



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES ELECTRONIQUE



N° d'ordre : M/GE/2019

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : électrotechnique industrielle

Par

- **BENCHAA Batoul**
- **ATTOU Oussama**

Simulation et étude d'un module générateur thermoélectrique par le code COMSOL

Soutenu le

06/2020 devant le jury composé de :

Président :	Mr. Abdelkader BOUKORTT	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. Mourad BENDAHA	MAA	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. Mustapha REBHI	MAA	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mr. Saïd MESKINE	MCA	Université de Mostaganem
Co-Encadreur :	Mr. Mohammed Ridha BENZIDANE	Doctorant	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



Remerciements

En premier nous remercions le DIEU tout puissant de nos avoir données le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

*Nous remercions notre encadreur Monsieur **MESKINE Saïd** maitre de conférence au département Génie Electrique, Faculté des sciences et Technologie à l'Université Abd El Hamid Ibn Badis Mostaganem, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses encouragements et ses conseils judicieux tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

Qu'il trouve ici le témoignage de nos profonde reconnaissance.

*Nous remercions énormément Monsieur **Mohammed Ridha BENZIDANE** pour avoir accepté d'être nos Co-encadreur et pour l'aide précieuse qu'il nous apportée.*

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

*Monsieur **Abdelkader BOUKORTT** Professeur à l'Université Sciences et Technologie de Mostaganem, pour avoir accepté de présider le jury.*

*Monsieur **Mourad BENDAHA** et Monsieur **Mustapha REBHI** enseignants au département Génie Electrique à l'Université des Sciences et Technologie de Mostaganem, recevront notre reconnaissance pour nous avoir enseignés, tout en leur exprimant notre profond respect et pour avoir acceptés d'examiner ce travail.*

Nous tenons à remercier profondément tous les enseignants et Administrateurs du département Génie Electrique et Sans oublier bien évidemment nos camarades de promos d'électrotechnique industrielle (2019-2020) qu'ils ont démontré à nos égard durant ces deux années. Nos vifs remerciements d'un grand de personnes (nos parents, nos sœurs, et nos amis proches).

Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dedicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que ...

Je dédie cette travail...

A MES CHÈRES PARENTS


Qu'elle Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération Pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, ma vie et mon bonheur. Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études...maman que j'adore

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, merci pour tout le soutien et l'amour qui tu m'a témoigné depuis mon enfance et j'espère que ton bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez..... Mon père

A Mon grand-père. Je vous dédie cet travail en témoignage de gratitude d'estime et d'attachement. Puisse dieu vous accorder santé, longue vie.

A mes chères sœurs AICHA, ma sœur aînée, ma deuxième mère, mes secrets trésor, AMEL, la douce et au cœur si grand, Mon âme sœur, et ma douceur et la joie de mon cœur ISRAA.

A decorative border of vibrant red roses with green leaves frames the corners of the page. The roses are in various stages of bloom, creating a romantic and elegant atmosphere.

*A mes amies **Nadia, Yamna, Kawter, Jamal , Akrem** et mon binôme **Oussama** je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs, des frères et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble.*

*A toute mes familles **BENCHAA** et **SAIDI**.*

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur...

BENCHAA BATOUL



Dédicace

Je dédie se travail ...

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

À tous ceux qui m'ont accompagné dans ma carrière universitaire Mes meilleurs amis : Salah. hachen. Kawtar. Nadia et mon binôme Batoul.

A tout ma famille Attou.

ATTOU Oussama

RESUME

Depuis le début des années 1990, un regain d'intérêt pour l'électricité thermique est apparu, en raison notamment de l'émergence de préoccupations environnementales concernant l'utilisation des gaz à effet de serre, ainsi que de la volonté de développer des sources d'énergie alternatives. Alors les effets thermiques comme une source intéressante pour atténuer les problèmes énergétiques actuels, en apportant des bénéfices en transformant en grandes quantités de la chaleur perdue, par les voitures comme exemple, en énergie utile. Dans cette étude nous avons simulé et étudié l'effet thermoélectrique à travers de différentes géométries de thermocouple ainsi qu'un module thermoélectrique composé de 9 thermocouples. L'étude des différentes géométries (rectangulaire et cylindrique) du thermocouple nous a permis de suivre le comportement des paramètres électriques (courant, tension) et thermiques (température) en fonction du temps. Cette étude nous a révélé que tous les paramètres possèdent un temps relativement court pour atteindre l'équilibre. Un facteur très dominant pour l'amélioration des performances des modules thermoélectriques. Nous avons aussi calculé le rendement d'un module thermoélectrique composé de 9 thermocouples étudiés précédemment. Un rendement trouvé trop faible à cause principalement de la faible taille du thermocouple et leur nombre réduit (seulement 9).

Mots clés : thermoélectricité, générateur thermoélectrique, Bi_2Te_3 , COMSOL.

ABSTRACT

Since the early 1990s, a renewed interest in thermal electricity has appeared, due in particular to the emergence of environmental concerns regarding the use of greenhouse gases, as well as the desire to develop sources alternative energy. Then thermal effects as an interesting source to alleviate the current energy problems, bringing benefits by transforming in great quantities of the waste heat, by the cars as example, into useful energy. In this study we simulated and studied the thermoelectric effect through different thermocouple geometries as well as a thermoelectric module composed of 9 thermocouples. The study of the different geometries (rectangular and cylindrical) of the thermocouple allowed us to follow the behavior of the electrical (current, voltage) and thermal (temperature) parameters as a function of time. This study revealed to us that all parameters have a relatively short time to reach equilibrium. A very dominant factor for improving the performance of thermoelectric modules. We also calculated the efficiency of a thermoelectric module composed of 9 thermocouples studied previously. A yield found too low mainly due to the small size of the thermocouple and their reduced number (only 9).

