<i>Résistance thermique</i>
40	S	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck</i>
41	S _n	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck de la branche n</i>
42	S _p	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck de la branche p</i>
43	t	Seconde (s)	<i>Temps</i>
44	T	Degré Kelvin (°K)	<i>Température</i>
45	Temps_Simulation	Seconde (s)	<i>Temps de la simulation</i>
46	T _a	Degré Kelvin (°K)	<i>Température ambiante</i>

47	T_B	Degré Kelvin (°K)	<i>Température au point B</i>
48	T_C	Degré Kelvin (°K)	<i>Température au point C</i>
49	T_c	Degré Kelvin (°K)	<i>Température côté chaud</i>
50	T_f	Degré Kelvin (°K)	<i>Température côté froid</i>
51	U	Volt (V)	<i>Tension</i>
52	\vec{u}_{AB}	1 (sans dimension)	<i>Vecteur unitaire</i>
53	V	Mètre/Seconde (m/s)	<i>Vitesse du refroidissement</i>
54	V_g	Volt (V)	<i>Tension créée par le générateur</i>
55	W	Volt V	<i>Tension</i>
56	x	Mètre (m)	<i>Longueur</i>
57	x_g	Mètre (m)	<i>Longueur du module thermoélectrique</i>
58	ZT	1 (sans dimension)	<i>Facteur de mérite</i>
59	Z	1/Degré Kelvin °K ⁻¹	<i>Facteur de mérite à température donnée</i>
60	α	Volt/Degré Kelvin (V/°K)	<i>Coefficient de Seebeck</i>
61	β	Degré /Kelvin (V.°K ⁻¹)	<i>Coefficient de Thomson</i>
62	ϵ	Farad/Mètre (Fm ⁻¹)	<i>Permittivité du diélectrique</i>
63	σ	1/ (Ohm.Mètre) (Ω ⁻¹ .m ⁻¹)	<i>Conductivité électrique</i>
64	ρ	Ohm.Mètre (Ω.m)	<i>Résistivité électrique</i>
65	Π	Volt (V)	<i>Coefficient de Peltier</i>
66	ϵ	Farad/Mètre (Fm ⁻¹)	<i>Permittivité diélectrique</i>
67	λ	Watt/ Mètre Degré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique</i>
68	λ_p	Watt/ Mètre Degré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique des phonons</i>
69	λ_e	Watt/ Mètre Degré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique des électrons</i>
70	λ_n	Watt/ Mètre Degré Kelvin W/m.°K	<i>Conductivité thermique de côté n</i>
71	λ_p	Watt/ Mètre Degré Kelvin (W/m.°K)	<i>Conductivité thermique de côté p</i>
72	Φ	%	<i>Rendement de la thermoréfrigération</i>

73	η	%	Rendement de la thermogénération
74	η_{TE}	%	Puissance thermoélectrique
75	η_{PV}	%	Rendement photovoltaïque
76	η_{PVTE}	%	Rendement photovoltaïque - thermoélectrique
77	η_r	%	Rendement d'un générateur

✓ ∂ : dérivée partielle

✓ ∇ : nabla = $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$

✓ Δ : le laplacien = $d\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Introduction générale.....1

Chapitre I : État de l'art de la thermoélectricité

Introduction..... 4

1.1. Historique des matériaux thermoélectriques 4

1.2. Technologies actuelles 5

 1.2.1. Dispositifs à base de Bi_2Te_3 5

 1.2.1.1. Dispositifs à base de Bi_2Te_3 massif 5

 1.2.1.2. Dispositifs à base des couches minces de Bi_2Te_3 6

 ❖ *Modules Micropelt*..... 6

 ❖ *Modules JPL*..... 8

 1.2.1.3. Dispositifs à base de μ -poudre de Bi_2Te_3 8

 1.2.2. Dispositifs à base des couches minces de Bi et Sb..... 9

 1.2.3. Dispositifs à base des couches minces de Si et SiGe (Silicium-Germanium) 9

1.3. Technologies de conversion thermique..... 10

 1.3.1. Génération de puissance 10

 1.3.2. Refroidissement 11

Bibliographie..... 13

Chapitre II : Matériaux thermoélectriques

2.1. Introduction 17

2.2. Propriétés physiques et chimiques 18

 2.2.1. Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques 20

 2.2.2. Effet Seebeck..... 24

 2.2.2.1. Définition..... 24

 2.2.2.2. Schéma de principe..... 24

 2.2.2.3. Explication du phénomène 25

 2.2.3. Effet Peltier 25

 2.2.3.1. Définition..... 25

 2.2.3.2. Schéma de principe..... 26

 2.2.3.3. Explication du phénomène 26

 2.2.4. Effet Thompson..... 27

 2.2.4.1. Définition..... 27

 2.2.4.2. Schéma de principe..... 27

2.2.4.3. Explication du phénomène	27
2.2.5. Rendement de la thermogénération et de la thermoréfrigération	28
2.3. Applications thermoélectriques actuelles.....	Erreur ! Signet non défini.
2.3.1. Générateur thermoélectrique	30
2.3.1.2. Exemple de la génération d'électricité	30
• Générateurs thermoélectriques à radio-isotope : GTR	30
2.3.2. Refroidisseur thermoélectrique.....	31
2.3.2.1. Exemple de la réfrigération	32
• Module hybride thermoélectrique-photovoltaïque.....	32
• Explication du phénomène	33
Bibliographie	35

Chapitre III : Générateur thermoélectrique

3.1. Introduction	39
3.2. Générateur thermoélectrique	39
3.2.1. Architecture du générateur	39
3.2.1.1. Géométrie perpendiculaire	39
3.2.1.2. Géométrie planaire	40
3.2.2. Les modes de fonctionnement	41
3.2.3. Rendement d'un générateur	43
3.2.3.1. Bilan énergétique	43
3.2.3.2. Expression du rendement	44
3.3. Modélisation et dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique	45
3.3.1. Présentation de la méthode : « Le modèle des éléments finis ».....	45
3.3.1.1. Explication du phénomène Étude thermique	46
❖ Les conditions aux limites thermiques :	46
❖ Équations de la chaleur sur les sous-domaines I et III	47
3.3.1.2. Étude thermoélectrique avec le modèle des éléments finis	50
❖ Circuit équivalent thermique-thermoélectrique	50
❖ Équations thermoélectriques à modéliser par Matlab et conditions aux limites..	52
▪ Programme principale : thermoelectric1.m:	53
▪ Sous-programme N°1: tension.m	59
▪ Sous-programme N°2: Sfun.m	60

3.3.2. Simulation de notre générateur par le modèle des éléments finis par le Matlab.....	61
3.4. Interprétation des résultats de la simulation	62
3.4.1. L'énergie recueillie au borne de la résistance électrique en fonction du temps : $Q=f(t)$	62
3.4.2. La tension en fonction de la température: $V_g=f(T)$	63
3.4.3. Le facteur de mérite en fonction de la température: $ZT=f(T)$	63
3.4.4. Le rendement en fonction de la température: $\eta=f(T)$	64
3.4.5. L'énergie recueillie au borne de la résistance électrique en fonction de la température: $Q=f(T)$	65
3.4.6. L'énergie recueillie au borne de la résistance électrique en fonction de la vitesse de refroidissement: $Q=f(V)$	66
3.4.7. Le courant généré en fonction de la vitesse du refroidissement: $I=f(V)$	67
3.4.8. Le courant généré en fonction de la température: $I=f(T)$	68
3.5. Conclusions	69
Bibliographie.....	70
Conclusion générale.....	72

Liste des figures et des tableaux

Chapitre I : État de l'art de la thermoélectricité

Figure I- 1: Photo d'un convertisseur thermoélectrique à base de Bi_2Te_3 massif 6

Figure I- 2: Miniaturisation du Micropelt par rapport à un Peltier massif commercial et son agrandissement 6

Figure I- 3: Dispositifs Micropelt au stade de wafer après dépôt du matériau thermoélectrique sur les électrodes déposées préalablement 7

Figure I- 4: État de l'art des dispositifs Micropelt et évolution de la surface A des faces froides ; 7

Figure I- 5: Convertisseurs thermoélectriques réalisés à base de μ -poudre de Bi_2Te_3 8

Figure I- 6: Image MET représentant les lignes de Bi et Sb du module thermoélectrique 9

Figure I- 7: Image MEB montrant le module thermoélectrique réalisé à partir de plots en poly-Si 10

Figure I- 8: Radio alimentée par module thermoélectrique utilisant la chaleur d'une lampe à pétrole (a), four à bois avec un module thermoélectrique intégré pour la production d'électricité (Philips Research) (b)..... 10

Figure I- 9: Montre Seiko Thermic utilisant la différence entre la température ambiante et celle du corps humain 11

Figure I- 10: (a) réfrigérateur portable, (b) siège automobile 12

Figure I- 11: diode laser 12

Chapitre II : Matériaux thermoélectriques

Figure II- 1: Conductivité électrique σ , coefficient Seebeck S, conductivité thermique λ et le facteur de puissance $S^2\sigma$ en fonction de la concentration des porteurs de charge 21

Figure II- 2 : Évolution de ZT en fonction de la température pour les matériaux conventionnels de type n et type p 23

Figure II- 3: Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck..... 24

Figure II- 4: Illustration de l'effet Seebeck 24

Figure II- 5: Illustration de l'effet Peltier 26

Figure II- 6: Illustration de l'effet Thomson..... 27

Figure II- 7: (a) Schéma de principe d'une branche thermoélectrique, (b) d'un thermocouple, (c) et d'un module thermoélectrique..... 30

Figure II- 8: Sonde spatiale Pioneer 10 alimentée par un générateur thermoélectrique à radio-isotope SNAP-19 et le schéma de principe du générateur.....	31
Figure II- 9: (a) Schéma de principe d'un thermocouple thermoélectrique, (b) module thermoélectrique, et (c) convertisseurs complets composés des plusieurs modules.....	32
Figure II- 10: schéma d'un module hybride photovoltaïque-thermoélectrique	33
Tableau II- 1: Valeurs des grandeurs thermoélectriques, à température ambiante pour : isolants, semiconducteurs et métaux.....	22

Chapitre III : Générateur thermoélectrique

Figure III- 1: Générateur thermoélectrique	40
Figure III- 2: Générateur thermoélectrique de Kim réalisé avec des couches	40
Figure III- 3: Générateur thermoélectrique de Takashiri et coll	41
Figure III- 4: Représentation d'un générateur thermoélectrique	41
Figure III- 5: Sous-domaines avec ses équations	45
Figure III- 6: Nœuds en sous-domaine I et III	48
Figure III- 7: Coté de A.....	48
Figure III- 8: La limite de B et C	50
Figure III- 9: Sous-domaines II avec ses équations	50
Figure III- 10: Élément de circuit électrique équivalent	52
Figure III- 11: Élément de circuit thermoélectrique équivalent	52
Figure III- 12 : L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction du temps : $Q=f(t)$	63
Figure III- 13 : La tension en fonction de la température: $V_g=f(T)$	63
Figure III- 14 : Le facteur de mérite en fonction de la température: $ZT=f(T)$	64
Figure III- 15: Le rendement en fonction de la température: $\eta =f(T)$	65
Figure III- 16 : L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la température: $Q=f(T)$	66
Figure III- 17 : L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la vitesse de refroidissement: $Q=f(V)$	67

Sommaire

Figure III- 18 : Le courant généré en fonction de la vitesse du refroidissement: $I=f(V)$	68
Figure III- 19 : Le courant généré en fonction de la température: $I=f(T)$	69
Tableau III- 1: Paramètres : d'entrés, paramètres calculé et puis tracé par Matlab.....	61

Introduction

Générale

Introduction Générale

La production d'énergie est assurée essentiellement par les combustibles fossiles (pétrole, gaz) qui semblaient inépuisable et qui ont jusque-là étanché la soif inextinguible d'énergie. Toutefois, ces combustibles sont en voie d'épuisement, comme en témoigne la flambée des prix du pétrole. La consommation de l'énergie va augmenter de façon considérable d'ici 2050. Il est d'ores et déjà évident qu'une telle augmentation ne pourra se faire sur le modèle actuel, basé essentiellement sur ces énergies fossiles, dont l'utilisation conduit par ailleurs à des émissions massives de CO₂ responsables d'un changement climatique de grande ampleur.

Ainsi, le développement des nouvelles sources d'énergie non polluantes est retenu comme stratégie incontournable pour relever ces défis énergétiques et environnementaux, quels que soient les efforts que la communauté internationale pourra faire dans la maîtrise de la demande d'énergie.

En fait, les sources d'énergie renouvelable actuelles (solaire, éolienne et géothermique) ne fournissent qu'une petite fraction de l'électricité consommée, principalement à cause de leur coût relativement élevé, alors qu'existent des ressources abondantes, à faible coût et encore relativement peu exploitées sous forme de chaleur.

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.

La recherche de nouvelles sources d'énergies non polluantes est devenue un enjeu majeur pour nos sociétés. C'est pourquoi la production d'électricité à partir de chaleur perdue aux moyens des modules thermoélectriques (application de l'effet Seebeck) apparaît à ce jour comme une voie très prometteuse. Par ailleurs, des matériaux thermoélectriques peuvent être utilisés pour évacuer la chaleur par effet Peltier, notamment pour refroidir des composants de la microélectronique.

L'intérêt de la thermoélectricité est de fournir une conversion directe chaleur-électricité, sans appoint auxiliaire (mécanique, électrique, chimique...). Toutefois, le rendement actuel des dispositifs thermoélectriques, que ce soit en génération d'électricité ou en réfrigération, reste encore trop faible (inférieur à 10 %), ce qui

restreint pour l'instant leur utilisation à des applications où fiabilité et durabilité sont plus importantes que coût et rendement.

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.

Les progrès des transports ont augmenté considérablement. Aujourd'hui le consommateur est aussi un nomade qui veut emporter son confort avec lui, créant des nouveaux besoins en sources d'énergie électrique. Ces besoins sont actuellement satisfaits au prix de la pollution de notre environnement par les métaux lourds contenus dans les batteries.

La conversion thermoélectrique apporte une nouvelle voie à la demande croissante en source d'énergie électrique. La conversion thermoélectrique n'utilise pas de 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.

Bien que les performances des dispositifs thermoélectriques soient généralement faibles, ils sont irremplaçables pour certaines applications comme la production d'énergie électrique pour les sondes spatiales lointaines (utilisation de modules thermoélectriques). Dans la perspective d'applications à plus grande échelle, ils sont intéressants pour la climatisation ou la réfrigération.

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 Bi_2Te_3 solides et de ses dérivés. Mais ces matériaux ne sont à la fois ni biocompatibles (matériaux toxiques), ni intégrables à petite échelle.

D'où notre intérêt à la conversion thermoélectrique : 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 un aperçu du domaine de la thermoélectricité. Nous présentons en premier les propriétés physiques et chimiques ; le facteur de mérite qui définit l'efficacité d'un matériau ainsi que les trois effets thermoélectriques puis nous présentons les applications thermoélectriques actuelles.

Le troisième chapitre sera consacré au Générateur thermoélectrique. Nous présentons l'architecture d'un générateur thermoélectrique; les modes de fonctionnement et les différentes équations caractéristiques de ce dernier. A partir de ces différentes équations nous nous sommes intéressé à la modélisation et au dimensionnement du générateur thermoélectrique par Matlab et enfin l'interprétation des résultats de la simulation.

Le travail est terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1

État de L'art de la Thermoélectricité

Introduction

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).

Dans ce chapitre nous proposerons une présentation générale sur l'histoire des matériaux thermoélectriques ; les technologies actuelles ainsi que les technologies de conversion thermique.

1.1. Historique des matériaux thermoélectriques

Les matériaux thermoélectriques n'ont de bonnes propriétés thermoélectriques que sur des intervalles de température restreints [1]. Dans les années 1950, des travaux expérimentaux ont montré que des semi-conducteurs massifs à base de Tellure de Bismuth alliés avec des composés tels l'Antimoine, l'Étain ou encore le Plomb pouvait être d'intéressants matériaux thermoélectriques [2]. Des travaux ont fait émerger l'idée d'utiliser la thermoélectricité pour la récupération d'énergie et la réfrigération [3].

Les qualités d'un matériau thermoélectrique se mesurent par un nombre sans dimensions, appelé facteur de mérite (**ZT**). Cependant, du fait d'une absence des progrès dans ce domaine jusque dans les années 1970, il a été postulé qu'un facteur de mérite de 1 était une sorte de barrière d'efficacité thermoélectrique [4].

Au début des années 1990, l'espoir renaît avec les travaux théoriques de Hicks et Dresselhaus qui proposent d'utiliser des matériaux présentant des structures de basse dimensionnalité [5]. Selon leurs calculs, l'utilisation de Tellure de Bismuth (Bi_2Te_3) avec une structure de type multi-puits quantiques permettrait de multiplier par 13 le facteur de mérite du Bi_2Te_3 massif [6].

De même, un ZT spectaculaire de 14 est prédit pour des fils quantiques à base de Bi_2Te_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 Almettent en avant en 2001 des super-réseaux constitués de couches minces de Bi_2Te_3 et de Tellure d'Antimoine (Sb_2Te_3) présentant un ZT record de 2,4 à température ambiante [8].

En 2002 Harman et Al présentent des super-réseaux à boîtes quantiques à base de 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 800°K [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 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].

1.2. Technologies actuelles

On distingue trois technologies actuelles :

1.2.1. Dispositifs à base de Bi_2Te_3

Le tellure de bismuth (Bi_2Te_3) est le premier matériau intégré dans des composants thermoélectriques, notamment grâce à ses performances à température ambiante.

Ainsi, la majorité des dispositifs thermoélectriques développés à ce jour sont toujours à base de cet alliage, que l'on va trouver sous ses différents états : massif, couches minces et micropoudre [14].

1.2.1.1. Dispositifs à base de Bi_2Te_3 massif

Le développement des moyens d'abrasion et de découpe permet aujourd'hui d'obtenir des plots de Bi_2Te_3 de très petites dimensions. Ainsi, par exemple, la société « Thermix » commercialise des modules micro-refroidisseurs avec différentes caractéristiques.

Les dimensions des plots sont de 0,7 à 1 mm, d'épaisseur allant de 0,7 à 1,6 mm. Les dimensions du dispositif varient quant à elles de 1 à 16 mm, pour un nombre de jonctions variant de 4 à 128 (Voir Figure I- 1) [15].



Figure I- 1: Photo d'un convertisseur thermoélectrique à base de Bi_2Te_3 massif.

Les performances de ces convertisseurs permettent d'obtenir, **en mode refroidisseur**, une différence de 68°K pour un courant maximum de 0,4 à 1.8 A selon les dispositifs.

En mode générateur de puissance, ils permettent de fournir une puissance maximale allant jusqu'à 12 W pour une différence de température de 68°K [16].

1.2.1.2. Dispositifs à base des couches minces de Bi_2Te_3

L'explosion de la microélectronique à la fin du siècle dernier a permis une révolution du développement des matériaux, mais aussi de leur intégration dans des convertisseurs. Ainsi, le Bi_2Te_3 n'a pas échappé à cette évolution [17].

❖ **Modules Micropelt**

L'idée est d'élaborer les matériaux de type n sur un substrat silicium (wafer), et ceux du type p sur un deuxième substrat, différent du premier (Voir Figure I- 2).

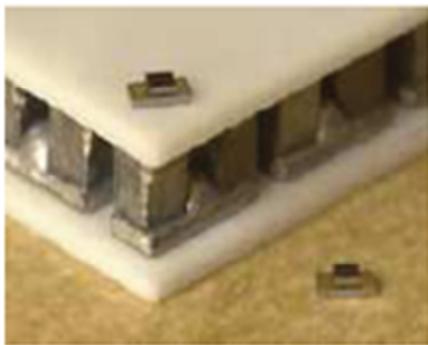


Figure I- 2: Miniaturisation du Micropelt par rapport à un Peltier massif commercial et son agrandissement.

La Figure I- 3 représente un wafer contenant le matériau d'un seul type, avant l'étape de découpe et d'assemblage [18].

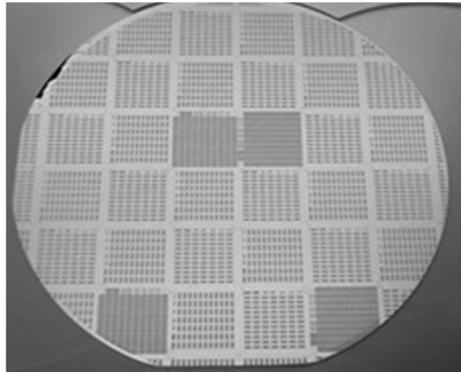


Figure I- 3: Dispositifs Micropelt au stade de wafer après dépôt du matériau thermoélectrique sur les électrodes déposées préalablement.

Les dimensions de ce dispositif sont les suivantes : $0,72 \text{ mm}^2$ pour la partie froide (partie supérieure) et $1,47 \cdot 0,72 \text{ mm}^2$ pour la partie chaude (partie inférieure), pour une épaisseur totale de $0,45 \text{ mm}$.

Par ailleurs, la Figure I- 4 présente les évolutions réalisées et à venir sur la géométrie et la forme de ces dispositifs.

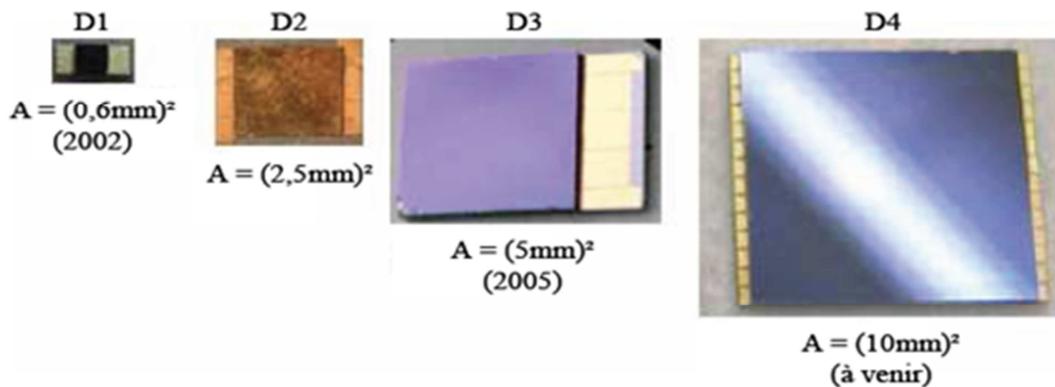


Figure I- 4: État de l'art des dispositifs Micropelt et évolution de la surface A des faces froides.

En mode refroidisseur (dispositif D1 de la Figure I- 4, 12 jonctions), une différence de température de 32°K peut être obtenue pour un courant de $1,8 \text{ A}$. La puissance de refroidissement est de 300 mW pour une différence de température de 20°K .

En mode générateur de puissance (dispositif D3 de la Figure I- 4, 450 couples), une tension d'environ 2 V est obtenue pour une différence de température de 20°K, ainsi qu'une puissance de 1,7 mW [19].

Le dispositif D4, avec 1800 jonctions, permet de récupérer une tension de 10 V sous un courant de 1 A, pour une différence de température de 30°K [20].

❖ *Modules JPL*

Par ailleurs, le JPL (Jet Propulsion Laboratory), a également développé un module thermoélectrique à base de $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ (dispositif D2). Le substrat utilisé est en verre ou en oxyde contenant 63 jonctions. Les dimensions du dispositif sont de 1,7 mm². Les motifs sont épais de 20 µm, et reliés entre eux électriquement par des connections métalliques [21].

Les performances de ce dispositif sont les suivantes : **en mode refroidisseur**, une différence de 2°K est obtenue pour un courant de 110 mA ; **en mode générateur de puissance**, une puissance de 1 µW est générée pour une différence de température de 1,25°K [22].

1.2.1.3. Dispositifs à base de µ-poudre de Bi_2Te_3

Une idée originale a été de réaliser des dispositifs en Bi_2Te_3 sous forme de µ-poudre dopée. Idée originale car très peu d'études ont été réalisées sur les poudres de Bi_2Te_3 , de plus aucun dispositif n'avait, jusqu'alors, été réalisé de cette façon [23].

Ces composants ont permis de prouver la faisabilité d'un tel convertisseur thermoélectrique à base de µ-poudre de Bi_2Te_3 (Voir Figure I- 5) [24].

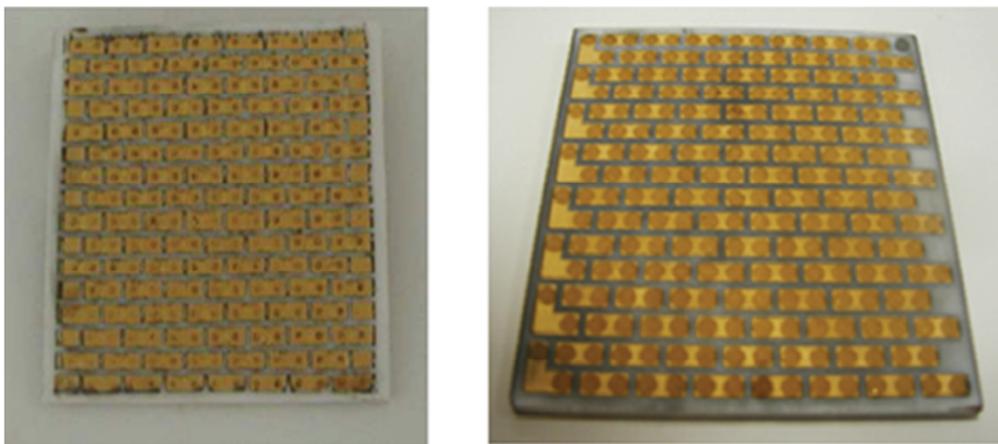


Figure I- 5: Convertisseurs thermoélectriques réalisés à base de µ-poudre de Bi_2Te_3 .

Les caractéristiques géométriques des dispositifs sont une base carrée de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ pour une épaisseur de 2 mm. Le diamètre varie de 1 à 1,8 mm selon les dispositifs [25].

1.2.2. Dispositifs à base des couches minces de Bi et Sb

Un seul prototype de convertisseur thermoélectrique a été réalisé jusqu'à présent à base des matériaux de bismuth et d'antimoine [26.27].

Les dimensions de ce dispositif sont de $16 \times 20 \times 0.05 \text{ mm}^3$. Les motifs de ces jonctions sont des lignes alternées de bismuth et d'antimoine, larges de $40 \text{ }\mu\text{m}$, longues de 20 mm, épaisses de $10 \text{ }\mu\text{m}$ et espacées de $40 \text{ }\mu\text{m}$. Les deux matériaux thermoélectriques sont obtenus par électrodéposition.

La Figure I- 6 ci-dessous montre une image MET (Microscopie Électronique à Transmission) du module [28]. Les performances de ces convertisseurs sont une tension de 250 mV générée pour une différence de température de 30°K [29].

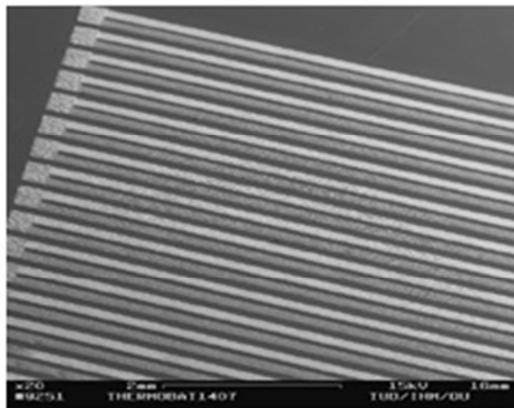


Figure I- 6: Image MET représentant les lignes de Bi et Sb du module thermoélectrique.

1.2.3. Dispositifs à base des couches minces de Si et SiGe (Silicium-Germanium)

Il est plus courant de trouver ces matériaux utilisés sous forme de nanostructures, déposés localement pour refroidir une surface [30]. Néanmoins, un module miniaturisé à base de poly-Si et poly-SiGe a été réalisé [31]. La taille du module est de 6 mm^2 .

La Figure I- 7 montre une image MEB (Microscopie Électronique à Balayage) des plots de poly-Si. Les connexions électriques sont assurées par des ponts en aluminium. Les performances obtenues sont un pouvoir thermoélectrique compris entre 100 et $200 \text{ mV} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$, une résistance de $10 \text{ M}\Omega$. Enfin, une puissance $0.6 \text{ }\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ pour une différence de température de 10°K a été obtenue [32].

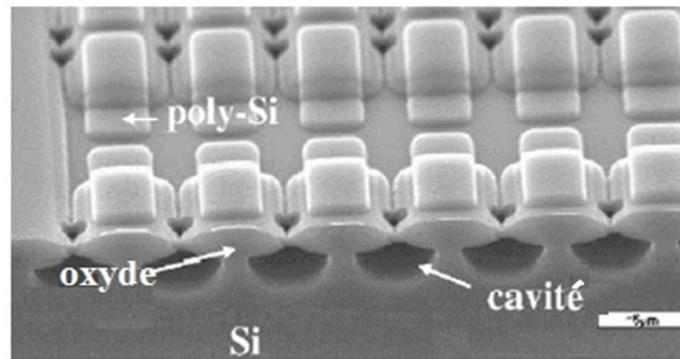


Figure I- 7: Image MEB montrant le module thermoélectrique réalisé à partir de plots en poly-Silicium.

1.3. Technologies de conversion thermique

Les applications thermoélectriques sont dédiées à la génération de puissance électrique ou à la réfrigération et cette conversion est réalisée à l'aide des convertisseurs thermoélectriques [33].

1.3.1. Génération de puissance

On peut citer en exemple les radios alimentées par des modules thermoélectriques chauffées par une lampe à pétrole pour les régions lointaines de Sibérie (années 50) [34], ou bien les fours à bois qui peuvent produire quelques dizaines de watts d'électricité grâce à un module thermoélectrique intégré (Figure I- 8). Ce type d'applications est donc spécifique aux zones isolées ou lointaines où il n'y a pas des réseaux électriques [35].

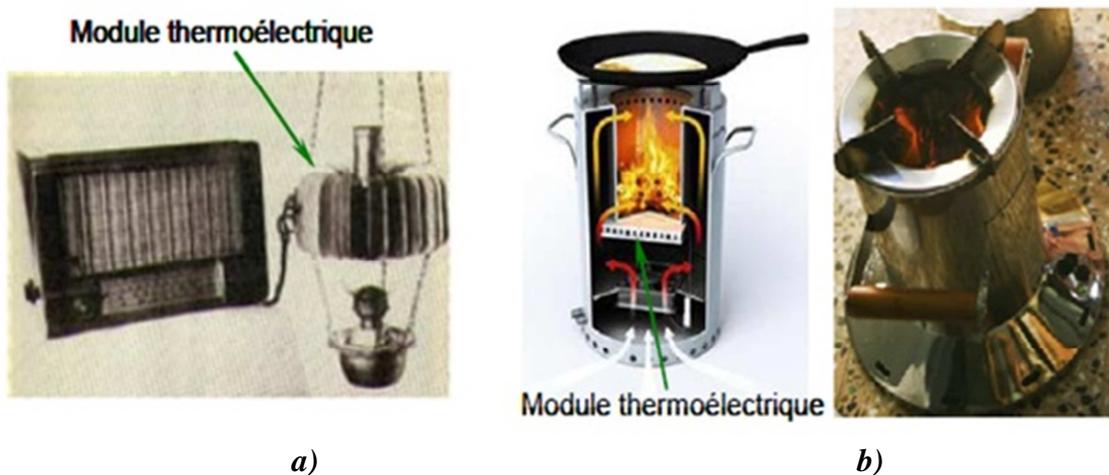


Figure I- 8: Radio alimentée par module thermoélectrique utilisant la chaleur d'une lampe à pétrole (a), four à bois avec un module thermoélectrique intégré pour la production d'électricité (Philips Research) (b).

En ce qui concerne les sources de basse puissance, on peut donner comme exemple les montres commercialisées par Seiko (1998, Japon) (Figure I- 9) qui utilisent la différence de température de quelques degrés entre la température ambiante et celle du corps humain pour générer une puissance de $\sim 22 \mu\text{W}$ (à une tension $\sim 0,3 \text{ V}$), suffisante pour motoriser une montre [36].

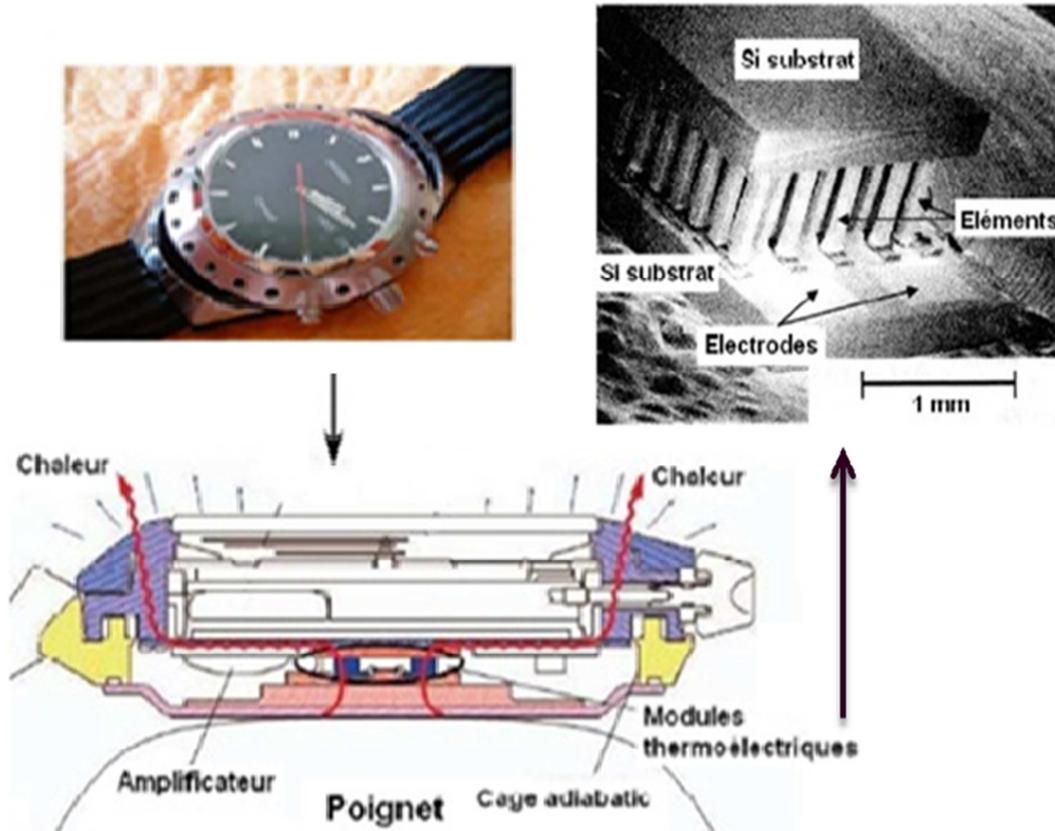


Figure I- 9: Montre Seiko Thermic utilisant la différence entre la température ambiante et celle du corps humain.

1.3.2. Refroidissement

Par rapport aux techniques conventionnelles, le refroidissement par effet thermoélectrique confère le même avantage que celui des générateurs, c'est-à-dire celui de ne pas utiliser de liquide ou de gaz réfrigérant, d'où l'intérêt écologique des applications [35].

Grâce à leur compacité, les réfrigérateurs peuvent être utilisés pour le refroidissement local, en intégrant le refroidisseur près du composant à refroidir. Cela conduit à l'augmentation des performances dynamiques du système de refroidissement [37.38].

Actuellement, plusieurs types des dispositifs à base des modules thermoélectriques sont commercialisés pour différentes domaines d'applications : domestique (réfrigérateurs portables, Figure I- 10a), automobile (sièges localement refroidis, Figure I- 10b), électronique (refroidissement actif et local des microprocesseurs) ou optoélectronique (diodes laser (Figure I- 11)) [39.40].

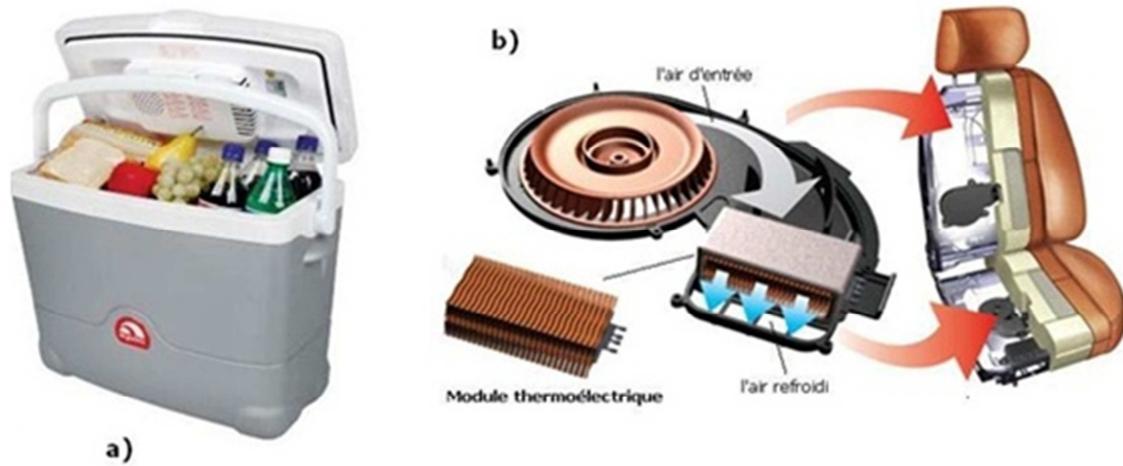


Figure I- 10: (a) réfrigérateur portable, (b) siège automobile.

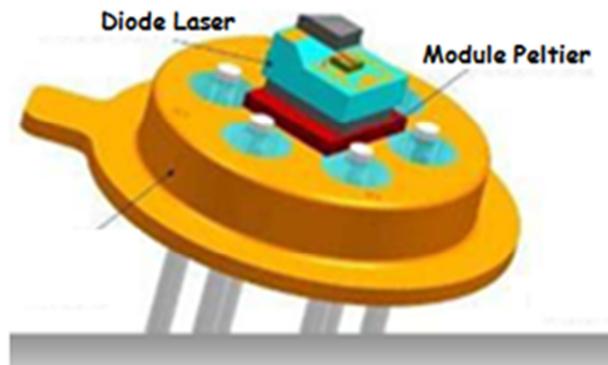


Figure I- 11: diode laser.

Bibliographie

- [1] H.J. Goldsmid, R.W. Douglas, 'The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration', *British Journal of Applied Physics*, 1954, Vol.5, N°303, 386-390.
- [2] F.D. Rosi, B. Abeles, R.V. Jensen, 'Materials for thermoelectric refrigeration', *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1959, Vol.10, 191-200.
- [3] C.B. Satterthwaite, R.W. Ure, 'Electrical and thermal properties of Bi₂Te₃', *Physical Review*, 1957, 108, 1164-1170.
- [4] L.D. Hicks and M.S. Dresselhaus, 'Effect of quantum-well structures on the thermoelectric Figure- of merit', *Physical Review B*, 1993, 47, 12727-12731.
- [5] L.D. Hicks and M.S. Dresselhaus, 'Thermoelectric Figure- of merit of a one dimensional conductor', *Physical Review B*, 1993, 47, 16631-16634.
- [6] R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts and B. O'Quinn, 'Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature Figure-s of merit', *Nature*, 2001, 413, 597-602.
- [7] 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.
- [8] 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_{2+m}: bulk thermoelectric materials with high Figure of merit', *Science*, 2004, 303, 818-821.
- [9] B. Poudel, Q. Hao, Y. Ma, Y. Lan, A. Minnich, B. Yu, X. Yan, D. Wang, A. Muto, D. Vashaee, X. Chen, J. Liu, M.S. Dresselhaus, G. Chen and Z. Ren, 'High-thermoelectric performance of nanostructures bismuth antimony telluride bulk alloys', *Science*, 2008, 320, 634-638.
- [10] A.I. Hochbaum, R. Chen, R.Diaz Delgado, W. Liang, E.C. Garnett, M. Najarian, A. Majumdar and P. Yang, 'Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires', *Nature*, 2008, 451, 163-167.
- [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_{1-x}Ge_x nanowires with different germanium concentrations and diameters', *Applied Physics Letters*, 2010, 96, 233106.
- [14] K. Kurosaki, A. Kosuga, H. Muta, S. Yamanaka Ti_8GeTe_5 : a new thermoelectric material with extremely low thermal conductivity The 26th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Jeju Island, South Korea, (2007).
- [15] H. Lange Electronic properties of semiconducting silicides *Phys. Stat. Sol. B*, Vol.201, pp.3, (1997).
- [16] K. K. Lee, A. S. Alexandrov, W. Y. Liang Breakdown of the Wiedemann-Franz law in strongly-coupled electron-phonon system, application to the cuprates *Eur. Phys. J. B*, Vol.39, No.4, pp.459, (2004).
- [17] M. Zhou, J. Li, H. Wang, T. Kita Compositional optimization of Ag-Pb-Sb-Te thermoelectric materials fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering The 26th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Jeju Island, South Korea, (2007).
- [18] Micropelt miniaturized thermoelectric devices: small size, high cooling power densities, short response time The 24th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Clemson, SC, pp.1, (2005).
- [19] A. Casian Thermoelectric properties of organic semiconductors *J. Thermoelec.*, Vol.3, pp.5, (1996).
- [20] H. Böttner, J. Nurnus, A. Gavrikov, G. Kühner, M. Jägle, C. Künzel, D. Eberhard, G. Plescher, A. Schubert, K.-H. Schlereth New thermoelectric components using microsystem technologies *J. MEMS*, Vol.13, No.3, pp.414, (2004).
- [21] J. R. Lim, G. J. Snyder, C.-K. Huang, J. A. Herman, M. A. Ryan, J.-P. Fleurial Thermoelectric microdevice fabrication process and evaluation at the Jet Laser Laboratory (JPL) The 21st International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Long Beach, CA, pp.535, (2002).
- [22] M. Ohtaki, Y. Nojiri, E. Maeda Improved thermoelectric performances of sintered NaCo_2O_4 with enhanced 2-dimensional microstructure The 19th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Cardiff, U.K., pp.190, (2000).
- [23] D.-H. Kim, T. Mitani Thermoelectric properties of fine-grained Bi_2Te_3 alloys *J. Alloys Comp.*, Vol.399, pp.14, (2005).

- [24] M. Ohta, S. Hirai Synthesis and thermoelectric properties of ternary rare-earth sulfides LnGdS_3 and LnCuS_2 (Ln:Nd, and Sm) The 26th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Jeju Island, South Korea, (2007).
- [25] W. Qu, M. Plötner, W.-J. Fischer Microfabrication of thermoelectric generators on flexible foil substrates as a power source for autonomous Microsystems J. Micromech. Microeng., Vol.11, pp.146, (2001).
- [26] W. J. Xie, X. F. Tang, G. Chen, Q. Jin, Q. J. Zhang Nanostructure and thermoelectric properties of p-type $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ compound prepared by melt spinning technique The 26th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Jeju Island, outh Korea, (2007).
- [27] A. Shakouri Nanoscale thermal transport and microrefrigerators on a chip Proc. IEEE, Vol.94, No.8, pp.1613, (2006).
- [28] M. Strasser, R. Aigner, M. Franosch, G. Wachutka Miniaturized thermoelectric generators based on poly-Si and poly-SiGe surface micromachining Sens. Actuators A, Vol.97-98, pp.535, (2002).
- [29] D. M. Rowe, CRC Handbook of thermoelectrics. CRC Press, 1995.
- [30] D. M. Rowe, Thermoelectrics Handbook: macro to nano. CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [31] A. F. Ioffe, Semiconductor thermoelements, and Thermoelectric cooling. Infosearch, ltd., 1957.
- [32] 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.
- [33] S. Priya et D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies. Springer, 2008.
- [34] R. D. Abelson, « Space Missions and Applications », in Thermoelectrics Handbook: macro to nano, CRC/Taylor & Francis., D. M. Rowe, 2006, p. 56.1-56.29.
- [35] 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.
- [36] F. J. DiSalvo, « Thermoelectric Cooling and Power Generation », Science, vol. 285, no. 5428, p. 703 -706, 1999.

[37] L. Bell, « Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems », *Science*, vol. 321, no. 5895, p. 1457-1461, 2008.

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

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

[40] G. Nolas et G. Slack, « Thermoelectric Clathrates », *American Scientist*, vol. 89, no. 2, p. 136, 2001.

Chapitre 2

Matériaux Thermoélectriques

2.1. Introduction

La thermoélectricité a été découverte il y a presque deux siècles. Un résumé des développements historiques de la thermoélectricité est présenté ci-dessous :

1821 : Le premier effet thermoélectrique a été découvert par Thomas Johan Seebeck, qui a mis en évidence le fait qu'un circuit fermé formé de deux matériaux de nature différente faisait dévier l'aiguille d'une boussole quand l'une des jonctions est placée à une température différente [1].

1834 : Jean Charles Athanase Peltier a découvert un autre effet thermoélectrique, la Réfrigération.

1851 : William Thomson a publié une explication complète des effets Seebeck et Peltier et a décrit leur corrélation.

1910 : Edmund Altenkirch a suggéré le concept du facteur de mérite. Il a montré que les bons matériaux thermoélectriques devaient posséder un fort coefficient Seebeck, une conductivité électrique élevée et une faible conductivité thermique [2].

1949 : Abram Ioffe a proposé que les matériaux semi-conducteurs dopés soient les meilleurs candidats pour être des matériaux thermoélectriques.

1954 : Julien Goldsmid a été le premier à identifier le Tellure de Bismuth comme matériau pour la réfrigération thermoélectrique et a montré que des refroidisseurs thermoélectriques pouvaient atteindre zéro degré Celsius.

1995 : Glenn Slack a introduit des nouveaux critères de sélection d'un bon matériau thermoélectrique et a développé la notion de « Phonon Glass Electron Crystal ». Ce matériau devait posséder les propriétés électriques d'un Crystal et les propriétés thermiques d'un verre [3].