Key words: thermoelectricity, thermoelectric generator Bi_2Te_3 , COMSOL.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTSII
DÉDICACEIII
RESUMEIV
ABSTRACTV
TABLE DES MATIÈRESVI
LISTE DES TABLEAUXVII
LISTE DES FIGURESVIII
LISTES DES PRINCIPAUX SYMBOLES ET ABRIVIATIONSIX
INTRODUCTION GENERALE 01

CHAPITRE I : Thermoélectricité

I.1 INTRODUCTION04
I.2 Phénomènes thermoélectriques04
I.3 Les effets thermoélectriques.....04
I.3.1 L'effet SEEBECK
 I.3.1.1 Définition.....04
 I.3.1.2 Explication du phénomène.....05
I.3.2 L'effet Peltier
 I.3.2.1 Définition.....06
 I.3.2.2 Explication du phénomène.....07
I.3.3 L'effet Thomson
 I.3.3.1 Définition.....08
 I.3.3.2 Explication du phénomène.....08

TABLE DES MATIÈRES

1.4 Performances et interdépendance des grandeurs.....	09
I.4.1 La conductivité électrique « ρ ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) »	09
I.4.2 Conduction thermique « λ ($W/m \cdot ^\circ K$) »	09
I.4.3 Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques	09
1.5 Les matériaux thermoélectriques	10
1.6 Le choix des matériaux thermoélectriques	11
1.7 Dispositifs à base de Bi_2Te_3	12
I.7.1 Dispositifs à base de Bi_2Te_3 massif	12
I.7.2 Dispositifs à base des couches minces de Bi_2Te_3	13
I.7.3 Dispositifs à base de μ -poudre de Bi_2Te_3	15
1.8 Les applications de la thermoélectricité	15
I.8.1 Refroidissement	16
I.8.2 Générateur de Puissance	16
1.9 Les applications future	18
1.10 Générateur thermoélectrique utilisant de la chaleur perdue	18
I.10.1 Secteur automobile	19

CHAPITRE II : fonctionnement d'un module générateur thermoélectrique

II.1 INTRODUCTION	21
II.2 Dispositifs thermoélectriques	21
II.3 Principe d'un dispositif thermoélectrique	21
II.4 Les deux modes d'un thermocouple	22
II.5 Configuration des modules thermoélectriques	22
II.6 Thermocouples	23

TABLE DES MATIÈRES

II.7 Modules générateurs thermoélectriques (MGT)	25
II.8 Architecture du générateur (MGT)	26
II.8.1 Géométrie perpendiculaire	26
II.8.2 Géométrie planaire	27
II.9 Les modes de fonctionnement	28
II.10 Modélisation du générateur thermoélectrique	30
II.10.1 Le rendement du MGT	34

CHAPITRE III : Design et simulation du modèle MGT

III.1 INTRODUCTION	36
III.2 Utilisation d'un logiciel éléments finis	36
III.3 Description du logiciel « COMSOL Multiphysics »	36
III.4 Simulation COMSOL Multi Physique le MGT	37
III.5 L'interface graphique de COMSOL (Les étapes de simulation)	40
III.5.1 Détails techniques.....	42
III.6 Résultats de simulation	46
III.7 Simulation	46
III.7.1 Architecteur Thermocouple a des pattes rectangulaires	47
III.7.2 Architecteur Thermocouple a des pattes cylindriques	49
III.7.3 Architecteur de générateur thermoélectrique porte neuf thermocouple	50
III.8 Résultats des simulations et discussion.....	53
III.8.1 Etude du thermocouple	53
III.8.1.1 Influence de la variation de la longueur des pattes.....	53
III.8.1.1.1 Géométrie rectangulaire.....	53

TABLE DES MATIÈRES

III.8.1.1.2 Géométrie cylindrique	54
III.8.1.1.3 Remarques	56
III.8.1.2 Influence de la variation de la distance entre les pattes..	57
III.8.1.2.1 Géométrie rectangulaire	57
III.8.1.2.2 Géométrie cylindrique	58
III.8.1.2.3 remarques	59
III.8.2 Etude du module générateur thermoélectrique	60
III.8.2.1 calcul de puissance du MGT.....	61
III.8.2.2 calcul du rendement du MGT.....	62
III.8.3 Etude électrique par le code PSIM	62
III.8.3.1 montage équivalent du thermocouple	62
III.8.3.2 montage équivalent du module	63
III.9 CONCLUSION	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	65
CONCLUSION GENERALE	69

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III : Design et simulation du modèle MGT

- **Tableau III. 01** : Dimensions des éléments dans le premier modèle thermocouple Rectangulaire.....43
- **Tableau III. 02** : Dimensions des éléments dans la 2eme modèle thermocouple cylindrique.....44
- **Tableau III. 03**: Paramètres d'entrés, paramètres calculés et puis tracés par COMSOL.....52

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Thermoélectricité

- **Figure I. 01** : Expérience originale de Thomas Johann Seebeck05
- **Figure I. 02** : Illustration de l'effet Seebeck05
- **Figure I. 03** : Illustration de l'effet Peltier06
- **Figure I. 04** : Illustration de l'effet Peltier08
- **Figure I. 05** : facteur de mérite pour des matériaux de type N11
- **Figure I. 06** : Photo d'un convertisseur thermoélectrique à base de Bi_2Te_3 massif 12
- **Figure I. 07** : Miniaturisation du Micropelt par rapport à un Peltier massif commercial et son agrandissement.....13
- **Figure I. 08** : Dispositifs Micropelt au stade de wafer après dépôt du matériau thermoélectrique sur les électrodes déposées préalablement13
- **Figure I. 09** : État de l'art des dispositifs Micropelt et évolution de la surface A des faces froides14
- **Figure I. 10** : Convertisseurs thermoélectriques réalisés à base de μ -poudre de Bi_2Te_3 15
- **Figure I. 11** : (a) siège automobile, (b) réfrigérateur portable16
- **Figure I. 12** : Biolite Campstove17
- **Figure I. 13** : Dispositif Biolite17
- **Figure I. 14** : montre Seiko thermique utilisant la différence entre la température ambiante et celle du corps humain18

CHAPITRE II : étude et fonctionnement d'un module générateur thermoélectrique

- **Figure II. 01** : a) générateur thermoélectrique, b) Un refroidisseur thermoélectrique22
- **Figure II. 02** : a) Module thermoélectrique, b) Thermocouple23
- **Figure II. 03** : Schéma d'un couple TE et du circuit électrique-thermique qui le Parcourt24
- **Figure II. 04** : Thermoélectrique Générateur (TEG)26