Dans ce chapitre nous présentons un aperçu du domaine de la thermoélectricité. Nous commençons tout d'abord par les propriétés physiques et chimiques ; le facteur de mérite qui définit l'efficacité d'un matériau ainsi que les trois effets thermoélectriques et nous nous penchons ensuite sur les applications thermoélectriques actuelles [4].

2.2. Propriétés physiques et chimiques

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

A) La conductivité électrique « σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$) » : qui est l'inverse de la résistivité électrique (ρ). Elle correspond à la conductance d'une portion de matériau de 1 m de longueur et de 1 m² 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.

B) La conductivité thermique « λ (W/m.°K) » : C'est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ , 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 [5].

C) Le coefficient Seebeck « S (V/°K) » : 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 $\mu\text{V.K}^{-1}$ 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).

D) Le coefficient de Peltier d'un matériau « Π (V) » : 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 :

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

Avec:

- Q : la chaleur libéré ou absorbée (W).
- I : le courant électrique (A) [6].

E) Le coefficient de Thomson « β (V •K⁻¹) » : 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 :

$$dQ_v = -\beta \times \frac{\partial T}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{j} \quad (\text{eq. II. 4})$$

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).
- β : le coefficient de Thomson (en V.°K⁻¹).
- T : la température au du matériau (en °K).
- r : le point.
- le vecteur j : le flux de charge (en A.m⁻²) [7].

F) 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 :

$$S_{AB} = \frac{\Pi_{AB}}{T} \quad (\text{eq. II. 5})$$

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

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

$$\frac{\partial S_{AB}}{\partial T} = \frac{\beta_A - \beta_B}{T} \quad (\text{eq. II. 6})$$

Avec :

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

2.2.1. Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques

Les qualités d'un matériau thermoélectrique se mesurent par un nombre sans dimensions, appelé facteur de mérite ZT donné par la relation:

$$ZT = TS^2 \frac{\sigma}{\lambda} \quad (\text{eq. II. 7})$$

Où :

- T : la température absolue ($^\circ K$).
- S : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient de Seebeck ($V.K^{-1}$).
- σ : la conductivité électrique ($\Omega^{-1}.m^{-1}$).
- λ : la conductivité thermique ($W/m.^\circ K$) [9].

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 σ pour minimiser les pertes de chaleur par effet joule donc pour augmenter le courant qui traverse la charge*
- ✓ *Une faible conductivité thermique λ pour maintenir un gradient de température appréciable aux bornes du matériau [10].*

Les trois coefficients S , λ et σ 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 [11].

Toutefois, cette mission n'est pas simple puisque les propriétés déterminant le facteur de mérite sont mutuellement liées, et ce de manière défavorable [12].

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-1 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 [13].

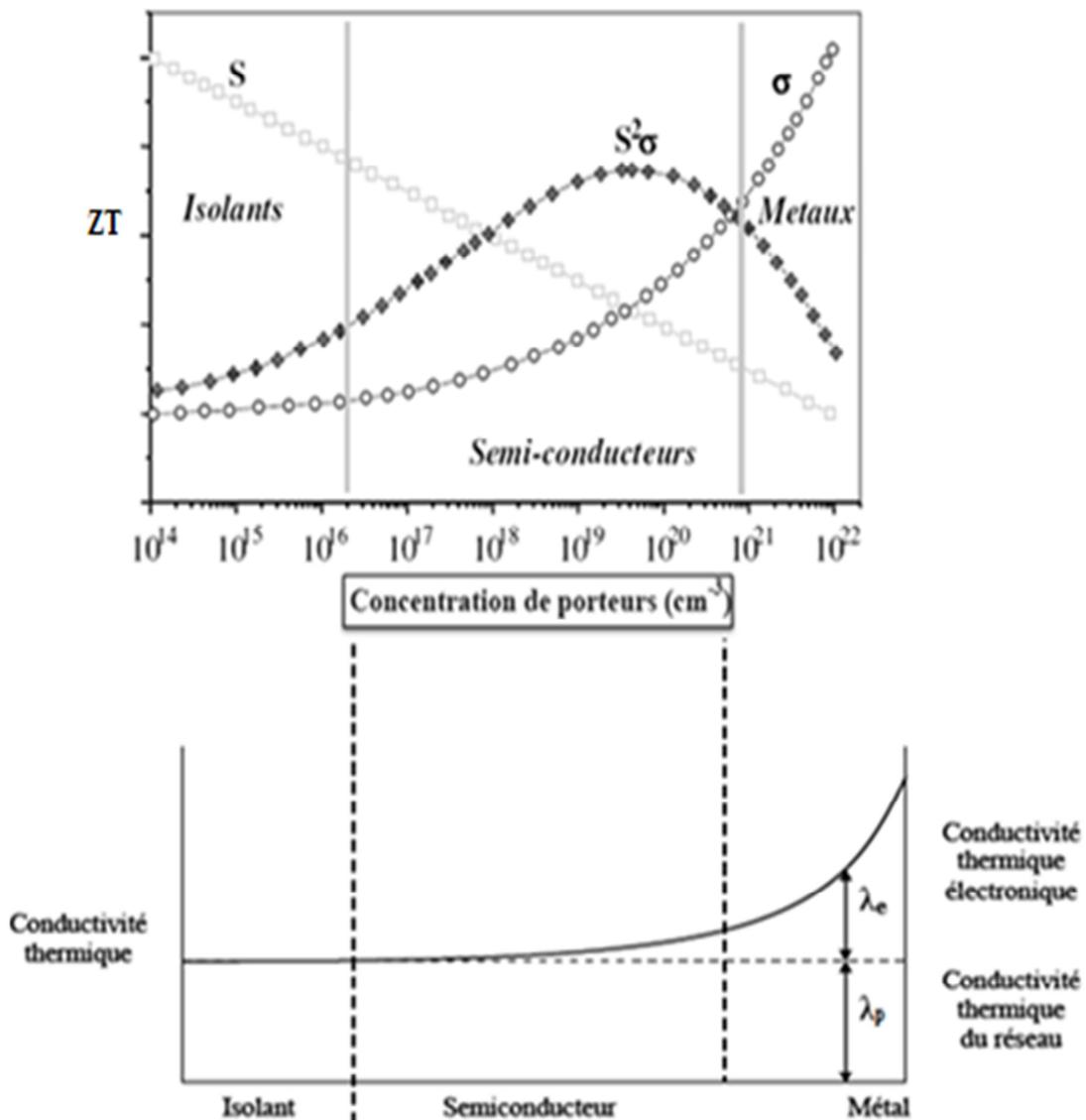


Figure II- 1: Conductivité électrique σ , coefficient Seebeck S , conductivité thermique λ et le facteur de puissance $S^2\sigma$ en fonction de la concentration des porteurs de charge.

D'après la Figure II- 1, 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 σ , le coefficient Seebeck S est très faible et la conductivité thermique λ est très élevée [14].

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 semiconducteurs peuvent atteindre des bons facteurs de mérite Z [15].

De plus, dans le cas des semiconducteurs, 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} cm^{-3} , ce qui correspond aux semiconducteurs fortement dopés [16].

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, semiconducteurs et métaux [17].

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>	σ	$\Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$	10^{-10}	10^5	10^8
<i>conductivité thermique</i>	λ	$\text{W}/(\text{m}.\text{K})$	0.1 - 1	1 - 100	10 - 100

Tableau II- 1: Valeurs des grandeurs thermoélectriques, à température ambiante pour : isolants, semiconducteurs 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 [18].

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 de

charge. 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 [19] :

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_e \quad (\text{eq. II. 8})$$

- λ_p : représente la partie de la conductivité thermique liée à la propagation des phonons : $W/(m \cdot ^\circ K)$.
- λ_e la partie résultant du transport des électrons : $W/(m \cdot ^\circ K)$.

Au cours du siècle dernier, un grand nombre des matériaux ont été étudiés. Les alliages bismuth-antimoine, la famille des tellurures de bismuth et de plomb ainsi que les alliages silicium-germanium constituent l'essentiel des matériaux de référence [20].

Comme nous pouvons le noter sur la figure II- 2, chacune de ces familles n'est efficace que sur une plage de température restreinte [21].

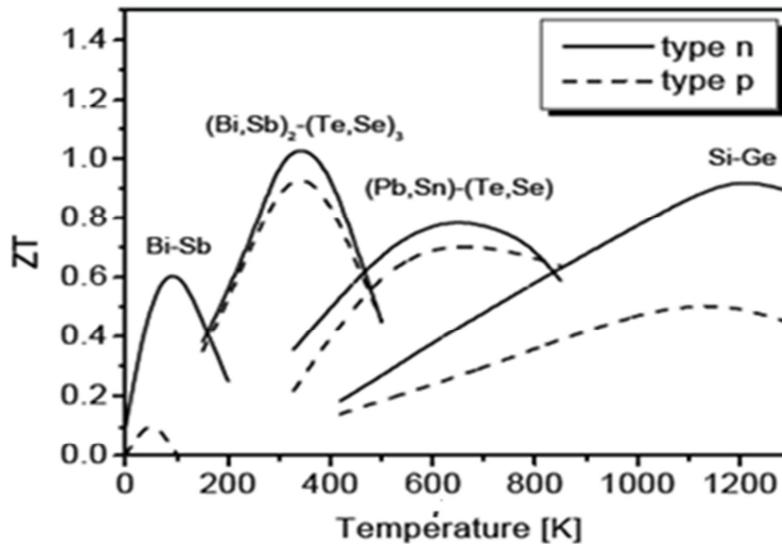


Figure II- 2 : Évolution de ZT en fonction de la température pour les matériaux conventionnels de type n et type p.

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

Un autre matériau thermoélectrique formé sur la base de Bismuth et Antimoine présente des propriétés thermoélectriques relativement moyennes ($ZT = 0,6$), de type n dans le domaine de températures 150-200 °K [22].

Dans le domaine de température 550-750 °K, le matériau le plus utilisé est le tellure de plomb et ses dérivés (Pb, Sn) Te.

Pour les hautes températures, les alliages à base de silicium et germanium possèdent des bonnes propriétés thermoélectriques au-dessus de 1000 °K et sont conçus pour des applications de génération d'électricité dans le domaine spatial. Cependant ces matériaux coûtent très cher [23].

2.2.2. Effet Seebeck

2.2.2.1. Définition

En 1821, le physicien Allemand THOMAS SEEBECK remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de nature différente et soumis à un gradient de température.

Plus tard, on expliquera le phénomène par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température (Figure II- 3). Un matériau thermoélectrique va donc permettre de transformer directement la chaleur en électricité.

L'utilisation la plus connue de cet effet est la mesure de la température à l'aide d'un thermocouple [24].

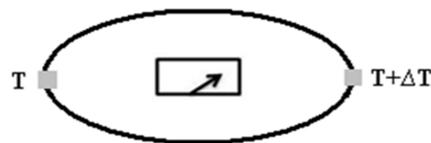


Figure II- 3: Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck.

2.2.2.2. Schéma de principe

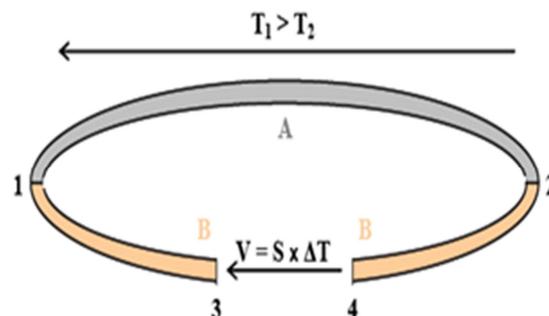


Figure II- 4: Illustration de l'effet Seebeck.

2.2.2.3. Explication du phénomène

Considérons un circuit formé de deux matériaux conducteurs différents, notés A et B, connectés électriquement en série, mais thermiquement en parallèle (voir Figure II- 4).

Si les jonctions aux points 1 et 2 sont maintenues à des températures différentes T_1 et T_2 avec $T_1 > T_2$, il se forme alors une différence de potentiel V entre les points 3 et 4, tel que :

$$V = (S_A - S_B) \times (T_1 - T_2) = S_{AB} \times \Delta T \quad (\text{eq. II. 9})$$

- S_{AB} : représente le coefficient Seebeck différentiel entre les éléments A et B ($V/^\circ K$).
- ΔT : la différence de la température ($^\circ K$).

Par convention, le symbole S désignera le coefficient de Seebeck (le symbole α est également parfois utilisé pour désigner ce coefficient).

Par ailleurs, la notion de « pouvoir thermoélectrique », fréquemment mentionnée dans la littérature, fait référence à la valeur absolue de son coefficient Seebeck [25].

De plus, le signe de S est positif si la différence de potentiel provoque un courant circulant dans le sens opposé à celui de la différence de température.

Il est important de signaler que le coefficient Seebeck S d'un matériau est sensible à la température ($S(T)$). Mais néanmoins, pour des faibles différences de températures, c'est-à-dire en négligeant la dépendance en température du coefficient Seebeck, la relation définie par l'équation précédente reste linéaire [26].

2.2.3. Effet Peltier

2.2.3.1. Définition

En 1834, le physicien Français JEAN PELTIER découvrit le second effet thermoélectrique : une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de nature différente (matériau type n et matériau type p) soumis à un courant électrique.

Un matériau thermoélectrique permettra donc de générer du froid ou de la chaleur par l'application d'un courant électrique [27].

2.2.3.2. Schéma de principe

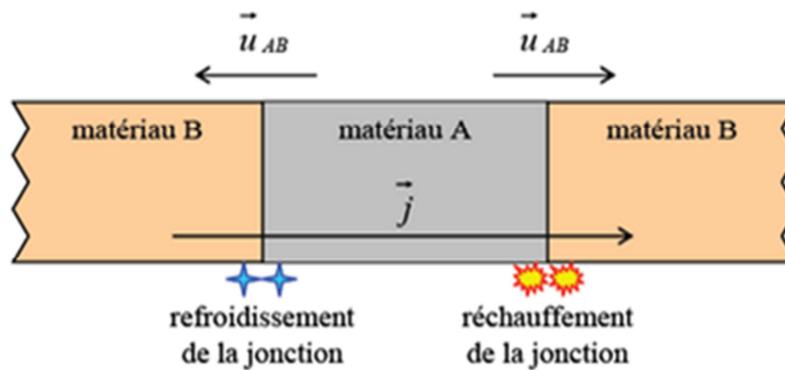


Figure II- 5: Illustration de l'effet Peltier.

2.2.3.3. Explication du phénomène

On considère dans ce cas la situation inverse de la précédente. Lorsqu'un courant électrique va traverser un matériau conducteur, un dégagement et réciproquement une absorption de chaleur vont se produire à ses extrémités en contact avec un deuxième matériau conducteur (voir Figure II-5), selon l'équation suivant [28] :

$$dQ_s = (\Pi_A - \Pi_B) \vec{j} \cdot \vec{u}_{AB} \quad (\text{eq. II. 10})$$

- 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 $W.m^{-2}$).
- Π_A et Π_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- 5, $\Pi_A > \Pi_B$), et provoque l'échauffement de l'autre jonction.

Ce phénomène est à la base de la réfrigération par effet Peltier [29].

2.2.4. Effet Thomson

2.2.4.1. Définition

En 1851, le physicien WILLIAM THOMSON montra que les effets Seebeck et Peltier sont liés.

On met cette correspondance en évidence lorsqu'on applique simultanément un gradient de température et un courant électrique.

La différence fondamentale avec les deux premiers effets est que ce dernier ne concerne qu'un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction ; en d'autre terme, l'effet Thomson définit une chaleur absorbée ou dégagée par unité de temps lorsqu'un courant électrique I traverse une région d'un matériau ayant un gradient de température [30].

2.2.4.2. Schéma de principe

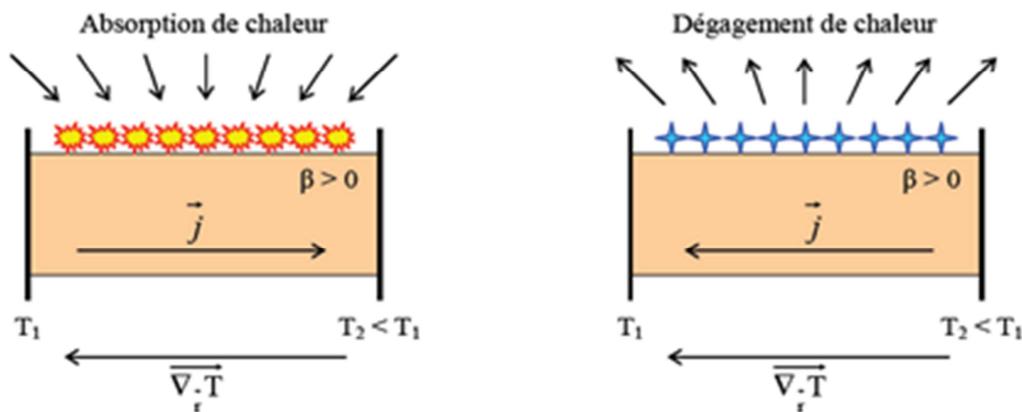


Figure II- 6: Illustration de l'effet Thomson.

2.2.4.3. Explication du phénomène

L'effet Thomson résulte du lien entre les deux effets thermoélectriques décrits précédemment.

En effet, en considérant un courant électrique traversant un matériau soumis à un gradient de température, il est possible de mettre l'effet d'absorption de la chaleur du milieu extérieur quand le courant circule dans le sens inverse de la différence de température, et inversement dégage de la chaleur quand le courant circule dans le sens de la différence de température (en considérant dans ce cas un matériau ayant un coefficient de Thomson positif) [31].

On peut transcrire ce phénomène sous la forme d'une équation locale :

$$dQ_v = -\beta \times \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \vec{j} \quad (\text{eq. II. 11})$$

- dQ_v : représente la quantité de chaleur émise (comptée en positif) ou absorbée (comptée en négatif) par unité de volume du matériau (en $W.m^{-3}$).
- β : le coefficient de Thomson (en $V.^\circ K^{-1}$).
- T : la température au du matériau (en $^\circ K$).
- r : le point.
- le vecteur j : le flux de charge (en $A.m^{-2}$) [32].

2.2.5. Rendement de la thermogénération et de la thermoréfrigération

Le rendement de la thermogénération (η), et le coefficient de performance en mode réfrigération (Φ) sont directement liés à la valeur de ZT [33].

(η) est définie comme le rapport de la puissance électrique (P) générée par le module, qui doit être la plus élevée possible, et la puissance thermique Q_c absorbée du côté chaud que l'on souhaite minimiser [34]:

$$\eta = \frac{P}{Q_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \times \frac{\sqrt{(1 + ZT)} - 1}{\sqrt{(1 + ZT)} + \frac{T_f}{T_c}} \quad (\text{eq. II. 12})$$

- η : le rendement de la thermogénération (%).
- P : la puissance électrique (W)
- Q_c : la puissance thermique (W).
- ZT : le facteur de mérite.
- T_c : la température de côté chaud ($^\circ K$).
- T_f : la température côté froid ($^\circ K$).

(Φ) est caractérisé par le rapport de la puissance thermique émise du côté froid Q_f , que l'on essaye de maximiser et la puissance électrique (P) fournie au module que l'on souhaite minimiser.

$$\Phi = \frac{Q_f}{P} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \times \frac{\sqrt{(1 + ZT)} - \frac{T_c}{T_f}}{\sqrt{(1 + ZT)} + 1} \quad (\text{eq. II. 13})$$

Avec :

$$T = \frac{T_c + T_f}{2} \quad (\text{eq. II. 14})$$

- Φ : le rendement de la thermoréfrigération (%).
- P : la puissance électrique (W).
- Q_f : la puissance thermique émise du côté froid (W).
- ZT : le facteur de mérite.
- T_c : la température de côté chaud (°K).
- T_f : la température côté froid (°K) [35].

2.3. Applications thermoélectriques actuelles

Un dispositif thermoélectrique (TE), peut transformer directement de la chaleur en électricité (un générateur TE) ou il peut transférer la chaleur (refroidisseurs TE) en appliquant un courant électrique. Il y a donc deux applications principales : la réfrigération et la génération d'électricité.

Dans la pratique les applications thermoélectriques utilisent des semiconducteurs de type n et p placés thermiquement en parallèle et reliés électriquement en série par un matériau dont le pouvoir thermoélectrique est supposé nul [36].

Les avantages de la génération d'électricité par l'effet thermoélectrique sont la fiabilité, la durabilité et la faible dimension des dispositifs. À cause de la dimension ajustable du générateur thermoélectrique, il est facile de générer de l'électricité en utilisant des sources de chaleur existantes inutilisées.

Par exemple, Il y a environ 30 à 35% de la chaleur qui est rejetée dans l'atmosphère dans plusieurs applications industrielles. Un système de générateur thermoélectrique peut transformer la chaleur inutilisée en énergie électrique.

Deux majeurs avantages de la réfrigération thermoélectrique sont l'absence de bruit et de vibration et ceci grâce à l'absence de pièces mobiles [37].

2.3.1. Générateur thermoélectrique

Un potentiel électrique peut être donc créé en appliquant un gradient de température à deux extrémités d'un matériau (effet Seebeck) et, en connectant une charge entre ces deux extrémités pour fermer le circuit, un courant électrique s'établit (Figure II- 7-a).

Comme le signe du potentiel électrique est une fonction du type de matériau (p ou n) et du signe de ΔT , il est possible d'augmenter le potentiel électrique par connexion de deux matériaux, l'un de type n et l'autre de type p, électriquement en série et thermiquement en parallèle (Figure II- 7-b) [38].

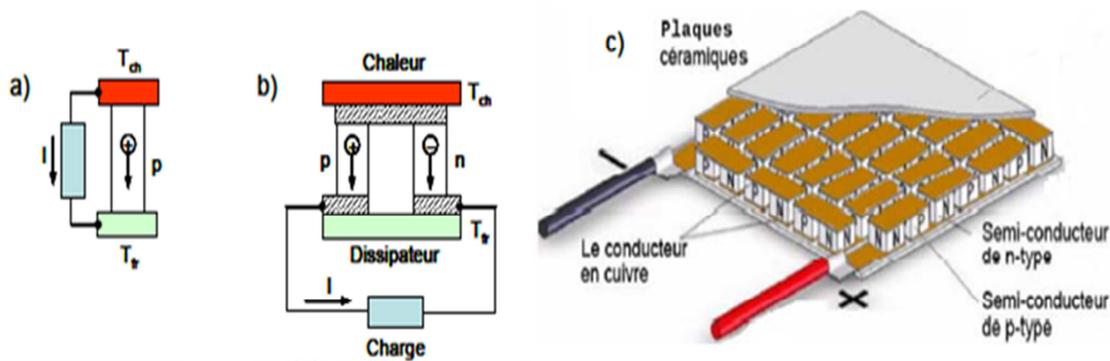


Figure II- 7: (a) Schéma de principe d'une branche thermoélectrique, (b) d'un thermocouple, (c) et d'un module thermoélectrique.