LISTE DES FIGURES

- **Figure II. 05** : Générateur thermoélectrique27
- **Figure II. 06** : Générateur thermoélectrique de Kim réalisé avec des couches $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ et $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ 27
- **Figure II. 07** : Générateur thermoélectrique de Takashiri et coll28
- **Figure II. 08** : Représentation d'un générateur thermoélectrique29
- **Figure II. 09** : Schéma d'une jonction (génération électrique)32
- **Figure II. 10** : Flux d'énergie dans le module33

CHAPITRE III : Design et simulation du modèle MGT

- **Figure III. 01** : Le modèle géométrique du module thermoélectrique par COMSOL37
- **Figure III. 02** : **A**-Model géométrie d'un thermocouple a des branches cylindrique, **B**-Model géométrie d'un thermocouple a des branches rectangulaires40
- **Figure III. 03** : Fenêtre de sélectionner l'espace40
- **Figure III. 04** : Fenêtre de « sélectionner la dimension d'espace »41
- **Figure III. 05** : Fenêtre de « SELECTIONNER LA PHYSIQUE (MODÈLE) ».....41
- **Figure III. 06** : Fenêtre “SELECTIONNER L'ETUDE”42
- **Figure III. 07** : fenêtre pour dessin Géométrie42
- **Figure III. 08** : Dimensions générales du thermocouple rectangulaire est son module43
- **Figure III. 09** : Matériel exemple de l'équivalent de thermocouple45
- **Figure III. 10** : détermination de physique46
- **Figure III. 11** : Résultats de simulation46
- **Figure III. 12** : Exemple et principe de simulation thermique dans un Thermocouple48
- **Figure III. 13** : Exemple et principe de la circulation de potentiel électrique48
- **Figure III. 14** : variation de température en fonction de tension49
- **Figure III. 15** : Exemple et principe de simulation thermique dans un Thermocouple49
- **Figure III. 16** : Distribution de la tension le long du dispositif thermoélectrique.50

LISTE DES FIGURES

- **Figure III. 17** : la géométrie d'un générateur thermoélectrique composé de 9 Thermocouples50
- **Figure III. 18** : Exemple et principe de simulation thermique dans un module Thermoélectrique51
- **Figure III. 19** : Distribution de potentiel dans un générateur composé de 9 Thermocouples51
- **Figure III. 20** : température en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT)et pour une tension donner"53
- **Figure III. 21** : courant en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT) " ..53
- **Figure III. 22** : température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une longueur (HT)donner"54

- **Figure III. 23** : température en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT)et pour une tension donner"54
- **Figure III. 24** : courant en fonction du temps " pour différentes hauteurs (HT)" ...55
- **Figure III. 25** : température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une hauteur (HT) donner"55
- **Figure III. 26** : température en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes et pour une tension donner"57
- **Figure III. 27** : courant en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes"57
- **Figure III. 28** : température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une distance entre les pattes donner"58

- **Figure III. 29** : température en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes et pour une tension donner"58
- **Figure III. 30** : courant en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes donner"59
- **Figure III. 31** : température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une distance entre les pattes donner"59
- **Figure III. 32** : le thermocouple rectangulaire qui nous avons choisi60
- **Figure III. 33** : *module générateur thermoélectrique porte 9 thermocouples rectangulaire qui nous avons choisi*61

LISTE DES FIGURES

- **Figure III. 34** : montage électrique équivalent du thermocouple par le code
PSIM62
- **Figure III. 35** : montage électrique équivalent du module GTE par le code
PSIM63

LISTES DES PRINCIPAUX SYMBOLES ET ABRIVIATIONS

LISTES DES PRINCIPAUX SYMBOLES ET ABRIVIATIONS

Variable	Description
S	Coefficient de Seebeck(v/k)
ΔV	Différence de potentiel électrique (v)
ΔT	Différence entre la température chaud et température froid(k)
T_C	Température chaud(k)
T_f	Température froid(k)
Q	Quantité de chaleur dégagée ou absorbée
I	Courant électrique(A)
π	Coefficient de Peltier (v)
τ	Le coefficient de Thomson((v/k))
σ	La conductivité électrique($\Omega^{-1}. m^{-1}$)
ρ	La résistivité électrique ($\Omega. m$)
λ	La conductivité thermique (w/m.k)
ZT	La facteur de mérite(k^{-1})
TE	thermoélectrique
TC	Le thermocouple
MGT	Module générateur thermoélectrique
R	La résistance électrique interne ou externe (Ω)
κ	La conductance thermique (w/m.k)
η	Le rendement (%)
I_n	le courant dû à la patte de type n (A)
I_p	le courant dû à la patte type p (A)
U_s	La tension générée par effet Seebeck (V)
P_{CS}	la puissance prélevée du côté chaud (w)
P_{fs}	la puissance fournie à la source froide (w)
P_s	la puissance électrique générée (w)
P_{cj}	puissance thermique générée par effet Joules cote chaud (w)
P_{fj}	puissance thermique générée par effet Joules cote froide (w)
R_{pn}	la résistance électrique de la patte P et de la patte N (Ω)
p_λ	transfert thermique p_λ de la source chaude à la source froide (w)
P_c	la puissance thermique prélevée à la source chaude (w)
P_f	la puissance thermique fournie à la source froide (w)
P_{el}	la puissance électrique générée utilisable (w)
Q_c	puissance thermique absorbée du côté chaud (w)
P_u	La puissance électrique utile (w)
R_C	La résistance de charge (Ω)

LISTES DES PRINCIPAUX SYMBOLES ET ABRIVIATIONS

η_f	le rendement de Carnot (%)
η_{th}	le rendement propre au système thermoélectrique (%)
T_m	la température moyenne (k)
C.O.P	coefficient de performance (w)
GTE	Générateur thermoélectrique
MTE	Module thermoélectrique



INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les préoccupations d'ordre énergétique n'ont jamais autant été d'actualité. Le changement climatique se confirme tandis que le prix des matières fossiles s'envole. Il convient donc de trouver de nouvelles sources d'énergie n'influant pas sur notre climat et pouvant faire face à la crise énergétique. De nombreuses pistes sont étudiées ou en voie de développement notamment l'énergie solaire, éolienne, marémotrice, géothermique... Parmi ces nouvelles manières de produire de l'électricité nous trouvons la thermoélectricité

Son principe est simple : un matériau transforme directement de la chaleur en électricité, ou déplace des calories par l'application d'un courant électrique. Ces applications concernent donc la réfrigération et la génération d'électricité grâce aux sources de chaleur perdue. Ce système offre de multiples avantages : absence de système mécanique et de désagréments sonores, grande fiabilité, durée de vie quasi illimitée, de surcroît, il permet de lutter contre les différentes pollutions créées par la combustion ou l'utilisation en réfrigération de gaz frigorigènes. Ces applications peuvent être utiles dans de nombreux domaines comme la réfrigération des circuits électroniques ou la production d'électricité grâce à la chaleur dégagée par nos moteurs thermiques. Cependant le rendement des modules thermoélectriques reste encore faible et leurs prix élevés limitent leurs utilisations à grande échelle. De nombreuses recherches ont donc été engagées à partir des années 1990 en vue de développer cette technologie pourtant connue depuis 1821.

En partant de ce constat, une solution consiste à valoriser cette énergie thermique excédentaire. Avec les progrès effectués sur l'étude des matériaux semi-conducteurs, les générateurs thermoélectriques (GTE) commencent à être considérés comme une solution intéressante.

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.

INTRODUCTION GENERALE

Les générateurs thermoélectriques sont constitués d'un ensemble de modules thermoélectriques insérés entre deux échangeurs de chaleur. Chaque module thermoélectrique est ensuite constitué de quelques dizaines à centaines de couples de matériaux semi-conducteurs qui permettent de convertir directement une partie de la chaleur qui les traverse en énergie électrique.

Actuellement de nombreux laboratoires étudient de nouveaux matériaux pour améliorer le rendement et réduire les coûts. Il y a peu de temps encore, le seul matériau disponible était le tellure de bismuth (Bi_2Te_3) aux performances certes intéressantes mais en quantités limitées (matériaux rares). 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.

Cependant dans une perspective industrielle à moyen terme, il est beaucoup plus raisonnable d'étudier les perspectives offertes par les matériaux qui arrivent au stade de la production de modules, ont des plages de températures d'utilisation plus grandes, sont plus légers, disponibles en très grandes quantités et qui devraient permettre de développer à court et à moyen terme des générateurs thermoélectriques économiquement rentables.

Dans ce travail on propose d'étudier le comportement thermoélectrique d'un thermocouple (seul) à base du semi-conducteur Bi_2Te_3 , puis un module thermoélectrique avec 9 thermocouples. Notre travail est organisé en trois chapitres de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur le phénomène thermoélectrique. Nous rappelons les différents effets de ce phénomène (L'effet Seebeck, L'effet Peltier, L'effet Thomson), ainsi que les différents matériaux thermoélectriques. Les différentes applications de la thermoélectricité sont aussi présentées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre présente les dispositifs thermoélectriques (modules générateurs thermoélectriques), leurs configuration, Architectures (massif, couches minces et micro poudre), ainsi que le principe de fonctionnement. La deuxième partie du deuxième chapitre est consacrée à la manière de modéliser un générateur thermoélectrique ou on présente le bilan de puissance d'un tel dispositif.

Dans le chapitre trois, on aborde le volet de la simulation électrothermique effectuée par le logiciel COMSOL multiphysics. Nous avons détaillé l'interface

INTRODUCTION GENERALE

graphique de COMSOL, Les étapes de simulation (la dimensionnement (2D,3D...), champ physique du modèle, le type d'étude (STATIONNAIRE, TEMPOREL), dessine de la géométrie...). La simulation est faite pour des thermocouples rectangulaires, cylindriques et le module thermoélectrique composé de 9 thermocouples rectangulaires. Ces composants et dispositifs sont conçus avec des alliages à base de tellure de bismuth (Bi_2Te_3). À la fin de ce chapitre, nous avons calculé la puissance et le rendement d'un module générateur thermoélectrique. Nous avons présenté le montage électrique équivalent du thermocouple et du module thermoélectrique à l'aide du logiciel de simulation PSIM.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et sa partie simulation



CHAPITRE I :
Thermoélectricité

I.1 INTRODUCTION

La thermoélectricité est un phénomène physique qui consiste en la conversion directe d'une énergie thermique en électricité, et inversement, dans des matériaux appropriés. Il existe trois effets thermoélectriques qui résultent du couplage entre les phénomènes de conduction électrique et thermique. Les performances d'un matériau thermoélectrique sont caractérisées par le facteur de mérite adimensionnel.

Dans ce chapitre nous proposerons une présentation générale sur les trois effets thermoélectriques, le choix de matériaux thermoélectrique et les technologies actuelles ainsi que les technologies de conversion thermique.

I.2 Phénomènes thermoélectriques

La thermoélectricité est la transformation de la chaleur en électricité. Elle fut découverte en 1821 par le physicien Allemand Seebeck. On peut définir l'effet thermoélectrique peut être défini comme un effet qui relie le flux de chaleur à travers un matériau au courant électrique qui le traverse. L'effet thermoélectrique, qui se définit comme l'apparition d'une différence de tension temporaire après un changement de température.

I.3 Les effets thermoélectriques

Les effets thermoélectriques décrivent l'interaction entre la chaleur et l'électricité dans les solides. Sur la base de ces effets, des dispositifs thermoélectriques ont été développés et utilisés pour la production d'énergie ou la réfrigération. Les effets thermoélectriques qui ont lieu dans un module thermoélectrique (MTE) comprennent : l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson.

Ces trois effets sont liés par les relations de Kelvin. Ils représentent les fondamentaux de la thermoélectricité [01_05].

I.3.1 L'effet SEEBECK

I.3.1.1 Définition

En 1821, le physicien allemand Thomas Johann SEEBECK démontre qu'une différence de température entre deux métaux différents soudés ensemble génère un courant électrique [06].