Cette configuration à deux branches (de type n et p) forme un thermocouple qui constitue la brique de base des dispositifs thermoélectriques. En effet, un module thermoélectrique est obtenu par connexion, toujours en série du point de vue électrique et en parallèle du point de vue thermique, de plusieurs thermocouples (Figure II- 7-c), ce qui permet d'augmenter encore le potentiel et donc le courant électrique.

Ces modules sont donc utilisés pour la réalisation des générateurs thermoélectriques TEG (ThermoElectric Generator) [39].

2.3.1.2. Exemple de la génération d'électricité

- **Générateurs thermoélectriques à radio-isotope : GTR**

Un exemple célèbre est celui des générateurs thermoélectriques à radio-isotope (RTG : Radioisotope Thermoelectric Generator) utilisés par des nombreuses sondes spatiales de la NASA (Figure II- 8) [40].

Ces générateurs thermoélectriques peuvent fournir une puissance électrique de quelques centaines de watts en convertissant la chaleur produite par des sources radioactives.

Malgré leur faible rendement (inférieur à 10 %), les générateurs thermoélectriques représentent l'unique choix possible, en raison d'une lumière solaire dans l'espace insuffisante pour le fonctionnement des panneaux photovoltaïques des sondes.

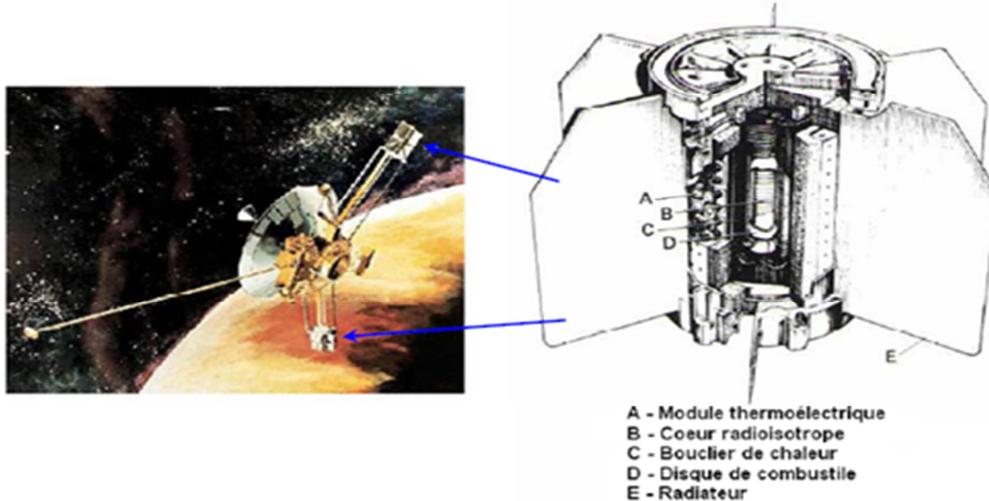


Figure II- 8: Sonde spatiale Pioneer 10 alimentée par un générateur thermoélectrique à radio-isotope SNAP-19 et le schéma de principe du générateur.

Par exemple, la sonde Pioneer a fonctionné pendant 31 ans (de 1972 à 2003) étant alimentée par 4 GTRs de 165 W de puissance globale. Également, la sonde Voyager 2 lancée en 1977 est actuellement alimentée par 3 GTRs de 450 W, avec un rendement qui baisse d'environ 2 % par an.

Ce même type de générateur est encore utilisé pour les très récentes sondes spatiales de la NASA comme, par exemple, la sonde New Horizon, lancée en 2006, alimentée par un RTG qui peut fournir une puissance électrique stable de 200 W sur plus de 50 ans [41].

L'utilisation des modules thermoélectriques dans des secteurs spécifiques repose sur les avantages uniques des générateurs thermoélectriques tels que la grande fiabilité, l'autonomie et la longévité [42].

2.3.2. Refroidisseur thermoélectrique

Le thermocouple considéré sur la Figure II-9-a peut être utilisé comme réfrigérateur si la charge est remplacée par une alimentation. Ainsi, par effet Peltier, le courant dans le circuit établit un gradient de température ΔT entre les deux côtés du thermocouple.

Même si le chauffage par effet Joule est beaucoup plus efficace, la principale application de ce type de thermocouple vise la fonction de refroidisseur [43].

Tout comme pour les générateurs de puissance électrique, un gradient de température plus important peut être obtenu par la connexion en série des plusieurs thermocouples (Figure II- 9-b) et par des montages composés des plusieurs modules (Figure II- 9-c) [44].

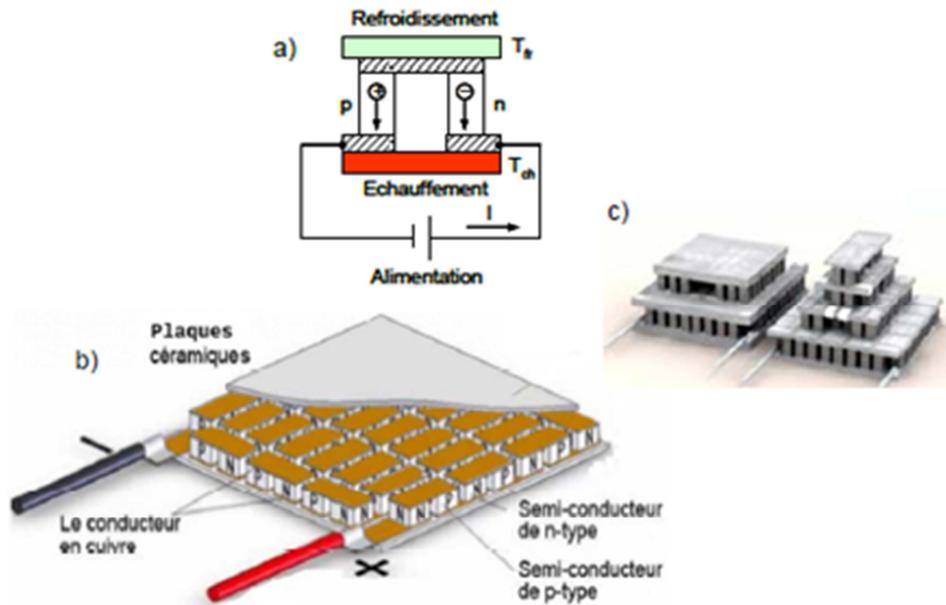


Figure II- 9: (a) Schéma de principe d'un thermocouple thermoélectrique, (b) module thermoélectrique, et (c) convertisseurs complets composés des plusieurs modules.

2.3.2.1. Exemple de la réfrigération

- **Module hybride thermoélectrique-photovoltaïque**

L'inconvénient majeur des cellules photovoltaïques est leur faible rendement. En effet, seule une petite partie de la puissance du rayonnement incident peut être convertie en électricité.

De plus les radiations non converties échauffent le panneau photovoltaïque, ce qui réduit encore le rendement. D'où l'idée de réaliser des systèmes combinés photovoltaïques-thermoélectriques.

Cette combinaison permet d'une part de refroidir les cellules photovoltaïques ce qui évite la perte de rendement électrique et d'autre part de récupérer une partie de l'énergie perdue sous forme de chaleur et de la transformer en énergie électrique, grâce aux modules thermoélectriques fonctionnant en mode Seebeck [45].

- **Explication du phénomène**

Les panneaux photovoltaïques soumis à de fortes irradiances (ensoleillement) perdent de leur efficacité car la température peut atteindre 60-80°C sur la surface qui reçoit les rayonnements.

Des systèmes de refroidissement sont intégrés afin de diminuer cette température, mais ces systèmes consomment cette énergie produite par le panneau photovoltaïque [46]. De récentes recherches ont montré qu'on peut intégrer des modules thermoélectriques à l'arrière des panneaux solaire afin d'augmenter la quantité d'énergie produite [47].

La figure II- 10 représente un module hybride thermoélectrique-photovoltaïque.

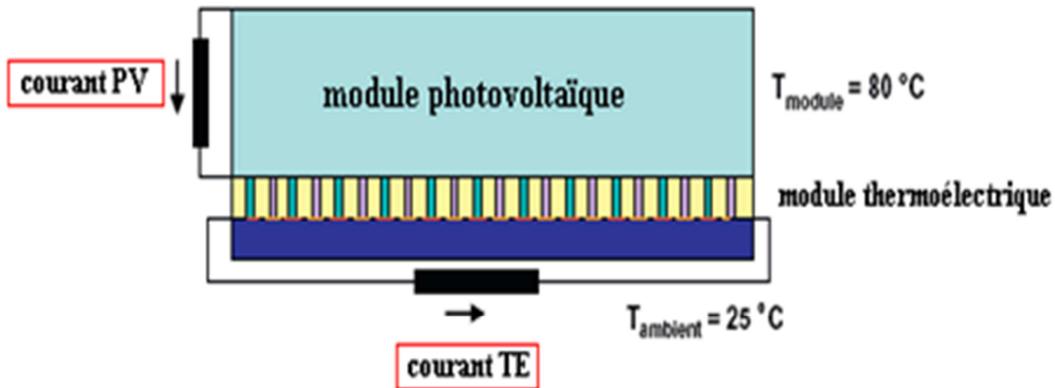


Figure II- 10: schéma d'un module hybride photovoltaïque-thermoélectrique.

La température sur la surface des panneaux photovoltaïques peut atteindre 80°C, ce qui diminue le rendement des cellules solaire. L'idée est d'exploiter cette haute température en plaçant des modules thermoélectriques sur la face arrière des modules photovoltaïques de façon que cette haute température puisse atteindre les modules thermoélectriques d'un côté et de l'autre côté on a la température ambiante de 25°C.

Par définition de l'effet Seebeck on aura génération de courant. Donc le courant total généré par le système est [48] :

$$I_{PVTE} = I_{PV} + I_{TE} \quad (\text{eq. II. 15})$$

- I_{PV} : courant photovoltaïque (A).
- I_{TE} : courant thermoélectrique(A).

La puissance totale générée est la somme des deux puissances générées par le panneau solaire et le module thermoélectrique :

$$P_{PVTE} = P_{PV} + P_{TE} \quad (\text{eq. II. 16})$$

- P_{PV} : puissance photovoltaïque (W).
- P_{TE} : puissance thermoélectrique(W).

Le rendement du système hybride s'écrit alors [49] :

$$\eta_{PVTE} = \eta_{PV} + (1 - \eta_{PV})\eta_{TE} \quad (\text{eq. II. 17})$$

Avec:

- η_{PV} : rendement photovoltaïque (%).
- η_{TE} : rendement thermoélectrique(%).

Bibliographie

- [1] C. Cros, M. Pouchard, P. Hagenmuller Sur deux nouvelles phases du système silicium-sodium CR Acad. Sc. Paris, Vol.260, pp.4764, (1962).
- [2] H. J. Goldsmid, A. W. Penn Boundary scattering of phonons in solid solutions Phys. Lett. A, Vol.27, pp.523, (1968).
- [3] A. Abba-Touré, G. Kra, R. Eholié Description du système ternaire Ge-Tl-Te J. Less Common Met., Vol.170, pp.199, (1991).
- [4] E. Gross, M. Riffel, U. Stohrer Thermoelectric generators made of FeSi₂ and HMS: fabrication and measurement J. Mater. Res., Vol.10, pp.34, (1995).
- [5] M. Beekman, G. S. Nolas Synthesis and thermal conductivity of type II silicon clathrates Physica B, Vol.383, pp.111, (2006).
- [6] 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.
- [7] A. F. Ioffe, Semiconductor thermoelements, and Thermoelectric cooling. Infosearch, 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] S. Priya et D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies. Springer, 2008.
- [10] G. S. Nolas, J. Sharp, et H. J. Goldsmid, Thermoelectrics: basic principles and new materials developments. Springer, 2001.
- [11] 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.
- [12] S. D. Mahanti et T. P. Hogan, Chemistry, physics, and materials science of thermoelectric materials: beyond bismuth telluride. Springer, 2003.
- [13] T. M. Tritt, Thermal conductivity: theory, properties, and applications. Springer, 2004.

[14] J. Fairbanks, « Thermoelectric Applications in Vehicles-Status 2008 », presented at the 6th European Conference on Thermoelectrics, Paris, France, 2008, p. 1-8.

[15] M. Quiret, « Quand la chaleur se mue en électricité », Echos, no. 19818, p. 14, 2006.

[16] F. J. DiSalvo, « Thermoelectric Cooling and Power Generation », Science, vol. 285, no. 5428, p. 703 -706, 1999.

[17] L. Bell, « Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems », Science, vol. 321, no. 5895, p. 1457-1461, 2008.

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

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

[20] J. P. Fleurial, « Design and discovery of highly efficient thermoelectric materials », presented at the 9th CIMTECH-World ceramics congress and forum on new materials, Florence , Italie (14/06/1998), vol. 24, p. 733-744.

[22] C. Kittel, Introduction to solid state physics. Wiley, 2005.

[23] H. J. Goldsmid, « Recent Studies of Bismuth Telluride and Its Alloys », Journal of Applied Physics, vol. 32, no. 10, p. 2198, 1961.

[24] J. P. Fleurial, L. Gailliard, R. Triboulet, H. Scherrer, et S. Scherrer, « Thermal properties of high quality single crystals of bismuth telluride--Part I: Experimental characterization », Journal of Physics and Chemistry of Solids, vol. 49, no. 10, p. 1237-1247, 1988.

[25] J. P. Fleurial, L. Gailliard, R. Triboulet, H. Scherrer, et S. Scherrer, « Thermal properties of high quality single crystals of bismuth telluride--Part II: Mixed-scattering model », Journal of Physics and Chemistry of Solids, vol. 49, no. 10, p. 1249-1257, 1988.

[26] H. J. Goldsmid, Introduction to Thermoelectricity. Springer, 2009.

[27] G. J. Snyder et E. S. Toberer, « Complex thermoelectric materials », Nat Mater, vol. 7, no. 2, p. 105-114, 2008.

- [28] B. C. Sales, « Novel thermoelectric materials », *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 2, no. 3, p. 284-289, 1997.
- [29] C. B. Vining, « ZT ~ 3.5: Fifteen years of progress and things to come », presented at the 5th European Conference on Thermoelectrics, ECT2007, Odessa House of Scientists, Odessa, Ukraine, 2007.
- [30] M. S. Dresselhaus et al., « New Directions for low dimensional thermoelectric materials », *Advanced Materials*, vol. 19, no. 8, p. 1043-1053, 2007.
- [31] T. C. Harman, M. P. Walsh, B. E. Laforge, et G. W. Turner, « Nanostructured thermoelectric materials », *Journal of Electronic Materials*, vol. 34, no. 5, p. L19-L22, 2005.
- [32] J.G.Stockholm « La thermoélectricité applications et perspectives », matériaux 2006,13-17 novembre, Dijon, France, 2008.
- [33] P.Pichanusakorn « *The optimal Seebeck coefficient for obtaining the maximum power factor in thermoelectrics* », *Applied Physics letters* 94, 2009.
- [34] M. Ait Hamouda, K. Ziouche, M. Haffar « *Etude du pouvoir thermoélectriques de couches de polysilicium dopées N et P de 20 à 450°C* », Institut d'électronique et microélectronique et de nanotechnologie IEMN, 2010.
- [35] V.D.ROS « *Les matériaux thermoélectriques performants pour la génération d'électricité* » matériaux 13-17 Novembre, Dijon, France, 2006.
- [36] M.COSNIER « *Etude numérique et expérimentale d'un système thermoélectrique destiné au rafraichissement des bâtiments* ». Université de Savoie, France, 2008.
- [37] J.P.Bailon et J.P.Dorlot « Des matériaux » 3eme édition, 2007.
- [38] W. Zhao, P. Wei, Q. Zhang, C. Dong, L. Liu, et X. Tang, « Enhanced Thermoelectric Performance in Barium and Indium Double-Filled Skutterudite Bulk Materials via Orbital Hybridization Induced by Indium Filler », *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, no. 10, p. 3713-3720, 2009.
- [39] A. Saramat et al., « Large thermoelectric figure of merit at high temperature in Czochralski-grown clathrate Ba₈Ga₁₆Ge₃₀ », *Journal of Applied Physics*, vol. 99, no. 2, p. 023708, 2006.
- [40] P.LEVEQUE « *Caractérisation des matériaux et composants* », revue université de LOUIS PASTEUR. France, 2007.

- [41] A. Shakouri, L. Sukan , Thermoelectric power factor for electrically conductive Polymers The 18th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Baltimore, MD, pp.402, (1999).
- [42] A. Shakouri Nanoscale thermal transport and microrefrigerators on a chip Proc. IEEE, Vol.94, No.8, pp.1613, (2006).
- [43] K.Agrouni, A.Belghachi et S.Kadri « *caractérisation électriques et thermique d'un module PV au silicium multi cristallin en milieu contrôlé et sur site saharien* » revue des énergies renouvelables : ICPWE 19-25,2003.
- [44] F.Abdo « *croissance de couche mince de silicium par épitaxie en phase liquide à base température pour application photovoltaïques* » thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliqués de Lyon, France, 2007.
- [45] M. Dresselhaus, G. Chen, Z. Ren, K. McEnaney, G. Dresselhaus, et J. Fleurial, « The Promise of Nanocomposite Thermoelectric Materials », Materials and devices for thermal-to-electric energy conversion, vol. 1166, p. 29-41, 2009.
- [46] L. Chen, Z. Xiong, et S. Bai, « Recent Progress of Thermoelectric Nanocomposites », Journal of Inorganic Materials, vol. 25, no. 6, p. 561-568, 2010.
- [47] B.Equer « *Energie solaire photovoltaïque* », physique et technologie de la conversion photovoltaïque, volume1, 2007.
- [48] H.Kanaan « *spectroscopie d'électro-absorption appliqué aux diodes électroluminescentes (OLEDs) et aux cellules photovoltaïques (OPVS)* » Thèse de doctorat à l'université de Toulouse, France, 2009.
- [49] A.Tchapo « *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome* ». Thèse de doctorat à l'université Nancy I, France,2010.

Chapitre 3

Générateur Thermoélectrique

3.1. Introduction

Le tellure de bismuth (Bi_2Te_3) est le premier matériau intégré dans des composants thermoélectriques, notamment grâce à ses performances à température ambiante.

Ainsi, la majorité des dispositifs thermoélectriques développés à ce jour est toujours à base de cet alliage que l'on trouve décliné surtout sous forme massive [1.2].

Ce chapitre sera consacré au Générateur thermoélectrique. Nous présenterons l'architecture d'un générateur thermoélectrique; les modes de fonctionnement et les différentes équations caractéristiques des Générateurs thermoélectriques, puis la modélisation et dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique et enfin l'interprétation des résultats de la simulation.

3.2. Générateur thermoélectrique

Les générateurs thermoélectriques, qu'ils soient de géométrie perpendiculaire ou planaire, sont de potentielles nouvelles sources d'énergie pour l'électronique portable.

L'application la plus connue en génération thermoélectrique est certainement la montre Thermatron qui utilise la chaleur du corps humain.

Mais ces générateurs, hier, intégrés dans les montres peuvent être adaptés demain dans d'autres équipements portables et pourront être couplés aux panneaux photovoltaïques pour augmenter la génération du courant [3].

3.2.1. Architecture du générateur

3.2.1.1. Géométrie perpendiculaire

Les dispositifs symbolisent la miniaturisation de la thermoélectricité. L'idée est d'élaborer des matériaux thermoélectriques de type **n** sur un substrat silicium et du type **p** sur un autre substrat.

Les puces sont ensuite coupées séparément puis collées. La Figure III- 1 représente l'architecture de la géométrie perpendiculaire des dispositifs.

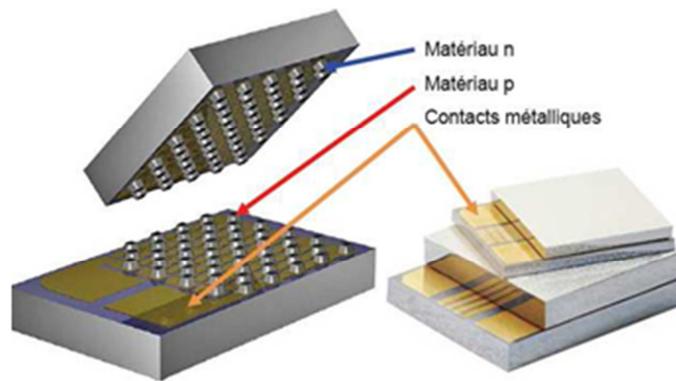


Figure III- 1: Générateur thermoélectrique.

En mode génération de puissance, une tension d'environ 1.5V et une puissance de 1mW sont obtenues pour une différence de température 15 K avec 450 jonctions [4]. Bien que la taille de ce générateur soit petite, les épaisseurs des matériaux (Bi_2Te_3) de type n et p étant de plusieurs micromètres, on reste dans le domaine des dispositifs massifs [5].

3.2.1.2. Géométrie plane

Toujours dans le but de réduire la taille des dispositifs tout en conservant les performances thermoélectriques, en 2000, Kim présente un générateur thermoélectrique plane réalisé avec des couches de $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ et $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$.

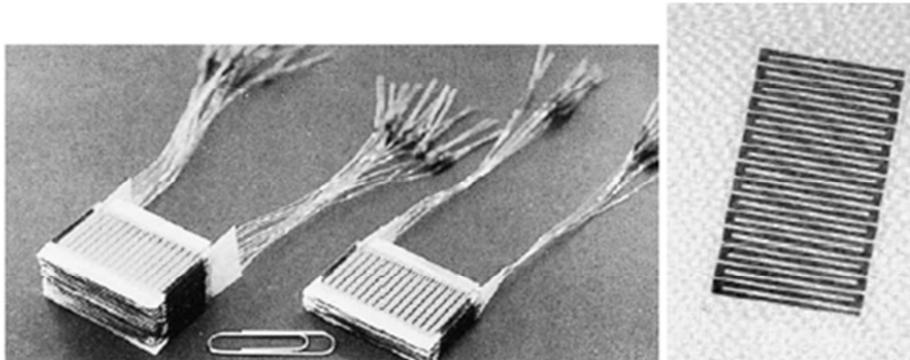


Figure III- 2: Générateur thermoélectrique de Kim réalisé avec des couches $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ et $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ [6].

Quinze jonctions n-p sont déposées sur un substrat de verre suivant l'architecture présentée dans la Figure III- 2. La mise en série ou parallèle de 20 substrats permet d'obtenir des générations des courants respectifs de $1\mu\text{A/K}$ et $0,1\text{mA/K}$ pour une tension de $100\text{mV}/^\circ\text{K}$ et $5\text{mV}/^\circ\text{K}$ [7].

En 2007, Takashiri et Coll. s'intéressent à l'architecture utilisée par Kim avec 7 jonctions n-p, (présenter sur la Figure III- 3): Une tension de sortie maximale de 83,3mV, pour une différence de température de 30K, générant une puissance estimée de 0,21 μ W pour un module recuit à 523°K.

Les couches n-Bi₂Te_{2,7}Se_{0,3} et p-Bi_{0,4}Sb_{1,6}Te₃ présentent respectivement un coefficient Seebeck de -179,3 μ V/°K et 254,4 μ V/°K et une résistivité électrique de 1,5m Ω .cm et 4,1m Ω .cm [8].

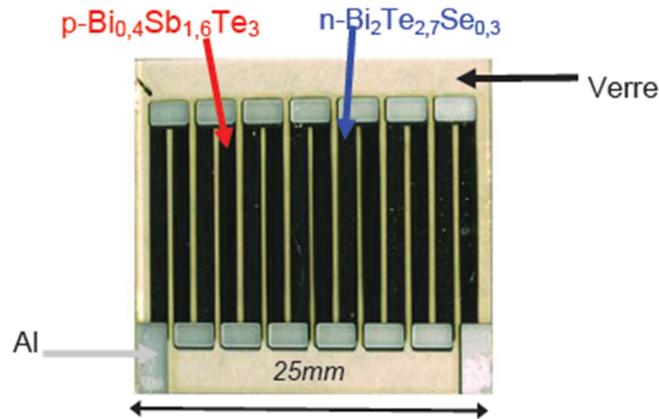


Figure III- 3: Générateur thermoélectrique de Takashiri et coll [8].

3.2.2. Les modes de fonctionnement

Un générateur thermoélectrique pourrait être représenté par deux branches constituées de deux semiconducteurs l'un de type n et l'autre de type p en contact à leurs extrémités avec une source chaude à la température T_c et une source froide à la température T_f , les deux extrémités à la température T_f , étant fermées sur une résistance de charge R (Voir la Figure III- 4):

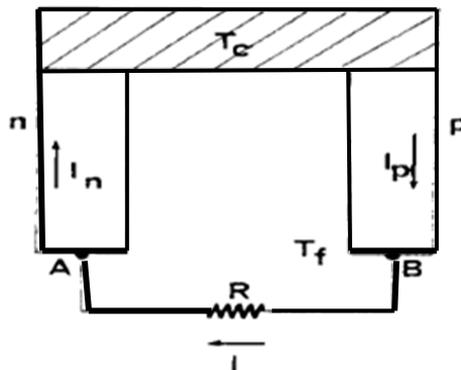


Figure III- 4: Représentation d'un générateur thermoélectrique [9].

Nous savons que les porteurs de charge diffusent de la jonction chaude vers la jonction froide, cela entraîne la création d'un courant électrique I .

Ce courant est la somme de deux courants I_n et I_p (I_n est le courant dû à la branche de type n et I_p est le courant dû à la branche p).

Pour simplifier, nous choisirons la même configuration géométrique pour les deux branches [10].

Le pouvoir thermoélectrique du générateur est la somme des pouvoirs thermoélectriques de chaque branche [10] :

$$S = S_n + S_p \quad (\text{eq. III. 1})$$

- S_n : le coefficient de Seebeck de la branche n ($V/^\circ K$).
- S_p : le coefficient de Seebeck de la branche p ($V/^\circ K$).

Leur conductivité thermique spécifique aussi [11]:

$$\lambda = \lambda_n + \lambda_p \quad (\text{eq. III. 2})$$

- λ_n : la conductivité thermique de côté n ($W/m^\circ K$).
- λ_p : la conductivité thermique de côté p ($W/m^\circ K$).

La puissance délivrée par le générateur s'écrit sous la forme suivante [12]:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (\text{eq. III. 3})$$

- U : la tension entre les deux points A et B (V).
- R : la résistance électrique (Ω).

Le courant I circulant dans la résistance de charge R s'écrit [13]:

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{eq. III. 4})$$

- U : la tension entre les deux points A et B (V).
- R : la résistance électrique (Ω).

3.2.3. Rendement d'un générateur

Après un bref aperçu sur le bilan énergétique dans un tel générateur, nous allons établir l'expression de son rendement en fonction des divers paramètres [14].

3.2.3.1. Bilan énergétique

Dans ce bilan énergétique on va définir :

- a-* **Le flux de chaleur transféré de la jonction chaude à la jonction froide** : est défini par l'équation [16] :

$$Q_c = \lambda (T_c - T_f) \quad (\text{eq. III. 5})$$

- λ : la conductivité thermique ($W/m \cdot ^\circ K$).
- T_c : la température du côté chaud ($^\circ K$).
- T_f : la température du côté froid ($^\circ K$).

- b-* **La chaleur de Peltier absorbée par la jonction chaude** : est définie par l'équation [17] :

$$Q_\pi = S I T_c \quad (\text{eq. III. 6})$$

- S : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient de Seebeck ($V \cdot K^{-1}$).
- I : le courant électrique (A).
- T_c : la température du côté chaud ($^\circ K$).

c- *La chaleur de Thomson libérée dans les branches* : donnée par l'équation suivante [18] :

$$Q_{\tau} = \pm \int T \frac{dS}{dT} I dT \quad (\text{eq. III. 7})$$

- T : la température absolue ($^{\circ}\text{K}$).
- S : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient de Seebeck (V.K^{-1}).
- I : le courant électrique (A).

d- *La part d'effet Joule dans les branches* : est sous la forme suivante [19] :

$$Q_I = R I^2 \quad (\text{eq. III. 8})$$

- R : la résistance électrique (Ω).
- I : le courant électrique (A).

e- *La part d'effet Joule retournant à la source chaude* est sous la forme suivante [20] :

$$Q_{CJ} = \frac{1}{2} R I^2 \quad (\text{eq. III. 9})$$

- R : la résistance électrique (Ω).
- I : le courant électrique (A).

En considérant que l'effet Joule est partagé entre les deux sources.

f- *L'énergie recueillie aux bornes de la résistance R* [21]

$$P = R I^2 \quad (\text{eq. III. 10})$$

- R : la résistance électrique (Ω).
- I : le courant électrique (A).

3.2.3.2. Expression du rendement

Le rendement d'un tel générateur s'écrit sous la forme suivante [22]:

$$\eta = \frac{P}{Q_C + Q_{\Pi} + Q_{\tau} - Q_I + Q_{CJ}} \quad (\text{eq. III. 11})$$

- P : Énergie recueillie aux bornes de la résistance R (W).
- Q_C : le flux de chaleur transféré de la jonction chaude à la jonction froide (W).
- Q_{Π} : la chaleur de Peltier absorbée à la jonction chaude (W).
- Q_{τ} : la chaleur de Thomson libérée dans les branches (W).
- Q_I : la part d'effet Joule dans les branches (W).
- Q_{CJ} : la part d'effet Joule retournant à la source chaude (W).

3.3. Modélisation et dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique

Afin de modéliser le comportement de notre générateur nous avons utilisé la méthode des éléments finis.

3.3.1. Présentation de la méthode : « Le modèle des éléments finis »

Dans cette dernière, nous considérons que le système est composé de trois domaines avec quatre limites (Voir Figure III- 5).

Chaque sous-domaine avec ses équations de la conservation de flux de la chaleur sont présentés dans la figure suivante :

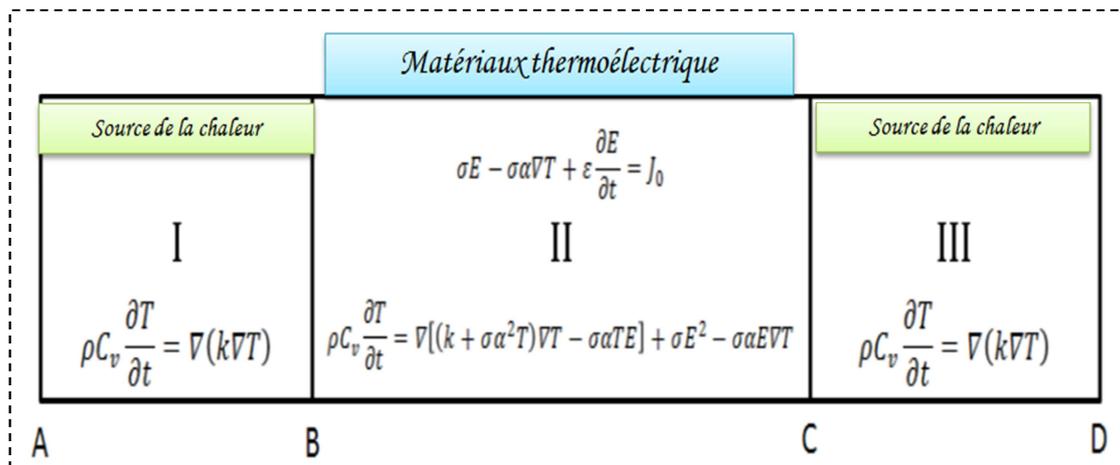


Figure III- 5: Sous-domaines avec ses équations.

Les sous-domaines I et III constituent la source de chaleur, le sous-domaine II représente le **matériau thermoélectrique** (le tellure de plomb et ses dérivés (Pb, Sn) Te n'est efficace que sur un domaine de température > 300 °K).

3.3.1.1. Explication du phénomène Étude thermique

En utilisant le principe de conservation de flux de chaleur présentée par les équations (III. 12) et (III. 13), nous avons les équations thermoélectriques reportés dans la Figure III- 5 :

$$\Delta J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{eq. III. 12})$$

Avec:

- J : le flux de charge (ou la densité surfacique de courant) ($A.m^{-2}$).
- ρ : La résistivité électrique ($\Omega. m$).
- t : le temps (s).

$$\nabla q + \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} = EJ \quad (\text{eq. III. 13})$$

Avec :

- q : le flux de chaleur (W).
- ρ : la résistivité électrique ($\Omega. m$).
- C_v : la capacité thermique ($j/^{\circ}K$).
- T : la température ($^{\circ}K$).
- t : le temps (s).
- Q : la quantité de chaleur émise (comptée en positif) ou absorbée (comptée en négatif) par unité de surface à l'une des deux jonctions ($W.m^{-2}$).
- E : le champ électrique (V/m).
- J : le flux de charge (ou la densité surfacique de courant) ($A.m^{-2}$).

❖ Les conditions aux limites thermiques :

A: flux de chaleur (q_0) s'écrit sous la forme :

$$q_0 = -K \frac{dT}{dx} \quad (\text{eq. III. 14})$$

- K : la conductivité thermique ($W/m.^{\circ}K$).
- T : la température ($^{\circ}K$).
- x : la longueur (m).

B: On considère que la chaleur est continue à travers l'interface (équilibre du flux) :

$$J = J_0.$$

- J : le flux de charge (ou la densité surfacique de courant) ($A.m^{-2}$).
- J_0 : le flux de charge ($A.m^{-2}$), à $t=0$, avec : t =le temps (s).

C: La chaleur est continue à travers l'interface : On prend la tension $V = 0$, la température est: $T = T_{\text{ambiante}}$

D: On suppose que la conductivité thermique (k), le facteur de la résistivité électrique et la capacité thermique (ρC_v) et la conductivité électrique (σ) sont des constantes pour chaque sous-domaine.

Dans le sous-domaine II : On prend $\alpha=S\alpha(T)$ comme une fonction de la température, on s'intéresse au gradient de température qui donne l'effet Seebeck .

❖ Équations de la chaleur sur les sous-domaines I et III

Les équations de la chaleur sur la majeure partie des sous-domaines I et III sont données par la relation [23]:

$$\rho C_v \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{K}{\Delta x} \left[\left(\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} \right) + \left(\frac{T_{i-1} + T_i}{\Delta x} \right) \right] \quad (\text{eq. III. 15})$$

- ρ : la résistivité électrique ($\Omega. m$).
- C_v : la capacité thermique ($J/^{\circ}K$).
- T_i : la température au point (i) ($^{\circ}K$).
- t : le temps (s).
- K : la conductivité thermique ($W/m. ^{\circ}K$).
- x : la longueur (m).
- T_{i+1} : la température au point ($i+1$) ($^{\circ}K$).
- T_{i-1} : la température au point ($i-1$) ($^{\circ}K$).

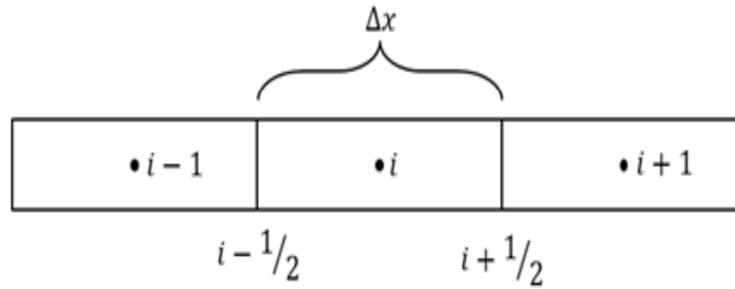


Figure III- 6: Nœuds en sous-domaine I et III.

Le nœud : c'est un point dans lequel les intensités des courants entrent et sortant.

- **Équation de la chaleur à la limite A** : (Voir la Figure III- 5)

L'équation de la chaleur à la limite de ce domaine est [24]:

$$\rho C_v \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{K}{\Delta x} \left[\left(\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} \right) - q_0 \right] \quad (\text{eq. III. 16})$$

- ρ : la résistivité électrique ($\Omega \cdot m$).
- C_v : la capacité thermique ($j/^\circ K$).
- T_i : la température au point (i) ($^\circ K$).
- t : le temps (s).
- K : la conductivité thermique ($W/m \cdot ^\circ K$).
- x : la longueur (m).
- T_{i+1} : la température au point ($i+1$) ($^\circ K$).
- T_{i-1} : la température au point ($i-1$) ($^\circ K$).
- q_0 : flux de chaleur à $t=0$ (W).

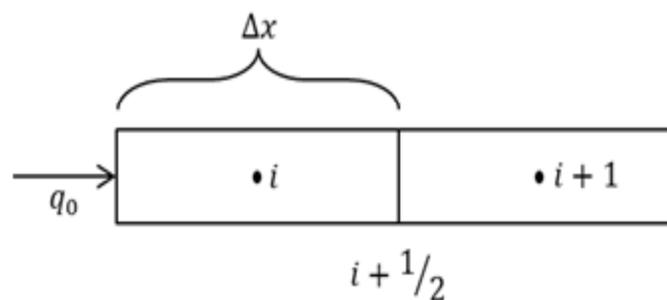


Figure III- 7: Coté de A.

- **Équation de la chaleur à la limite D**

L'équation de la chaleur à limite de D devient [25]:

$$\rho C_v \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{K}{\Delta x} \left[\frac{T_a - T_i}{\Delta x/2} - \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \right] \quad (\text{eq. III. 17})$$

- ρ : la résistivité électrique ($\Omega \cdot m$).
- C_v : la capacité thermique ($J/^\circ K$).
- T_i : la température au point (i) ($^\circ K$).
- t : le temps (s).
- K : la conductivité thermique ($W/m \cdot ^\circ K$).
- x : la longueur (m).
- T_a : la température ambiante ($^\circ K$).
- T_{i-1} : la température au point ($i-1$) ($^\circ K$).

- **Équation de la chaleur à la limite B et C**

Les équations de la chaleur sur la majeure partie de B et C sont données par les relations [23]:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_g = \frac{T_{i-1/2} - T_{i-1}}{\Delta x_g/2} \quad (\text{eq. III. 18})$$

- T : la température ($^\circ K$).
- x_g : la longueur du côté gauche (m).
- $T_{i-1/2}$: la température au point ($i-1/2$) ($^\circ K$).
- T_{i-1} : la température au point ($i-1$) ($^\circ K$).

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_d = \frac{T_i - T_{i-1/2}}{\Delta x_d/2} \quad (\text{eq. III. 19})$$

- T : la température ($^\circ K$).
- x_d : la longueur du côté droite (m).
- T_i : la température au point (i) ($^\circ K$).
- $T_{i-1/2}$: la température au point ($i-1/2$) ($^\circ K$).

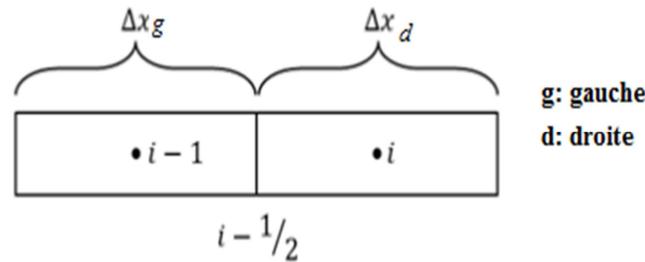


Figure III- 8: La limite de B et C.

3.3.1.2. Étude thermoélectrique avec le modèle des éléments finis

Dans notre étude, un intérêt particulier est porté au matériau thermoélectrique puis se trouve dans le sous domaine II entre les points B et C présenté par la figure suivante :

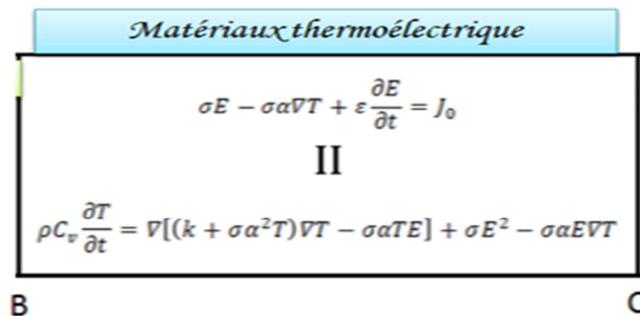


Figure III- 9: Sous-domaines II avec ses équations.

❖ Circuit équivalent thermique-thermoélectrique

Le premier pas dans l'élaboration d'un modèle de circuit équivalent est de convertir les propriétés de conductivité du matériau puis on les considère dans les équations en composants de circuits, tels que la résistance et de la capacité.

Le champ électrique doit être rédigé en termes de tension, aussi il se définit par l'équation suivante:

$$W(x, t) = E\Delta x \quad (\text{eq. III. 20})$$

Avec :

- W : la tension (V).
- E : le champ électrique (V/m).
- x : la longueur du module thermoélectrique (m).
- t : le temps de la génération du courant (s).

En tenant compte des divers paramètres on obtient deux équations donnant l'expression de la capacité en fonction de la température et du temps [25] :

$$\begin{aligned}
 C_{th} \frac{\partial T_i}{\partial t} = & \frac{W_i^2}{\Delta R_e} - \alpha_i \frac{W_i T_{i+1} - T_{i-1}}{2 \Delta R_e} + \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta R_{th}} \\
 & + \frac{\alpha_i^2}{2 \Delta R_e} (T_{i+1}^2 - 2T_i^2 + T_{i-1}^2) \\
 & - \frac{\alpha_i^2}{4 \Delta R_e} [(T_{i+1} - T_i)(W_{i+1} - W_i) \\
 & + (T_{i-1} - T_i)(W_{i-1} - W_i)] \quad (\text{eq. III. 21})
 \end{aligned}$$

$$C_e \frac{\partial W_i}{\partial t} = I_0 - \frac{W_i}{\Delta R_e} - \alpha_i \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2 \Delta R_e} \quad (\text{eq. III. 22})$$

- C_{th} : la capacité thermique (j/°K).
- T_i : la température au point (i) (°K).
- t : le temps (s).
- W_i : la tension au point (i) (V).
- R_e : la résistance électrique (Ω).
- α_i : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient de Seebeck au point (i) ($V.K^{-1}$).
- T_{i+1} : la température au point (i+1) (°K).
- T_{i-1} : la température au point (i-1) (°K).
- R_{th} : la résistance thermique ($m^2.°K/W$).
- W_{i+1} : la tension au point (i+1) (V).
- W_{i-1} : la tension au point (i-1) (V).
- C_e : la capacité électrique (j/V).
- I_0 : le courant électrique à $t=0s$ (A).

Les termes dans l'équation précédente (III-21) peuvent être considérés comme des courants dans un nœud, on a deux circuits, l'une pour l'équation électrique et l'autre pour l'équation thermoélectrique.

Le circuit électrique simple est montré dans la Figure III- 10:

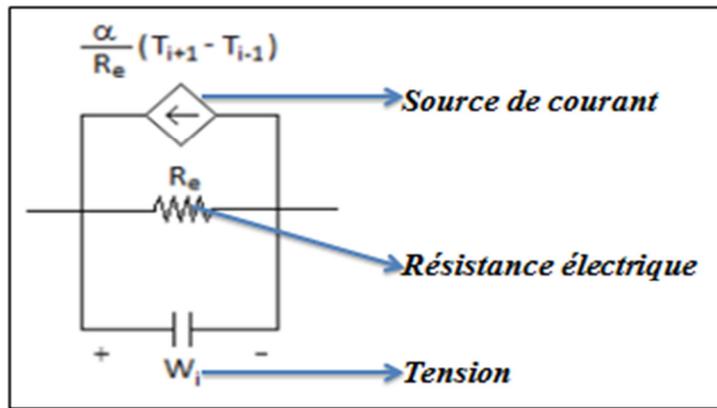


Figure III- 10: Circuit électrique équivalent [26].

Pour le circuit thermoélectrique, tous les termes thermoélectriques non linéaires regroupés en une seule source de courant entrant dans le nœud, comme illustré par la Figure III- 11:

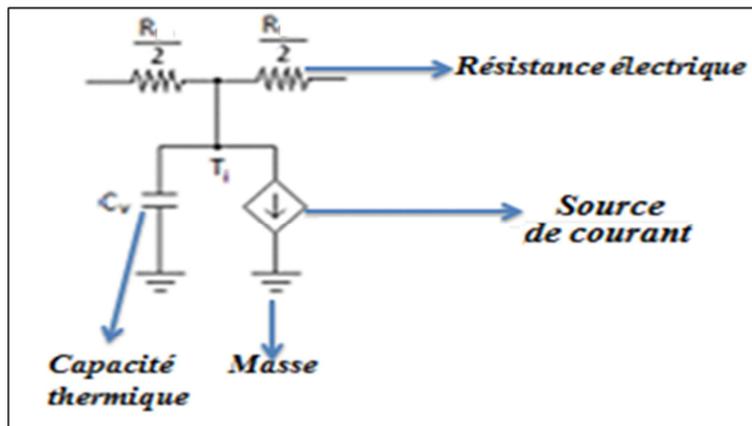


Figure III- 11: Circuit thermoélectrique équivalent [27].

❖ Équations thermoélectriques à modéliser par Matlab et conditions aux limites

La modélisation comporte trois programmes, le premier appelé (thermoelectric1.m) est un programme principal et les deux autres (tension.m et Sfun.m) sont des sous-programmes.

▪ **Programme principale : thermoelectric1.m:**

Ce programme nous donne les valeurs de la quantité de la chaleur (Q) qui représente l'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique R en fonction du temps.

Le matériau thermoélectrique se trouve dans la zone II (Figure III- 9) entre la zone I et II pour cela nous calculons la température aux limites de B et C (B € à la zone I et C € à la zone III) [28].

a) *Conditions aux limites pour la température aux points de B et C : T_b, T_c*

La température à la limite de B est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 T_B &= \left(R_{th}x N_{max} + R_{max} x (N_{max} + 1) + \frac{2\alpha R_{th} R_{max} x (N_{max} + 1)^2}{R_e} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{R_{max} \alpha x (N_{max} + 1) x (N_{max} + 2N + N_{min} + 1)}{2R_e} \right) \\
 &\times \frac{1}{R_{th} + R_{max} \alpha 2x \frac{(N_{max} + 1)}{R_e}} \qquad \qquad \qquad (eq. III. 23)
 \end{aligned}$$

- $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- $N=2$: Nombre d'éléments $N=Nb$.
- $N_{min}=1$: Nombre d'élément minimal.
- $Re=5$: Résistance électrique (Ω).
- $R_{th}=5$: Résistance thermique ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- $N_{max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- α : Fonction de la température ($V/^\circ K$).