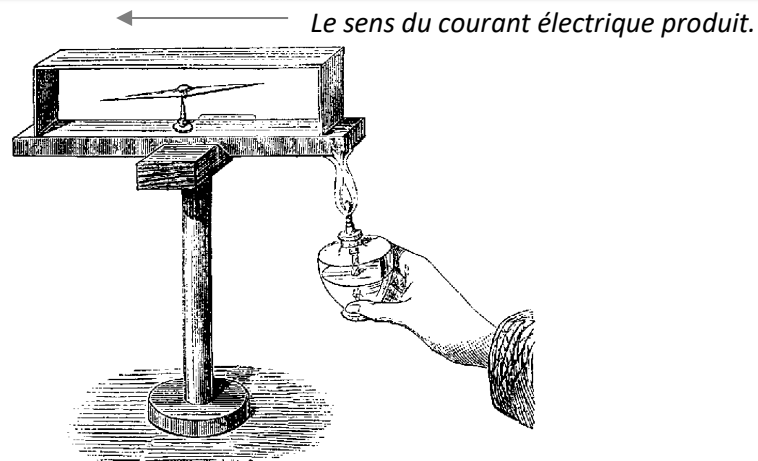


Figure I. 01 : Expérience originale de Thomas Johann Seebeck [07].

Quand il a remarqué la déviation d’une aiguille placée entre deux matériaux conducteurs de natures différentes dont les jonctions étaient exposées à des températures $T_1 \neq T_2$. Au début, il attribua ce phénomène au magnétisme, mais c’est plus tard qu’il expliqua que ceci était dû à l’apparition d’une différence de potentiel à la jonction des deux matériaux, figure I. 02 démontre *Illustration de l’effet Seebeck*.

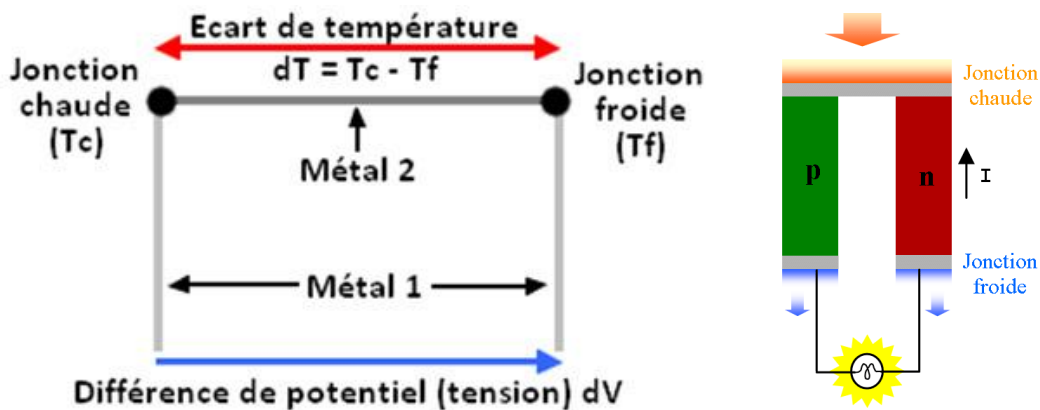


Figure I. 02 : Illustration de l’effet Seebeck.

I.3.1.2 Explication du phénomène

En effet, quand il existe une différence de température entre deux jonctions formées par deux matériaux différents, il y a création d’une différence de potentiel électrique ΔV . Le coefficient de Seebeck S_{ab} mesuré à une jonction représente la différence entre les coefficients de Seebeck des deux matériaux S_a et S_b formant la jonction. Ils sont liés par la relation suivante :

$$\Delta V = (S_a - S_b) (T_c - T_f) = s_{ab} \Delta T \quad (\text{EQU I. 01})$$

Où $T_C - T_f$ représente la différence ΔT entre la température chaude et la température froide.

$$S_{ab} = \Delta V / \Delta T \quad (\text{EQU I. 02})$$

Ce coefficient est exprimé en V/K, ou plus communément en $\mu\text{V/K}$ compte tenu des valeurs prises par les matériaux thermoélectriques considérés. Son signe est aussi caractéristique du type de conducteur considéré. Ainsi, un coefficient S positif sera caractéristique d'un conducteur de type p et par opposition, un pouvoir thermoélectrique inférieur à zéro sera caractéristique d'un conducteur de type n [08].

Le coefficient de Seebeck est par convention négatif pour les semi-conducteurs de type n, et positif pour les semi-conducteurs de type p :

$$S < 0 \text{ Type n.}$$

$$S > 0 \text{ Type P.}$$

I.3.2 L'effet Peltier

I.3.2.1 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. Il représente l'inverse de l'effet Seebeck, figure I. 03 démontre *Illustration de l'effet Peltier*.

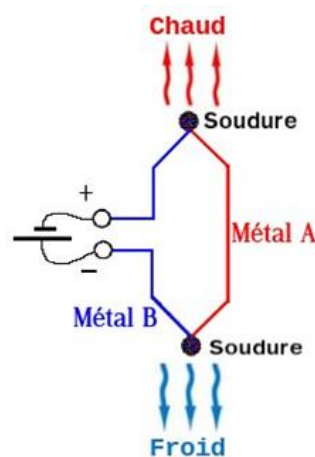


Figure I. 03 : Illustration de l'effet Peltier.

I.3.2.2 Explication du phénomène :

Un courant électrique circulant à travers les jonctions de deux matériaux de nature différente génère une hausse de la température pour l'une des jonctions et une baisse de la température pour l'autre. Ainsi, une quantité de la chaleur est absorbée à une jonction tandis qu'à l'autre jonction, il y a libération de la chaleur. Ce dernier Montre qu'une jonction est chauffée et que l'autre est refroidie lors du passage du courant [09].

$$\Pi_{ab} = \frac{Q}{I} \quad (\text{EQU I. 03})$$

Les coefficients Peltier des deux matériaux 1 et 2, notés respectivement π_a et π_b peuvent être définis:

$$Q_a = \Pi_a I \quad \text{et} \quad Q_b = \Pi_b I \quad (\text{EQU I. 04})$$

Si on considère la quantité de chaleur Q_{ab} à une jonction, on écrit :

$$Q_{ab} = (\Pi_a - \Pi_b)I = \Pi_{ab}I \quad (\text{EQU I. 05})$$

Avec

Q : quantité de chaleur dégagée ou absorbée.

I : courant qui circule à travers la jonction.

Remarque 01 :

On peut y voir les deux matériaux thermoélectriques notés a et b mis en contact.

La circulation du courant I entraîne ici au niveau de la jonction un échauffement (cas $\pi_a > \pi_b$). En inversant le sens du courant ou en ayant $\pi_a < \pi_b$, on aurait obtenu un refroidissement.