La température à la limite de C est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 T_C &= \left(R_{th}x (N_{max} + N + 1) + R_{min}x(N_{max} + N) + \frac{\alpha(N)^2 R_{th} R_{min} x (N_{max} + N)^2}{R_e} \right. \\
 &\quad \left. + \alpha R_{th} R_{min} x \frac{(N_{max} + N) x (N_{max} + 2N + N_{min} + 2)}{2R_e} \right) \\
 &\times \frac{1}{R_{th} + R_{min} + \frac{\alpha(N)^2 R_{th} R_{min} x (N_{max} + N)}{R_e}} \qquad \qquad \qquad (eq. III. 24)
 \end{aligned}$$

- $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- $N=2$: Nombre d'éléments $N=Nb$.
- $N_{min}=1$: Nombre d'élément minimal.
- $Re=5$: Résistance électrique (Ω).
- $R_{th}=5$: Résistance thermique ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- $N_{max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- α : Fonction de la température ($V/^\circ K$).
- $R_{min}=1$: Résistance thermique minimal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$) [29].

b) Les fonctions dérivées

Les fonctions dérivées sont reliés par la longueur du module thermoélectrique et le temps de la génération de puissance.

La première fonction dérivée est sous la forme suivante :

$$\dot{Q}(x, t) = \frac{Q_{in} + \frac{x}{R_{max}}}{C_{max}} \quad (\text{eq. III. 25})$$

Avec :

- $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- t =temps de la simulation varie de : 0 jusqu'à 4000 s.
- $C_{max}=180/N_{max}$: Capacité thermique maximal ($J/^\circ K$).
- $Q_{in}=1$: Flux de chaleur d'entrée dans le sous-circuit thermique (W).
- $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- Q : Énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique R (W) [30].

La deuxième fonction dérivée est une fonction de $(N_{max} - 1)$ donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dQ(x, t)(N_{max} - 1)}{= C_{max} \frac{x(N_{max}) - 2x + x(N_{max} - 1) + x(N_{max} - 2)}{R_{max}}}$$

(eq. III. 26)

La troisième fonction dérivée est une fonction de (N_{max}) donnée par l'équation suivante :

$$dQ(x, t)(N_{max}) = 2 \frac{T_B - x(N_{max})}{(N_{max})} - C_{max} \frac{x(N_{max}) - x(N_{max}) - 1}{(N_{max})}$$

(eq. III. 27)

La quatrième fonction dérivée est une fonction de ($N_{max} + 1$) donnée par l'équation suivante :

$$dQ(x, t)(N_{max} + 1) = \frac{1}{R_e} (x(N_{max} + N + N_{min} + 1))^2 - \alpha x(N_{max} + N + N_{min} + 1) \frac{x(N_{max} + 2) + x(N_{max} + 1)}{2 - T_B} - \frac{\alpha(x(N_{max} + 2) + x(N_{max} + 1))}{2x(N_{max} + N + N_{min} + 2)}$$

$$+ \frac{x(N_{max} + N + N_{min} + 1)}{2} - \frac{T_B x(2N + N_{max} + N_{min} + 1)}{R_e} + \frac{\alpha^2}{R_e} (x(N_{max} + 2) + x(N_{max} + 1)) \frac{(x(N_{max} + 2) - x(N_{max} + 1))}{2 - 2T_B (x(N_{max} + 1) - T_B)} + \frac{x(N_{max} + 2) - x(N_{max} + 1)}{R_{th}} + 2 \frac{T_B - x(N_{max} + 1)}{R_{th} C_{th}}$$

(eq. III. 28)

La cinquième fonction dérivée est une fonction de ($N_{max} + N + N_{min} + 1$) donnée par l'équation suivante :

$$dQ(x, t)(N_{max} + N + N_{min} + 1) = I - x \frac{(N_{max} + N + N_{min} + 1)}{R_e} + \alpha \frac{(x(N_{max} + 2)) + x(N_{max} + 1)}{2 - T_B} \frac{R_e}{C_e}$$

(eq. III. 29)

La sixième fonction dérivée est une fonction de $(N_{\max} + N - 1)$ donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
& dQ(x, t)(N_{\max} + N - 1) \\
&= \frac{1}{R_e} (x(N + N_{\min} + 1 + (N_{\max} + N - 1))^2 - \frac{1}{2} \alpha (N - 1) x(N + N_{\min} + N_{\max} + N \\
&- 1) (x(N_{\max} + N - 1 + 1) - x(N_{\max} + N - 1 - 1)) - \alpha(N \\
&- 1) \frac{x(N_{\max} + N) + x(N_{\max} + N - 1)}{2} \\
&\times \frac{x(N + N_{\min} + N_{\max} + N) + x(N + N_{\min} + N_{\max} + N - 1)}{2} \\
&- \left(\frac{x(N_{\max} + N - 1) + x(N_{\max} + N - 2)}{2} \right) \left(\frac{x(N + N_{\min} + N_{\max} + N - 1)}{2R_e} \right. \\
&+ \left. \frac{x(N + N_{\min} + N_{\max} + N - 2)}{2R_e} \right) \\
&+ \alpha \frac{(N - 1)^2 (x(N_{\max} + N) + x(N_{\max} + N - 1)) (x(N_{\max} + N) - x(N_{\max} + N - 1))}{R_e} \\
&- \frac{(x(N_{\max} + N - 1) + x(N_{\max} + N - 2)) (x(N_{\max} + N - 1) - x(N_{\max} + N - 2))}{2} \\
&+ C_{th} \frac{x(N_{\max} + N) - 2x(N_{\max} + N - 1) + x(N_{\max} + N - 1) + x(N_{\max} + N - 2)}{R_{th}}
\end{aligned}$$

(eq. III. 30)

La septième fonction dérivée est une fonction de $(N_{\max} + N - 1 + N + N_{\min})$ donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
& dQ(x, t)(N_{\max} + N - 1 + N + N_{\min}) \\
&= \frac{I - x(N_{\max} + N - 1 + N + N_{\min})}{R_e} \\
&+ C_e \frac{\alpha(N - 1 + N + N_{\min})(x(N_{\max} + N + N + N_{\min}) - x(N_{\max} + N - 2 + N + N_{\min}))}{2R_e}
\end{aligned}$$

(eq. III. 31)

La huitième fonction dérivée est une fonction de $(N_{\max} + 2N + N_{\min})$ donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
dQ(x, t)(N_{max} + 2N + N_{min}) \\
= I - \frac{x(N_{max} + 2N + N_{min})}{R_e} \\
+ \frac{C_e}{R_e} \alpha(N) \left(T_C - \frac{x((N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1))}{2} \right)
\end{aligned}$$

(eq. III. 32)

La neuvième fonction dérivée est une fonction de ($N_{max} + N$) donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
dQ(x, t)(N_{max} + N) \\
= \frac{1}{R_e} \left(x(N_{max} + 2N + N_{min})^2 - \alpha(N) x(N_{max} \right. \\
\left. + 2N + N_{min}) \left(T_C - \frac{x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1))}{2} \right) \right) \\
- \alpha(N) \left(T_C x (2N + N_{max} + 2 + N_{min}) \right. \\
\left. - \frac{x(N_{max} + N - 1) + x(N_{max} + N)}{2} \frac{x(N_{max} + 2N + N_{min}) + x(N_{max} + 2N + N_{min} - 1)}{2R_e} \right) \\
+ \frac{(\alpha(N))^2}{R_e} (T_C - x(N_{max} + N)) \\
- \left(x(N_{max} + N) + x(N_{max} + N - 1) \left(\frac{x(N_{max} + N) - x(N_{max} + N - 1)}{2} \right) \right) \\
+ \frac{x(N_{max} + N - 1) - x(N_{max} + N)}{R_{th}} + 2 \frac{T_C - x(N_{max} + N)}{C_{th} R_{th}}
\end{aligned}$$

(eq. III. 33)

La dixième fonction dérivée est une fonction de ($N_{max} + N + 1$) donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
dQ(x, t)(N_{max} + N + 1) \\
= \frac{1}{C_{min}} \left(-2 \frac{x(N_{max} + N - 1) - T_C}{R_{min}} \right. \\
\left. + \frac{x(N_{max} + N + 2) - x(N_{max} + N + 1)}{R_{min}} \right)
\end{aligned}$$

(eq. III. 34)

La onzième fonction dérivée est une fonction de $(N_{\max} + N + N_{\min} - 1)$ donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} dQ(x, t)(N_{\max} + N + N_{\min} - 1) \\ = \frac{x(N_{\max} + N + N_{\min}) - 2x(N_{\max} + N + N_{\min} - 2)}{C_{\min} R_{\min}} \end{aligned}$$

(eq. III. 35)

La douzième fonction dérivée est une fonction de $(N_{\max} + N + N_{\min})$ donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} dQ(x, t)(N_{\max} + N + N_{\min}) \\ = \frac{x(N_{\max} + N + N_{\min} - 1) - x(N_{\max} + N + N_{\min})}{R_{\min}} \\ + 2 \frac{T_a - x(N_{\max} + N + N_{\min})}{R_{\min} C_{\min}} \end{aligned}$$

(eq. III. 36)

La treizième fonction dérivée est une fonction de $(N_{\max} + N + N_{\min} + 1)$ donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} dQ(x, t)(2N + N_{\max} + N + N_{\min} + 1) \\ = \frac{I - \frac{2x(2N + N_{\max} + N + N_{\min} + 1)}{R_e} + \frac{2\alpha x(N_{\max} + 1) - T_B}{R_e}}{C_e} \end{aligned}$$

(eq. III. 37)

La quatorzième fonction dérivée est une fonction de $(2N + N_{\max} + N + N_{\min} + 2)$ donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} dQ(x, t)(2N + N_{\max} + N + N_{\min} + 2) \\ = \frac{I - \frac{2x(2N + N_{\max} + N + N_{\min} + 2)}{R_e} + \frac{2\alpha (T_C - x(N_{\max} + N))}{R_e}}{C_e} \end{aligned}$$

(eq. III. 38)

Avec :

- t : temps de la simulation (s).
- $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- $N=2$: Nombre d'éléments $N=N_b$.
- $N_{min}=1$: Nombre d'élément minimal.
- $R_e=5$: Résistance électrique (Ω).
- $R_{th}=5$: Résistance thermique ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- $R_{min}=1$: Résistance thermique minimal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- $N_{max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- $Q_{in}=1$: Flux de chaleur d'entrée dans le sous-circuit thermique (W).
- $R_{max}=2$: Résistance thermique maximal ($m^2 \cdot ^\circ K/W$).
- α : Fonction de la température ($V/^\circ K$).
- $C_{max}=180/N_{max}$: Capacité thermique maximal ($j/^\circ K$).
- $C_{min}=40/N_{min}$: Capacité thermique minimale ($j/^\circ K$).
- $C_{th}=20/N$: Capacité du circuit thermique ($j/^\circ K$).
- $C_e=500e-5*N$: Capacité du circuit électrique (j/V).
- $I=0A$: Courant à ($t=0s$) du circuit électrique (A).
- $T_a=300$: Température ambiante ($^\circ K$) [31].

▪ Sous-programme N°1: tension.m

C'est un sous-programme utilisé pour calculer les valeurs des potentiels V_g formés par le générateur thermoélectrique.

-Les conditions initiales pour la température sont:

$$T_{initiale} = T_{ambiante} \quad (\text{eq. III. 39})$$

-Les conditions initiales pour la tension sont :

$$V_i = 0V \quad (\text{eq. III. 40})$$

$$V_g = \sum V(x(2N + N_{max} + N_{min})) \quad (\text{eq. III. 41})$$

- V_g : Potentiel formé par le générateur thermoélectrique (V).
- V : Tension (V).
- $x=0.16$: Longueur du module thermoélectrique (m).
- $N=2$: Nombre d'éléments $N=N_b$.
- $N_{max}=2$: Nombre d'élément maximal.
- $N_{min}=1$: Nombre d'élément minimal [32].

▪ Sous-programme N°2: Sfun.m

Ce sous-programme calcul le coefficient de Seebeck (S) en fonction de la Température T ainsi que le courant généré par le générateur (thermoélectrique). Pour déterminer la qualité du matériau thermoélectrique le facteur du mérite (ZT) ainsi que le rendement de la thermogénération sont calculés au niveau de ce sous-programme.

A- Le coefficient de Seebeck est donné par la relation suivante :

$$S(T) = \alpha(T) = \frac{-\frac{73}{6 \times 10^{10}} T^3 + \frac{129}{2 \times 10^8} T^2 - \frac{47}{15 \times 10^5} T + \frac{21}{5000}}{0.82} \quad (\text{eq. III. 42})$$

- T : Température varie de : 122 jusqu'à 125 °C [33].

Le courant généré (I) par ce générateur thermoélectrique est donné par l'équation suivante (chapitre III: (eq. III. 10)).

$$P = R I^2 \rightarrow I^2 = \frac{P}{R} \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (\text{eq. III. 43})$$

- R : Résistance électrique (Ω).
- P : énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique R (W) [34].

B- Le facteur de mérite est : $ZT = TS^2 \frac{\sigma}{\lambda}$ (eq. III. 44)

- T : la température absolue ($^{\circ}K$).
- S : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient de Seebeck ($V.K^{-1}$).
- σ : la conductivité électrique ($\Omega^{-1}.m^{-1}$).
- λ : la conductivité thermique ($W/m.^{\circ}K$) [35].

C-Rendement de la thermogénération (η)

(η) est défini comme le rapport de la puissance électrique (P) générée par le module, qui doit être la plus élevée possible, et la puissance thermique Q_c absorbée du côté chaud que l'on souhaite minimiser :

$$\eta(\%) = \frac{P}{Q_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \times \frac{\sqrt{(1 + ZT)} - 1}{\sqrt{(1 + ZT)} + \frac{T_f}{T_c}} \times 100 \quad (\text{eq. III. 45})$$

ZT : le facteur de mérite.

T_c : température côté chaud ($^{\circ}K$).

T_f : température côté froid ($^{\circ}K$) [36].

3.3.2. Simulation de notre générateur par le modèle de des éléments finis par le Matlab

Dans les travaux de réalisation d'un générateur thermoélectrique, un ventilateur a été utilisé pour refroidir ce dernier au cours de la génération du courant électrique avec une vitesse de refroidissement variant de 0 à 12m/s [37].

Le tableau suivant représente les paramètres d'entrés, les paramètres calculés puis tracés par Matlab :

Paramètres d'entrés	Valeurs						
Temps t (s)	0	500	1000	1500	2000	2500	4000
Température T(°C)	122	122.5	123	123.5	124	124.5	125
Vitesse de refroidissement V (m/s)	0	2	4	6	8	10	12
Paramètres Calculés par Matlab	Q	Énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique (W)					
	ZT	Facteur de mérite					
	η	Rendement thermoélectrique (%)					
	I	Courant généré par le générateur (A)					
	V _g	Tension générée par le générateur (V)					
Courbe tracé par Matlab	Q=f (t)	L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction du temps					
	ZT=f (T)	Le facteur de mérite en fonction de la température					
	η =f (T)	Le rendement en fonction de la température					
	Q=f (T)	L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la température					
	Q=f (V)	L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la vitesse de refroidissement					
	I=f (V)	Le courant généré en fonction de la vitesse du refroidissement					
	I=f (T)	Le courant généré en fonction de la température					
	V _g =f (T)	La tension en fonction de la température					

Tableau III- 1: Paramètres d'entrés, paramètres calculés et puis tracés par Matlab [37].

3.4. Interprétation des résultats de la simulation

3.4.1. L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction du temps : $Q=f(t)$

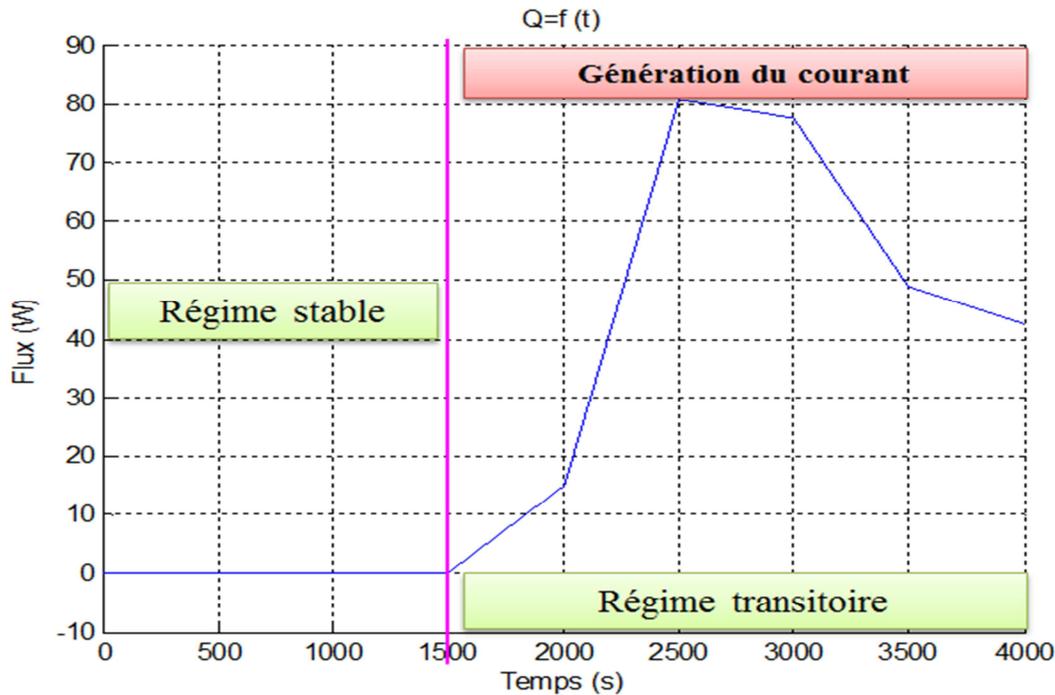


Figure III-12 : Énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction du temps : $Q=f(t)$

La caractéristique de l'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction du temps de la simulation est croissante jusqu'à une valeur maximale du flux $Q_{\max}=80.8965\text{W}$ et puis décroissante.

Dans le régime stable, on a $Q=\text{constante} \approx 0\text{W}$, pour t variant de 0 à 1500s.

La génération du courant se fait durant le régime transitoire pour une valeur du temps est égale à 1500s.

Le comportement en général dépend du temps du système, ceci est dû essentiellement à la capacité thermique des dissipateurs de la chaleur et aussi à ceux de l'effet Joule de la résistance électrique.

3.4.2. La tension en fonction de la température: $V_g=f(T)$

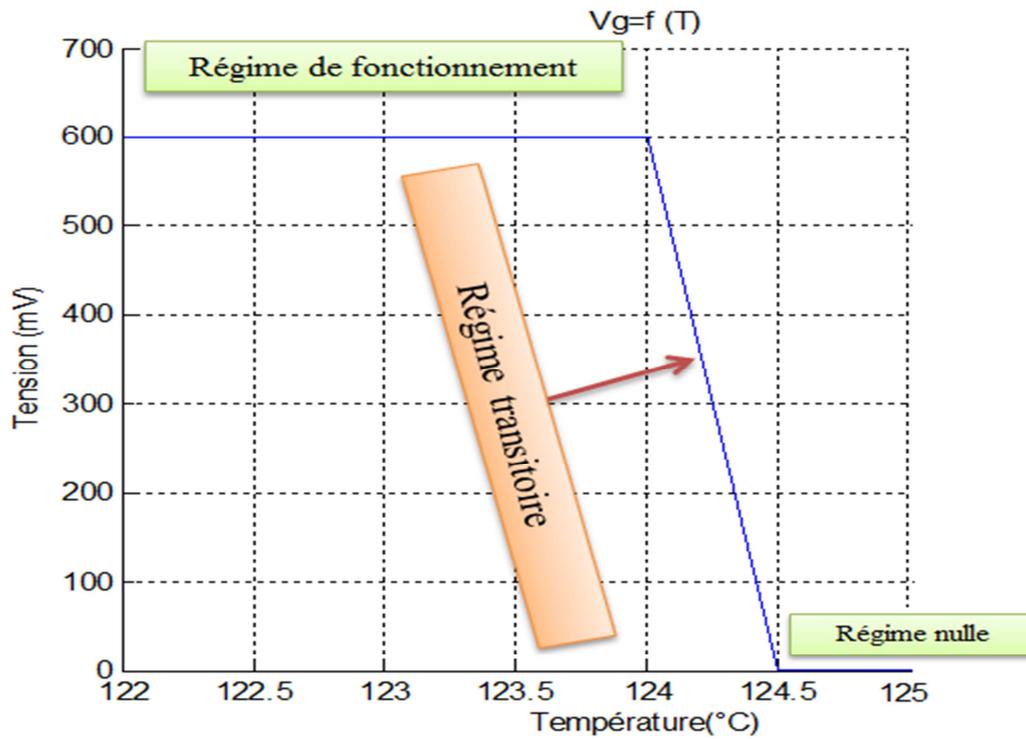


Figure III-13 : Tension en fonction de la température: $V_g=f(T)$

La courbe de tension en fonction de la température est une courbe non linéaire comporte deux partie : on déduit que le coefficient de Seebeck S du matériau est sensible à la température (T).

3.4.3. Le facteur de mérite en fonction de la température: $ZT=f(T)$

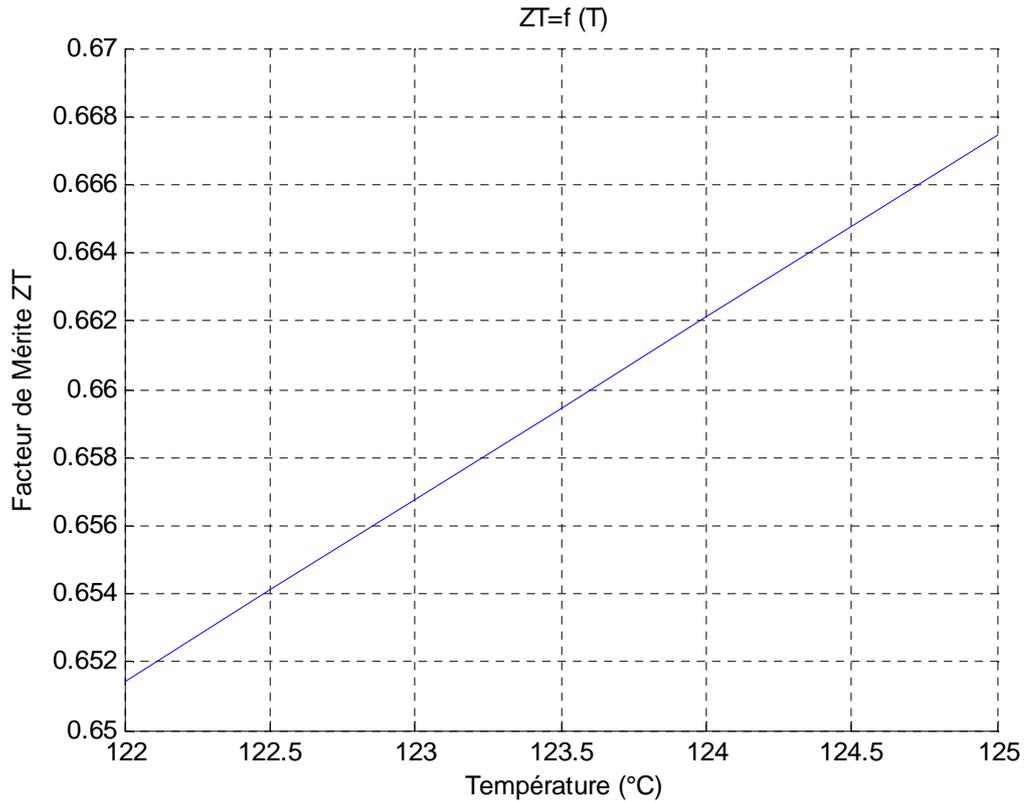


Figure III- 14 : Le facteur de mérite en fonction de la température: $ZT=f(T)$

Le facteur de mérite dépend linéairement avec la température jusqu'à une certaine valeur, la valeur maximale du facteur de mérite est égale à 0.667, représentant la valeur théorique du matériau utilisé (le tellure de plomb et ses dérivés (Pb, Sn) Te)).

3.4.4. Le rendement en fonction de la température: $\eta=f(T)$

La variation du rendement simulé de notre générateur en fonction de la température est donnée par la figure suivante :

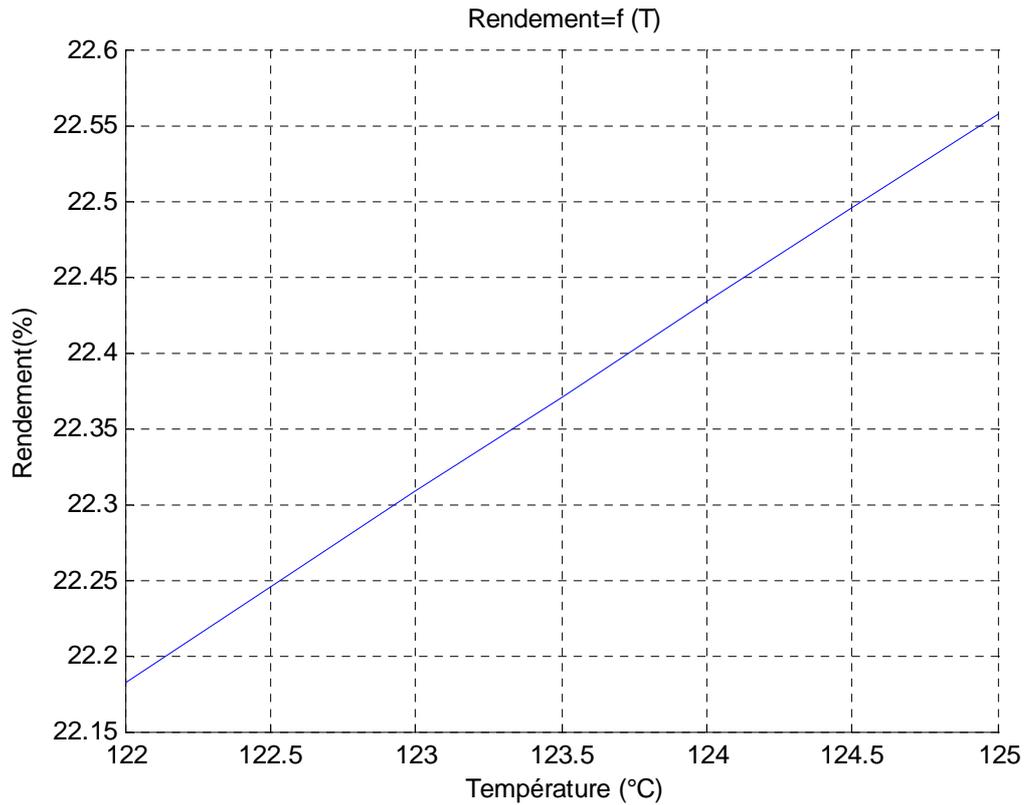


Figure III- 15 : Le rendement en fonction de la température: $\eta = f(T)$

D'après la simulation, le rendement varie linéairement avec la température.

La valeur maximale du rendement est de 22.552%, donc 22.552% de l'énergie thermique est transférée en énergie électrique grâce au module thermoélectrique d'une longueur x de l'ordre de 0.16m.

3.4.5. L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la température: $Q=f(T)$

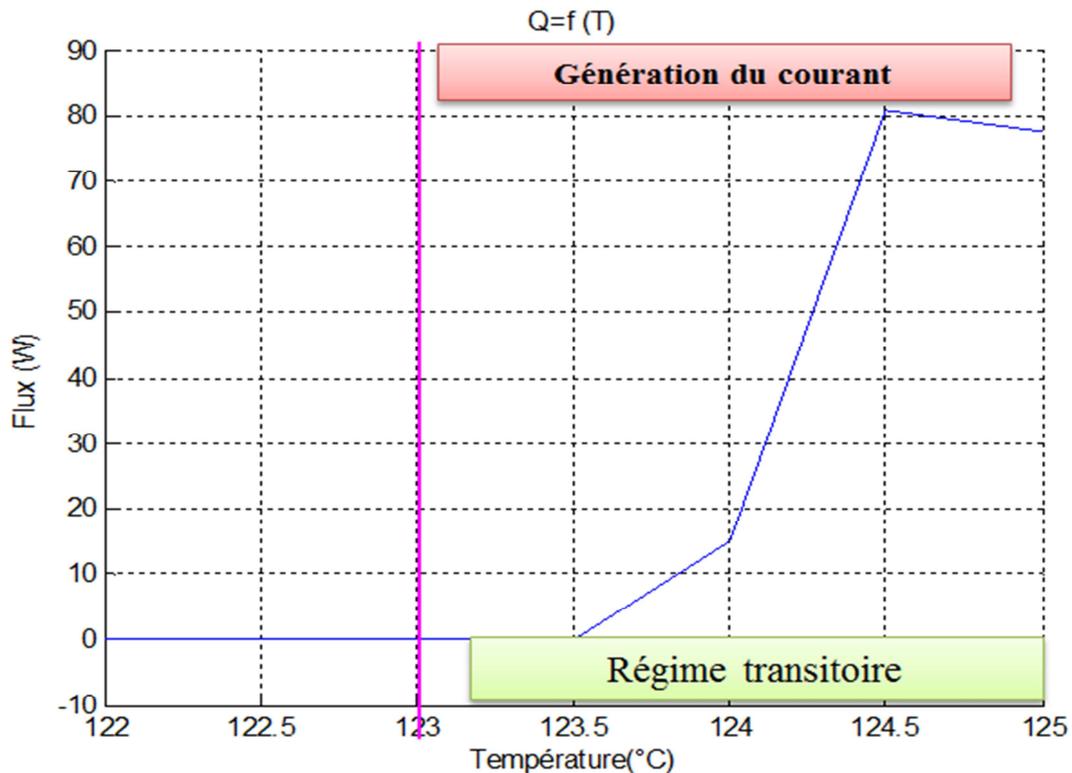


Figure III- 16 : Énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la température: $Q=f(T)$

La caractéristique de l'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la température est une courbe croissante jusqu'à une valeur maximale du flux ($Q_{\max}=80.4\text{W}$) et puis décroissante donc on peut dire que la thermoélectricité est un effet non linéaire de la température.

3.4.6. L'énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la vitesse de refroidissement: $Q=f(V)$

On s'est intéressé à l'énergie recueillie aux bornes de la résistance en fonction de la vitesse de refroidissement qui n'est autre que la vitesse du ventilateur. Cette variation est illustrée par la figure suivante.

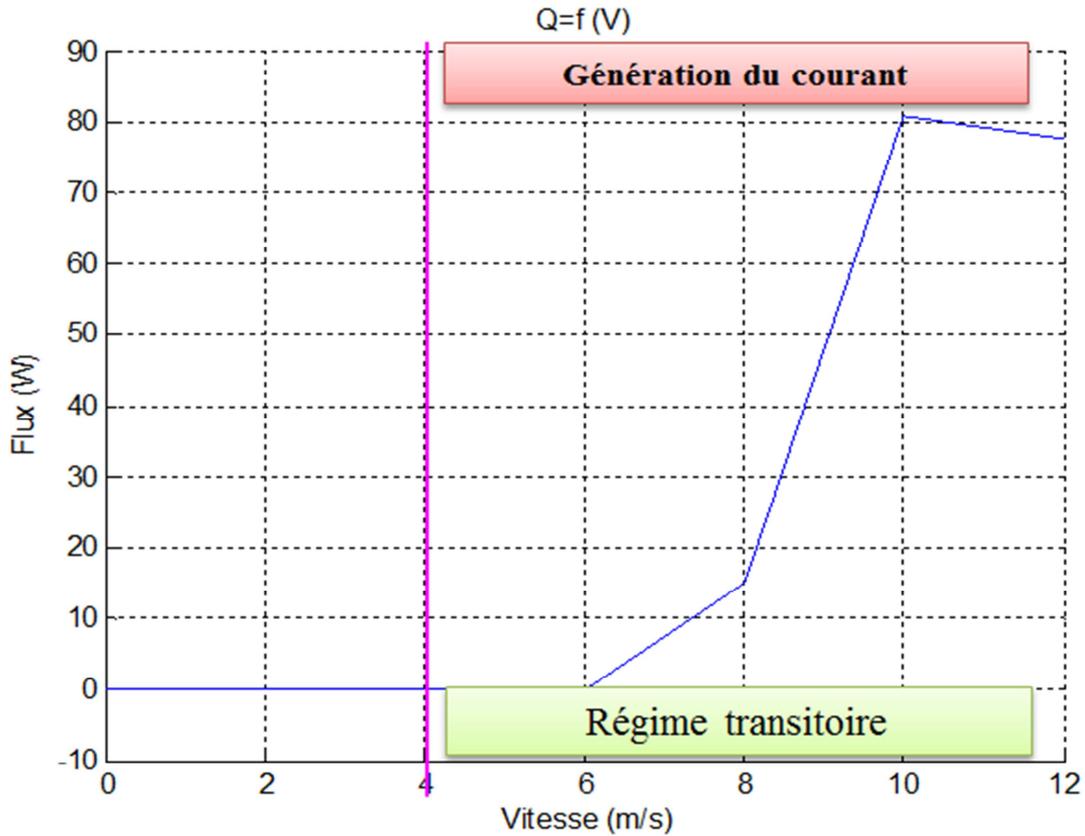


Figure III- 17 : Énergie recueillie aux bornes de la résistance électrique en fonction de la vitesse de refroidissement: $Q=f(V)$

La courbe montre que la chaleur à travers le module thermoélectrique est une fonction de la vitesse du ventilateur, la génération du courant commence à une vitesse de refroidissement donnée par le ventilateur de l'ordre de 6m/s.

3.4.7. Le courant généré en fonction de la vitesse du refroidissement: $I=f(V)$

On s'est intéressé à voir comment varie le courant généré par notre générateur en fonction de la vitesse du ventilateur.

Cette variation est reportée dans la figure suivante.

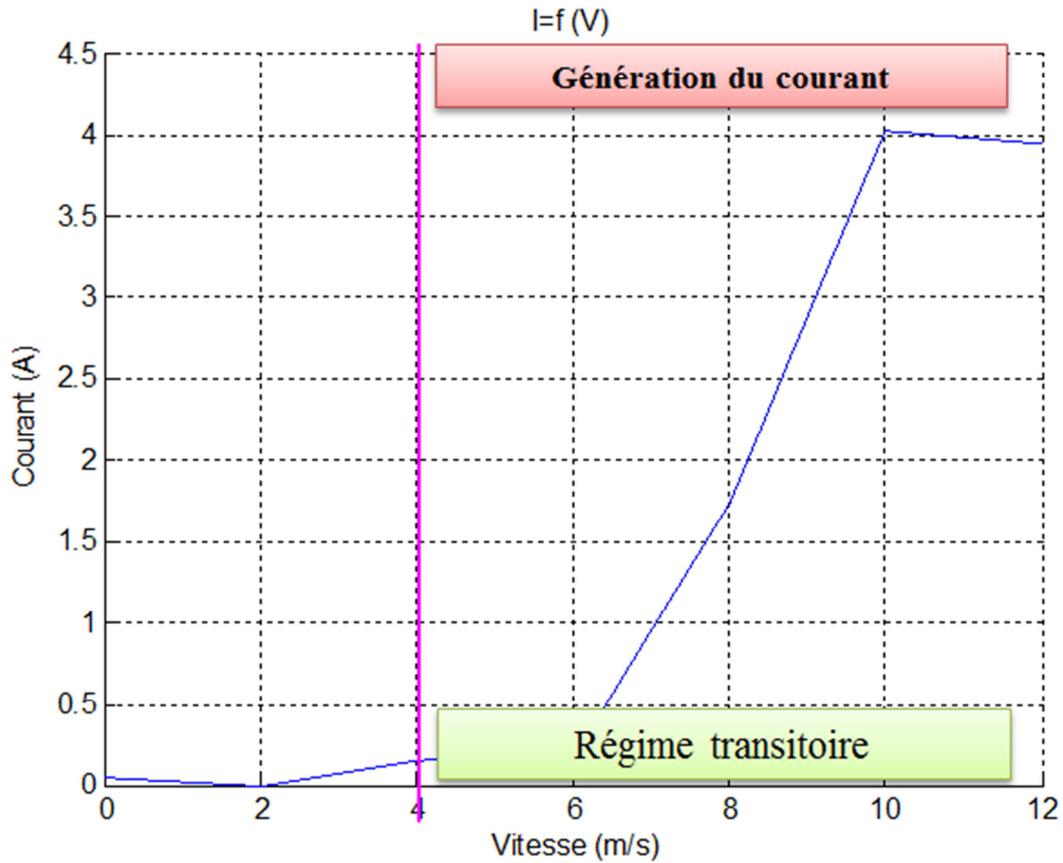


Figure III- 18 : Le courant généré en fonction de la vitesse du refroidissement:

$$I=f(V)$$

La vitesse du ventilateur qui n'est autre que la vitesse de refroidissement du générateur thermoélectrique augmente avec la génération du courant électrique.

3.4.8. Le courant généré en fonction de la température: $I=f(T)$

La caractéristique du courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la température est une courbe croissante, ce dernier atteint une valeur maximale, et puis on constate une décroissance, pour cela on peut dire que la température a un effet non linéaire sur la thermoélectricité (Voir figure III.18).

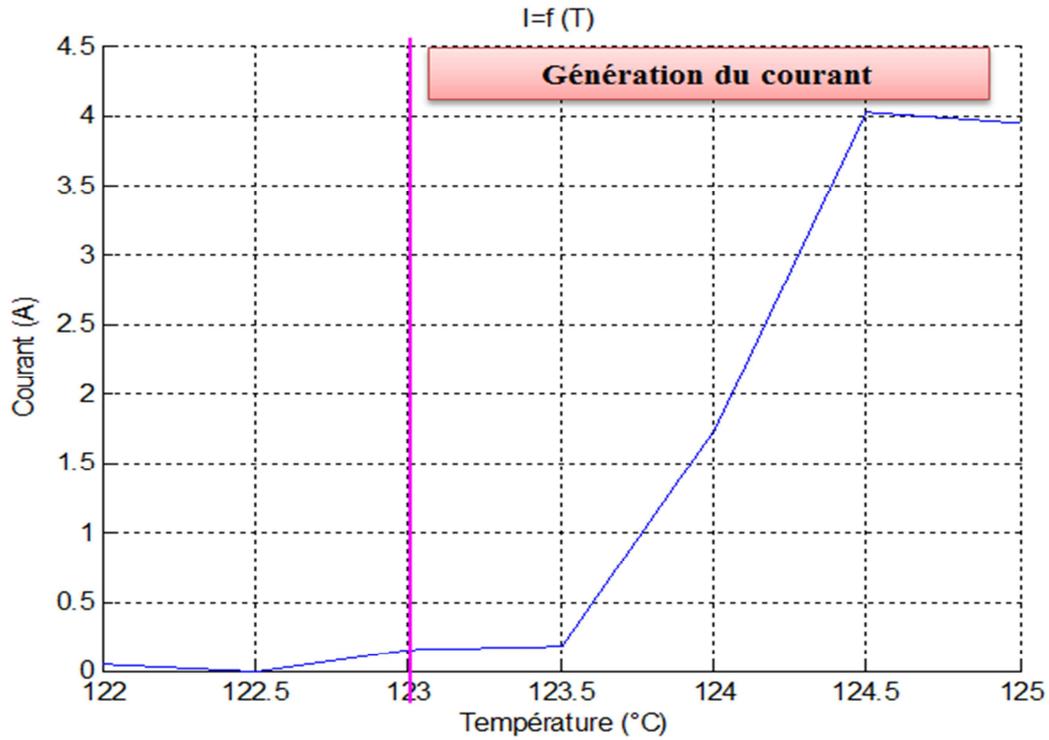


Figure III- 19 : Le courant généré en fonction de la température: $I=f(T)$

3.5. Conclusion

- ✓ La chaleur à travers le module thermoélectrique est une fonction de la vitesse du ventilateur car le refroidissement du générateur thermoélectrique augmente avec l'augmentation de la température pour permettre la génération du courant électrique.
- ✓ Le comportement en général dépend du temps du système, ceci est dû essentiellement à la capacité thermique des dissipateurs de la chaleur et aussi à ceux de l'effet Joule de la résistance électrique.
- ✓ Le temps et la température sont des effets non linéaires sur la thermoélectricité.
- ✓ La valeur maximale du facteur de mérite trouvée correspond à la valeur théorique du matériau étudié.
- ✓ Le facteur de mérite et le rendement dépendent linéairement avec la température.
- ✓ Une grandeur de l'ordre de 22.552% de l'énergie thermique est transférée en énergie électrique grâce à un module thermoélectrique d'une longueur de 0.16m.

Bibliographie

- [1] J.P. Carmo, L.M. Goncalves, R.F. Wolffenbuttel, J.H. Correia. Aplanar thermoelectric power generator for integration in wearable Microsystems. *Sensors and Actuators, A* 161, (2010), p 199.
- [2] W.G.J.H.M Van Sark « *Feasibility of photovoltaic –thermoelctric hybrid moduls* » *Applied Energy* 88, 2785-2790, 2011.
- [3] G.SAVELLI « *Etude et développement de composant thermoélectriques à base de couches minces* ». Thèse de doctorat à l'université JOSEPH Fourier de Grenoble, France, 2007.
- [4] M. COSNIER « *Etude numérique et expérimentale d'un système thermoélectrique destiné au rafraichissement des bâtiments* ». Thèse de doctorat à l'université de Savoie, France 2008.
- [5] I.H. Kim. (Bi,Sb)₂(Te,Se)₃-based thin film thermoelectric generators. *Materials Letters*, 43, (2000), p 221.
- [6] M. Takashiri, T. Shirakawa, K. Miyazaki, H. Tsukamoto. Fabrication and characterization of bismuth–telluride-based alloy thin film thermoelectric generators by flash evaporation method.
- [7] J.P. Carmo, L.M. Goncalves, R.F. Wolffenbuttel, J.H. Correia. A planar thermoelectric power generator for integration in wearable Microsystems. *Sensors and Actuators, A* 161, (2010), p 199. *Sensors and Actuators, A* 138, (2007), p 329.
- [8] C.G.GARAMPON « *réalisation et étude des propriétés thermoélectriques de couches minces et nanofils de types Bi_{2-x}Sb_xTe et Bi₂Te_{3-x}Se_x* » thèse de doctorat à l'université de Grenoble, France, 2011.
- [9] H. Y. CHEN « *Procédés de microfabrication des modules thermoélectriques à base des alliages (Bi, Sb) 2 (Te, Se) 3* », mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées à l'université de Montréal, Canada, 2010.
- [10] H. Y. CHEN « *Procédés de microfabrication des modules thermoélectriques à base des alliages (Bi, Sb) 2 (Te, Se) 3* », mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées à l'université de Montréal, Canada, 2010.

- [11] W.G.J.H.M Van Sark « *Feasibility of photovoltaic –thermoelctric hybrid moduls* » Applied Energy 88, 2785-2790, 2011.
- [12] V.RICHOUX « *Elaboration électrochimique en mode pulse de Tellure de Bismuth Bi_2Te_3 et de l'alliage ternaire $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$* ». Thèse de doctorat à l'université de PAUL VERLINE-METZ, France, 2008.
- [13] K. HOUMMADA « *Etude de la redistribution des dopants et des éléments d'alliages lors de la formations des siliciures* » thèse de doctorat à l'université Paul CEZANE Aix Marseille, France, 2007.
- [14] A.LINDER « *la Thermoélectricité* » presse universitaire de France n°1381, 1970.
- [15] M. Ait Hamouda, K. Ziouche, M. Haffar « *Etude du pouvoir thermoélectriques de couches de polysilicium dopées N et P de 20 à 450°C* », Institut d'électronique et microélectronique et de nanotechnologie IEMN, 2010.
- [16] V.D.ROS « *Les skutterudites : matériaux thermoélectriques performants pour la génération d'électricité* » matériaux 13-17 Novembre, Dijon, France, 2006.
- [17] C.G.GARAMPON « *Réalisation et étude des propriétés thermoélectriques de couches minces et nanofils de types $Bi_2-XSb_xTe_3$ et Bi_2Te_3-xSex* ». Thèse de doctorat à l'université de Grenoble, France, 2011.
- [18] A.JACQUOT « *Ingénierie des Matériaux et des Microgénérateurs Thermoélectriques Planaires* ». Thèse de Doctorat à l'institut national polytechnique de Lorraine, France, 2003.
- [19] O.Boffoué « *Propriétés microstructurales et thermoélectriques de films minces de bismuth préparés par ablation laser* ». Revue physique appliqué15, 741-747, 2008.
- [20] G.SAVELLI « *Étude et développement de composants thermoélectriques à base de couches minces* ». Thèse de doctorat, université Joseph FOURIER de Grenoble, France, 2007.
- [21] D.Bérardan, E.Alleno, C.Godart « *Mécanosynthèse de skutterudites thermoélectriques* », matériaux 2006, 13-17 novembre, Dijon, France.
- [22] P.X.Zhang « *New thermoelectric materials and new applications* ». Institute of advanced materials for photo electronics, volume 27 n°1, 2004.
- [23-33] Marc D. Ulrich, William F. Seng, and Peter A. Barnes. «One-dimensional modeling of TE devices considering temperature-dependent parameters using SPICE". In: Journal of Computational Electronics 1.3 (2002), pp. 431-434.

[34] D.Bérardan, E.Alleno, C.Godart « *Mécanosynthèse de skutterudites thermoélectriques* », matériaux 2006, 13-17 novembre, Dijon, France.

[35] S. Priya et D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies. Springer, 2008.

[36] V.D.ROS « *Les matériaux thermoélectriques performants pour la génération d'électricité* » matériaux 13-17 Novembre, Dijon, France, 2006.