Remarque 02 :

Comme l'effet Seebeck est l'inverse de l'effet Peltier, il existe une relation qui relie les deux phénomènes :

$$S_{ab} = \Pi_{ab}/T \quad (\text{EQU I. 06})$$

I.3.3 L'effet Thomson

I.3.3.1 Définition

L'effet Thomson fut découvert en 1851 par William Thomson. Cet effet résulte de l'apparition simultanée d'un courant électrique et d'un gradient de température à travers un matériau qui génère l'absorption ou l'émission de la chaleur dans chacune de ses parties.

Le physicien WILLIAM THOMSON montre que les effets Seebeck et Peltier sont liés [10], figure I. 04 démontre *Illustration de l'effet Thomson*.

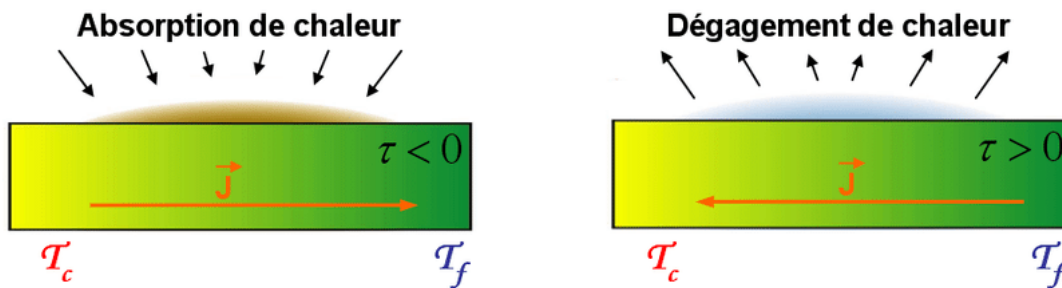


Figure I. 04 : Illustration de l'effet Thomson.

I.3.3.2 Explication du phénomène

$$QT = -\tau \cdot \vec{j} \cdot \vec{\nabla}T \quad (\text{EQU I. 07})$$

Avec τ , le coefficient Thomson. Cet effet étant une combinaison des deux précédents effets, il n'est pas étonnant que ce dernier coefficient soit lié aux Coefficients Seebeck et Peltier [11]. Lord Kelvin a ainsi montré les égalités suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi = S \cdot T \\ \tau = T \cdot \frac{dS}{dT} \end{array} \right. \quad (\text{EQU I. 08})$$

$$(\text{EQU I. 09})$$

I.4 Performances et interdépendance des grandeurs

I.4.1 La conductivité électrique « σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$) »

La conductivité électrique 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.

I.4.2 Conductivité thermique « λ (W/m.K) »

Elle est également connue sous le nom de processus de Fourier. Ce phénomène décrit la conductivité ou la résistivité thermique à travers un matériau. Le transfert de la chaleur associé à la conduction thermique dans un matériau.

I.4.3 Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques

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

$$ZT = \frac{\sigma \cdot S^2}{\lambda} T \quad (\text{EQU I. 10})$$

Où :

- T : la température absolue (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.K) [12]

Le facteur de mérite est donc un terme qui exprime l'efficacité du matériau dans la conversion chaleur-électricité (et vice-versa). Le facteur de mérite est la référence dans la classification des matériaux thermoélectriques. Plus le ZT est grand, plus le matériau est efficace pour la conversion thermoélectrique.

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.
- 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.

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.

Les matériaux thermoélectriques n'ont de bonnes propriétés thermoélectriques que sur des intervalles de température restreints. Nous présenterons donc les différents matériaux en fonction de leurs plages d'utilisation.

I.5 Les matériaux thermoélectriques

Il existe de nombreux matériaux capables d'être utilisés pour la thermoélectricité. D'un côté, nous pouvons distinguer les matériaux dits conventionnels, ceux qui sont étudiés depuis les débuts de la thermoélectricité. De l'autre, nous avons les nouveaux matériaux apparus au fil des années suite à la découverte de nouvelles approches pour améliorer les performances et récemment suite à des restrictions d'utilisation de certains éléments comme le plomb [13].

Dans la production de dispositifs thermoélectriques, les matériaux semi-conducteurs de type P et de type N sont utilisés pour fabriquer des thermo-éléments (pattes); dans la plupart des dispositifs, les fabricants utilisent souvent la même base de matériaux et ajoutent des impuretés par dopage pour donner au matériau des propriétés de type N ou P. Cette technique génère des matériaux avec une compatibilité des propriétés thermique, électrique et mécanique, qui peuvent facilement se combiner dans des modules.

Parmi les matériaux TE les plus performants, on cite les alliages à base de tellure de bismuth (Bi_2Te_3) pour des applications proches à la température ambiante, Pb-Te ainsi que Si-Ge pour des applications à des températures plus élevées.

Beaucoup de recherches ont été menées sur ces alliages en faisant un dopage (dopage n et p). Ainsi, on assiste à l'apparition des composés quaternaires à base de bismuth, d'antimoine, de tellure et de sélénium $(\text{Bi,Se})_2(\text{Te,Sb})_3$ qui présentent des propriétés TE élevées. La figure I. 05 illustre la courbe de ZT en fonction de la température pour différents matériaux nanostructures. On constate que la valeur de ZT augmente au fur et à mesure que la température augmente, pour un matériau donné, jusqu'à atteindre un pic. Il est important de noter que chaque famille de matériaux n'est efficace que sur une plage de température limitée [14].

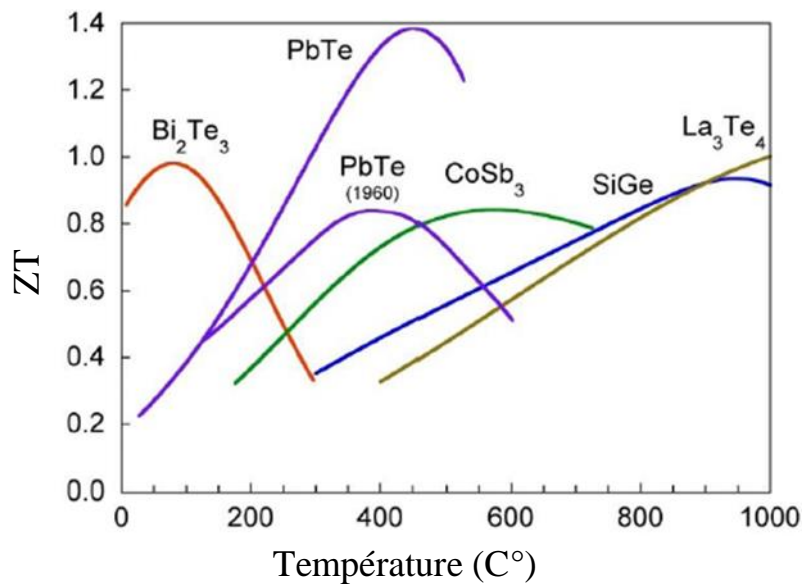


Figure I. 05 : facteur de mérite pour des matériaux de type N [15].

I.6 Le choix des matériaux thermoélectriques

Les effets thermoélectriques sont connus depuis le milieu du XIX^e siècle, et l'intérêt qui s'est porté sur les propriétés des semi-conducteurs a permis le développement de matériaux possédant des pouvoirs thermoélectriques élevés permettant ainsi la construction de modules dotés d'une plus grande efficacité. Il existe plusieurs familles de matériaux thermoélectriques. Afin de choisir quel composé correspond le mieux à telle application, il est nécessaire de pouvoir les comparer. Le facteur de mérite $ZT(\text{K}^{-1})$ est donc défini afin de pouvoir apporter cette comparaison. Cela dit, on utilisera le plus souvent le facteur adimensionnel de mérite ZT.

Depuis peu, la déclinaison d'un matériau sous différentes formes a permis de concevoir des dispositifs de technologie variée et de plus en plus complexe. 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.

I.7 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 micro poudre.

I.7.1 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.

Convertisseur thermoélectrique à base de Bi_2Te_3 massif Figure I. 06. 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.



Figure I. 06 : 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].

I.7.2 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. 07).

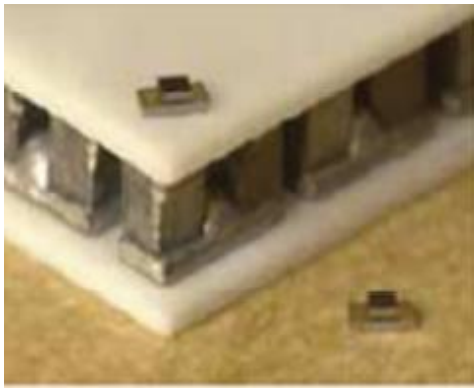


Figure I. 07 : Miniaturisation du Micropelt par rapport à un Peltier massif commercial et son agrandissement.

La Figure I. 08 représente un wafer contenant le matériau d'un seul type, avant l'étape de découpe et d'assemblage [18].

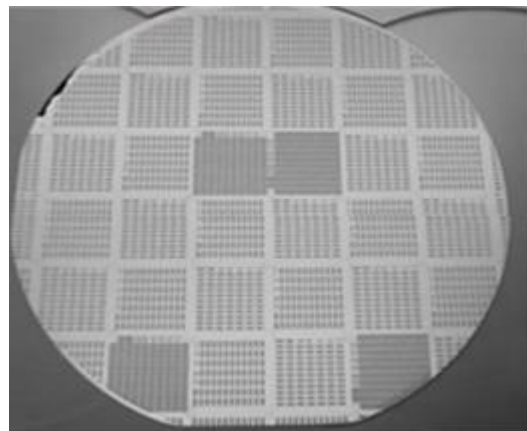


Figure I. 08 : Dispositifs Micropelt au stade de wafer après dépôt du matériau thermoélectrique sur les électrodes déposées préalablement.

Les dimensions de ce dispositif sont les suivantes : $0,72 \text{ mm}^2$ pour la partie froide (partie supérieure) et $1,47 \text{ mm}^2$ pour la partie chaude (partie inférieure), pour une épaisseur totale de 0.45 mm .

Par ailleurs, la Figure I. 09 présente les évolutions réalisées et à venir sur la géométrie et la forme de ces dispositifs.

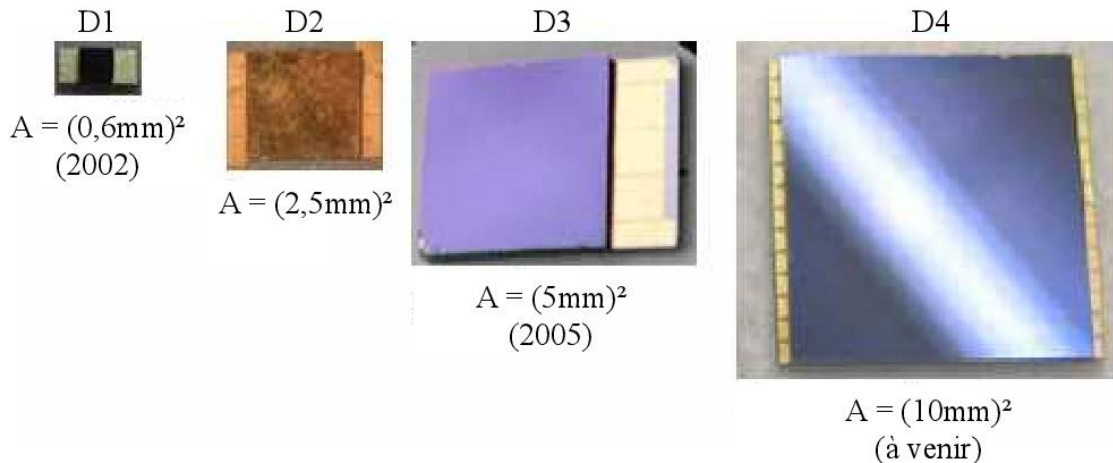


Figure I. 09 : État de l'art des dispositifs Micropelt et évolution de la surface A des faces froides.

En mode refroidisseur (dispositif D1 de la Figure I. 09, 12 jonctions), une différence de température de 32K 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 20K .

En mode générateur de puissance (dispositif D3 de la Figure I. 09, 450 couples), une tension d'environ 2 V est obtenue pour une différence de température de 20 K , ainsi qu'une puissance de $1,7 \text{ mW}$ [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 30K [20].

- **Modules JPL**

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

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

I.7.3 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 [24].