[37-38] Marc D. Ulrich, William F. Seng, and Peter A. Barnes. "One-dimensional modeling of TE devices considering temperature-dependent parameters using SPICE". In: Journal of Computational Electronics 1.3 (2002), pp. 431-434.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Les objectifs de notre travail sont l'étude et la modélisation d'un générateur thermoélectrique. Ainsi, après avoir donné, dans un premier chapitre, une présentation générale des effets et notions de base 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 la modélisation et au dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique.

Notre simulation est basée sur l'étude de la thermoélectricité, ainsi que les effets thermoélectriques tels que l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson. On s'intéresse principalement à l'optimisation de plusieurs paramètres, dont le facteur de mérite afin d'avoir un bon matériau thermoélectrique et donc par conséquent un facteur de mérite ZT élevé.

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.

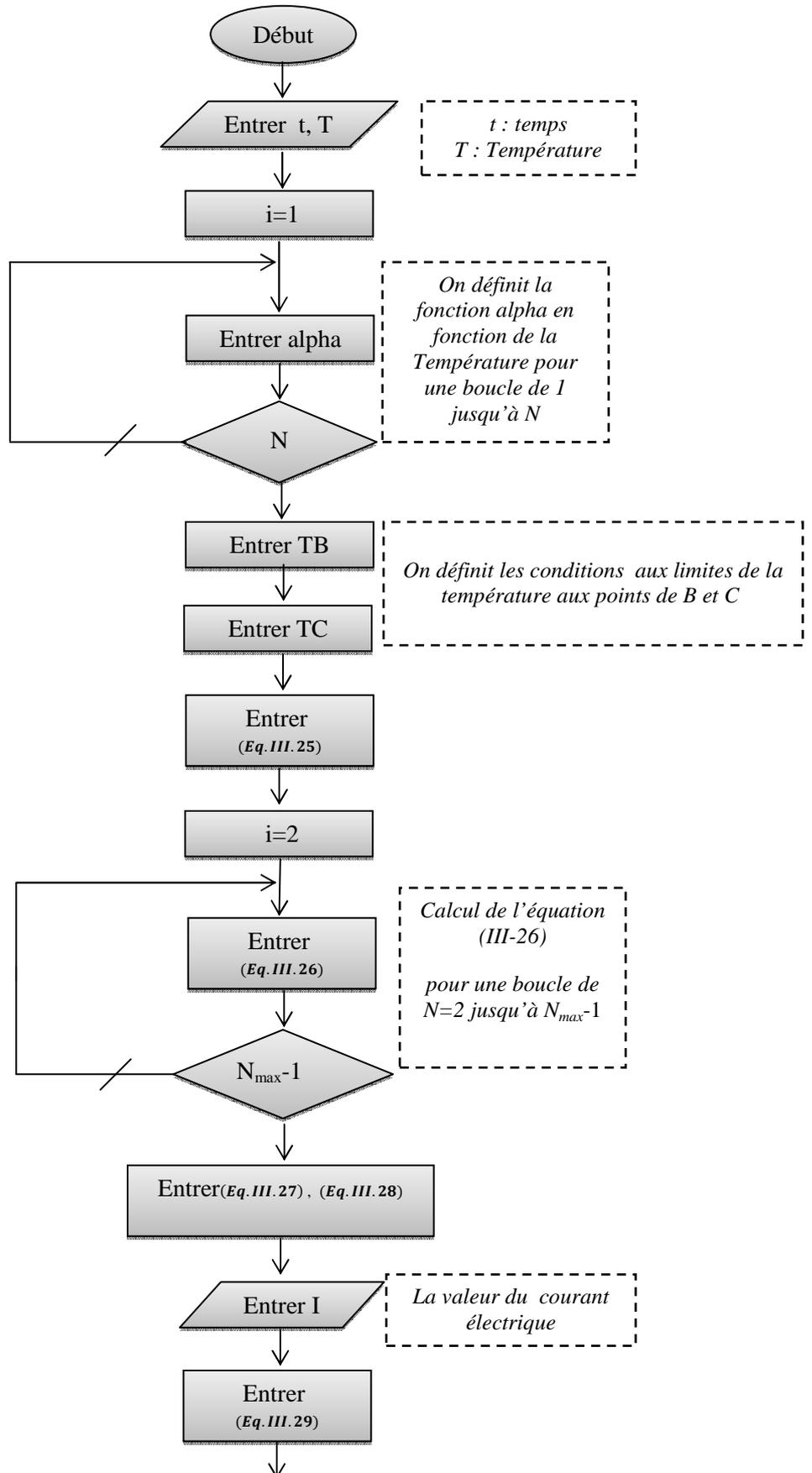
Notre modélisation et dimensionnement par Matlab du générateur thermoélectrique, en utilisant le modèle des éléments finis permet de conclure que :

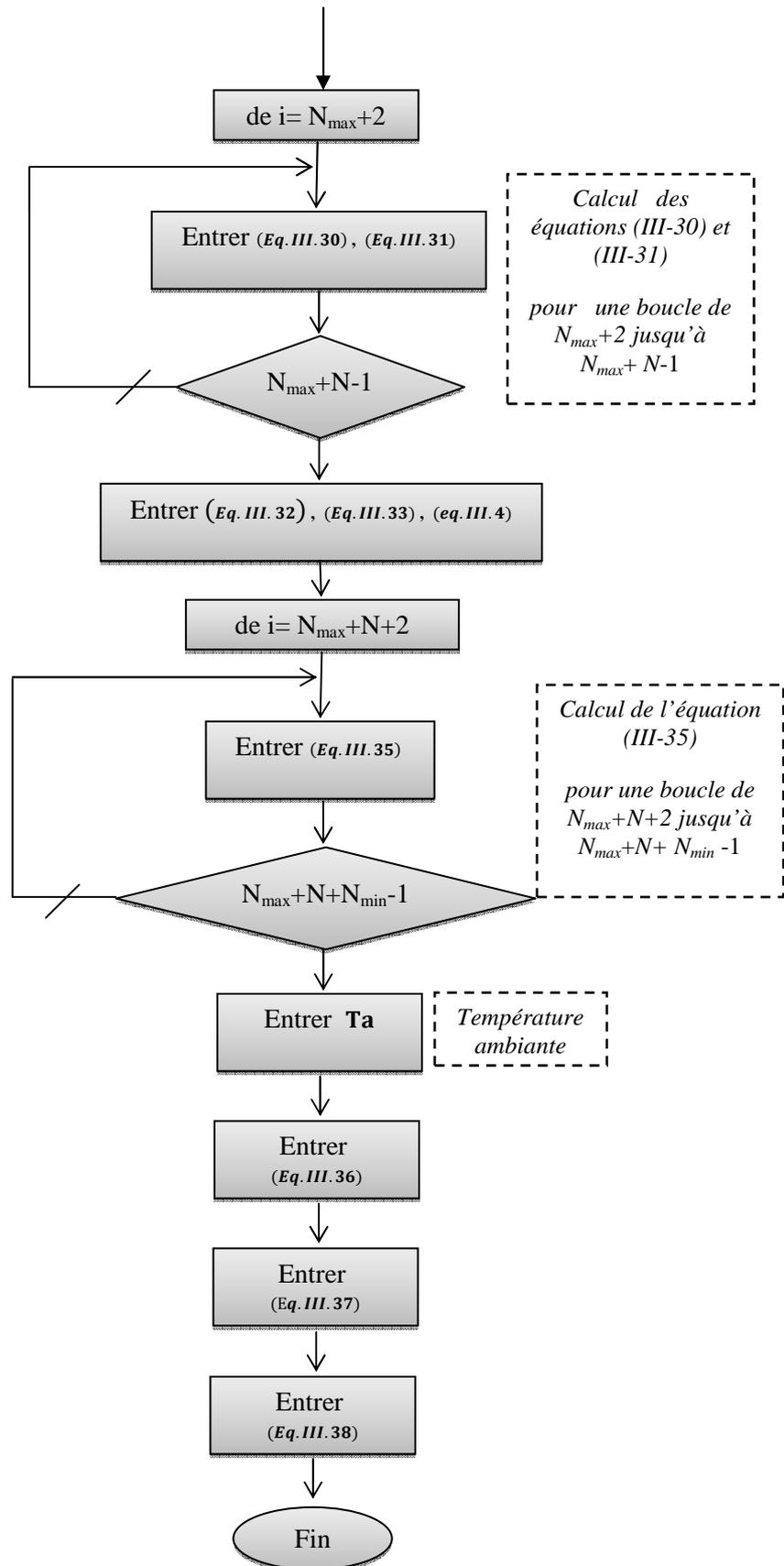
- ❖ *La chaleur à travers le module thermoélectrique est une fonction de la vitesse du ventilateur.*
- ❖ *Le comportement en général dépend du temps du système, ceci est dû essentiellement à la capacité thermique des dissipateurs de la chaleur et aussi à ceux de l'effet Joule de la résistance électrique.*
- ❖ *La valeur maximale du facteur de mérite trouvée correspond à la valeur théorique du matériau étudié.*
- ❖ *Le facteur de mérite et le rendement dépendent linéairement de la température.*
- ❖ *Une partie de l'ordre de 22.6824% de l'énergie thermique est transférée en énergie électrique grâce à un module thermoélectrique d'une longueur $x=0.16m$.*

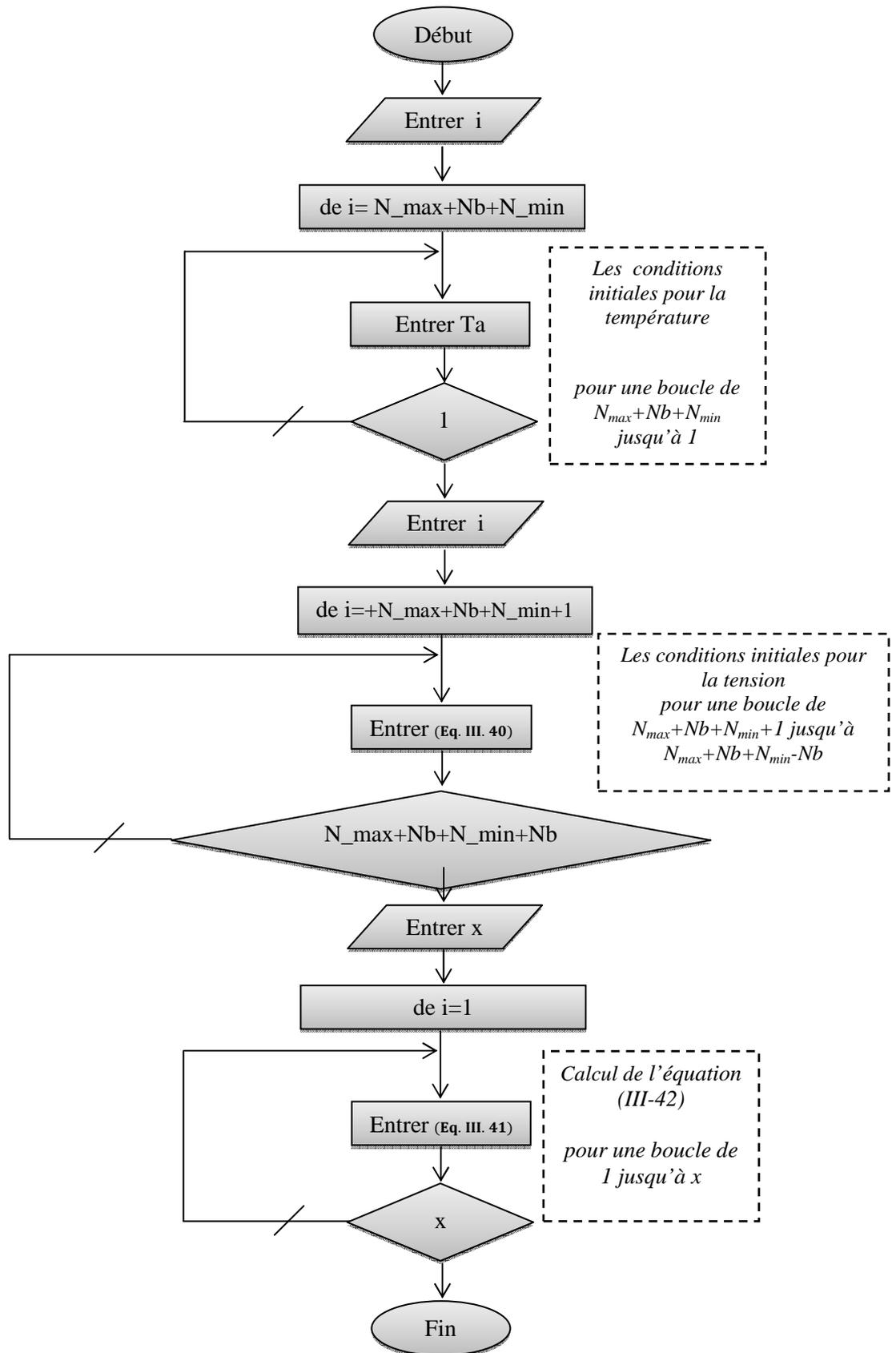
Comme perspectives nous envisageons la réalisation d'un générateur thermoélectrique.

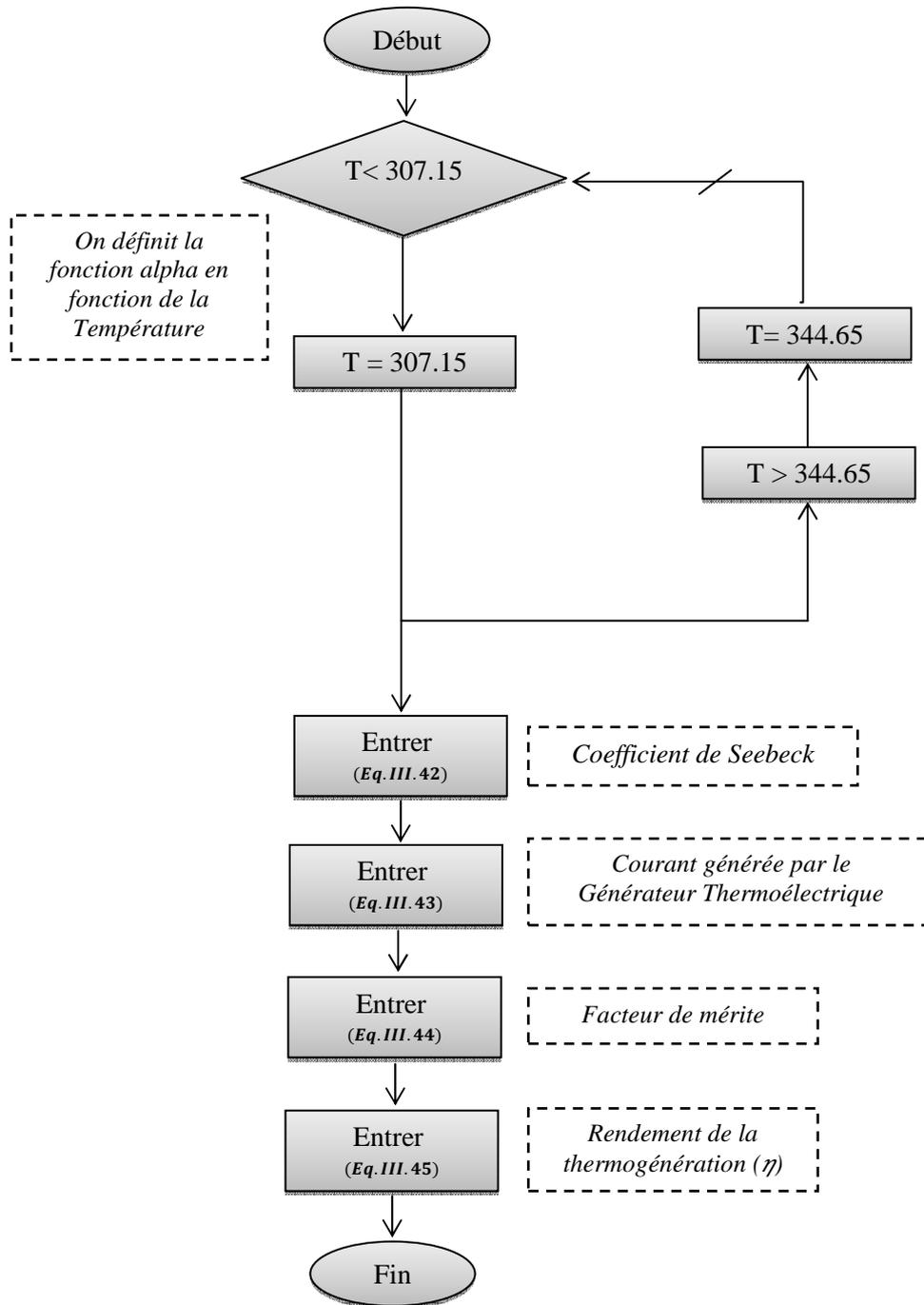
- Ceci est essentiellement motivé par la découverte des nouveaux matériaux possédant des performances accrues.
- L'inconvénient majeur des cellules photovoltaïques est lié à leur rendement. En effet, seule une partie du rayonnement incident peut être convertie en électricité, de plus les radiations non converties échauffent le panneau ce qui réduit encore le rendement. Une solution à ce problème est un module hybride thermoélectrique-photovoltaïque permettant d'obtenir un bon rendement.

- Les organigrammes des programmes

A- Organigramme du 1^{er} programme:



B- Organigramme du 2^{ème} programme:

C- Organigramme du 3^{ème} programme:

-Les Algorithmes des programmes

A- Algorithme du 1^{er} programme:

- 1) Début ;
- 2) Entrer t, T (les valeurs du temps et de la température) ;
- 3) La fonction alpha en fonction de la Température
- 4) Entrer i ;
de $i=1$ jusqu'à $i=N$, calculé alpha;

- 5) Les conditions aux limites pour la température aux points de B et C
 - a- Entrer TB ;
 - b- Entrer TC ;

- 6) Entrer l'équation (eq. III. 25) ;

- 7) On définit l'équation (III-26) pour une boucle de 2 jusqu'à $N_{\max}-1$
de $i=2$ jusqu'à $i= N_{\max}-1$, entrer l'équation (eq. III. 26);

- 8) Enter les équations (eq. III. 27) , (eq. III. 28) ;
- 9) La valeur du courant électrique
Enter la valeur de I ;

- 10) Entrer l'équation (eq. III. 29) ;
- 11) On définit l'équation (III-26) pour une boucle de 2 jusqu'à $N_{\max}-1$
de $i= N_{\max}+2$ jusqu'à $i= N_{\max}+N-1$, enter les équations(eq. III. 30) , (eq. III. 31) ;

- 12) Entrer les équations : (eq. III. 32) , (eq. III. 33) , (eq. III. 4) ;
- 13) On définit l'équation (III-26) pour une boucle de 2 jusqu'à $N_{\max}-1$
de $i= N_{\max}+N+2$ jusqu'à $i= N_{\max}+N+N_{\min}-1$, enter l'équation (eq. III. 35) ;

- 14) La valeur de la température ambiante
Enter la valeur de T_a ;

- 15) Entrer l'équation (eq. III. 36) ;
- 16) Entrer l'équation (eq. III. 37) ;
- 17) Entrer l'équation (eq. III. 38) ;

- 18) Fin.

B- Algorithme du 2^{ème} programme:

- 1) Début ;
- 2) On définit les conditions initiales pour la température pour une boucle de
 $N_{\max}+N_b+N_{\min}$ jusqu'à 1
de $i= N_{\max}+N_b+N_{\min}$ jusqu'à $i=1$, enter l'équation $T=T_a$;

- 3) Entrer i ;

- 4) On définit les conditions initiales pour la tension (équation 40) pour une boucle de $N_{\max}+Nb+N_{\min}+1$ jusqu'à $N_{\max}+Nb+N_{\min}-Nb$

de $i=N_{\max}+Nb+N_{\min}+1$ jusqu'à $i= N_{\max}+Nb+N_{\min}+Nb$ enter l'équation (eq. III. 40);
- 5) Entrer x ;
- 6) On définit l'équation (III-42) pour une boucle de 1 jusqu'à x
de $i=1$ jusqu'à $i= x$ enter l'équation (eq. III. 41) ;
- 7) Fin.

C- Algorithme du 3^{ème} programme :

- 1) Début ;
- 2) On définit la fonction alpha en fonction de la Température pour une boucle our calculer le coefficient de Seebeck est donné par l'équation 42

Pour $T < 307.15$, donc $T = 307.15$
Sinon $T > 344.65$, donc $T= 344.65$;
- 3) Entrer l'équation (eq. III. 42) ; « Coefficient de Seebeck »
- 4) Courant générée par le Générateur Thermoélectrique
Entrer l'équation (eq. III. 43) ;
- 5) Facteur de mérite
Entrer l'équation (eq. III. 44) ;
- 6) *Rendement de la thermogénération*
Entrer l'équation (eq. III. 45) ;
- 7) Fin [23].

ملخص

منذ أوائل 1990 تجدد الاهتمام بالكهرباء الحرارية، خصوصا بسبب ظهور المخاوف البيئية نظرا للغازات المستخدمة في التبريد والانبعاثات المسببة للاحتباس الحراري والرغبة في تطوير مصادر الطاقات البديلة.

تكوين تيار بفضل الكهرباء الحرارية يبدو مثيرا للاهتمام لأنه سوف يخفف من مشاكل مصدر الطاقة الحالية، وسوف يمكننا من الاستفادة من كميات هائلة من الحرارة التي تولدها السيارات،..... إلى طاقة مفيدة.

أهداف العمل لدينا هي تصميم و نمذجة مولد الحرارة. وهكذا، بعد إدخال أساسيات كهرباء حرارية من المشاركة أيضا الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الحرارية والتطبيقات الحرارية الحالية، وتهتم في النمذجة والتصميم بواسطة ماتلاب من مولد الحرارة.

الكلمات الدالة: كهرباء حرارية، المواد، الميزات.

Résumé

Depuis le début des années 1990, un regain d'intérêt pour la thermoélectricité est apparu, 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. La génération de courant par effet thermoélectrique apparaît comme une source intéressante pour soulager les problèmes énergétiques actuels, en mettant à profit la transformation des énormes quantités de chaleur perdues dégagées par exemple par les voitures,.....en énergie utile.

Les objectifs de notre travail sont l'étude et la modélisation d'un générateur thermoélectrique. 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, on s'est intéressé à la modélisation et au dimensionnement par Matlab d'un générateur thermoélectrique.

Mots clés : Thermoélectricité, Matériaux, Caractéristiques.

Abstract

Since the early 1990, a renewed interest in thermoelectricity appeared, especially due to the emergence of environmental concerns gases used in refrigeration and emissions of greenhouse gas emissions and the desire to develop alternative sources of energy.

The current generation by thermoelectric effect appears as an interesting relieve current energy source problems, leveraging the processing huge amounts of waste heat generated by example cars,.... into useful energy.

The objectives of our work are the design and modeling of a thermoelectric generator. Thus, after introducing the basics of thermoelectricity from also review the physical and chemical properties of thermoelectric materials and thermoelectric current applications, is interested in the modeling and design by Matlab of a thermoelectric generator.

Key words: Thermoelectricity, Materials, Characteristics.