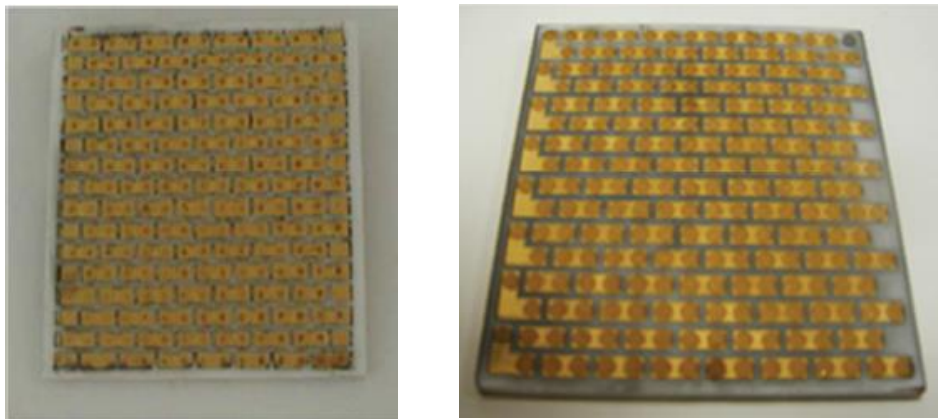


Figure I. 10 : Convertisseurs thermoélectriques réalisés à base de μ -poudre de Bi_2Te_3 .

I.8 Les applications de la thermoélectricité :

Les modules TE présentent, d'une part, certains avantages. En effet, ils sont assez fiables et peuvent fonctionner à des températures élevées, ce qui les rendent idéaux pour des applications de récupération de la chaleur inutilisée.

Aujourd'hui la plupart des matériaux ont un ZT proche de 1. Cependant si nous voulions fabriquer un réfrigérateur thermoélectrique concurrentiel il nous faudrait un ZT proche de 3. De plus pour que les générateurs thermoélectriques soient économiquement rentables nous devons approcher un $\text{ZT} > 2$. Ainsi dans cette partie nous ferons un point sur les applications existantes, sur les recherches engagées ainsi que sur les applications imaginables de la thermoélectricité.

Les applications thermoélectriques sont dédiées à la génération de puissance électrique ou à la réfrigération

I.8.1 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.

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

Actuellement, plusieurs types des dispositifs à base des modules thermoélectriques sont commercialisés pour différents domaines d'applications: domestique (réfrigérateurs portables...), automobile (sièges localement refroidis...), photovoltaïque (module hybride photovoltaïque-thermoélectrique (Figure I. 11) électronique (refroidissement actif et local des microprocesseurs) [25]



Figure I. 11 : (a) siège automobile, (b) réfrigérateur portable.

I.8.2 Générateur de Puissance:

L'application la plus importante de la thermoélectricité est celle de l'industrie spatiale. C'est grâce à la longue durée de vie des modules qu'il fut possible d'envoyer des sondes spatiales pour survoler les planètes, comme les sondes Voyager qui furent envoyées à l'espace en 1977 et qui sont fonctionnelles jusqu'à aujourd'hui.

Par ailleurs, la compagnie Biolite a lancé la commercialisation d'un produit basé sur les modules TE en 2011. Ce produit consiste en un réchaud à bois qui permet de recharger des appareils électroniques par port USB (figure I. 12). La source chaude est la chaleur du feu, et la source froide est le ventilateur comme l'illustre (figure I. 13)



Figure I. 12 : Biolite Campstove.

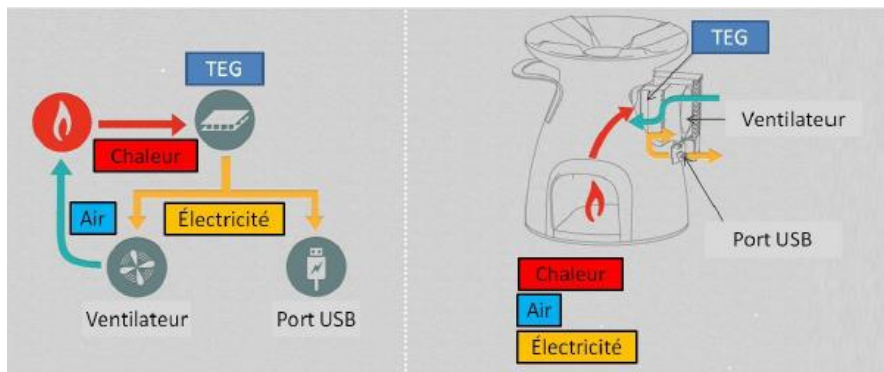


Figure I. 13 : Dispositif Biolite.

En ce qui concerne les sources de basse puissance, on peut donner comme exemple les montres commercialisées par Seiko (1998, Japon) (Figure I. 14) 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 [26].

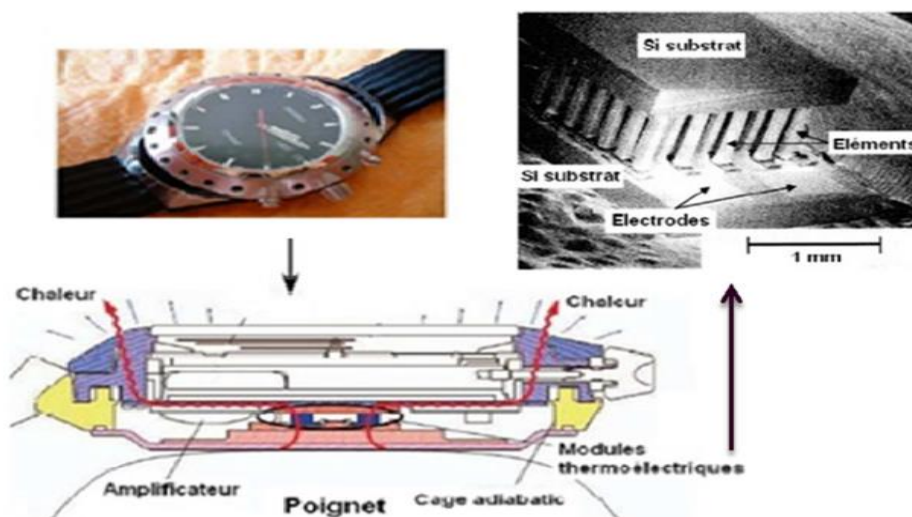


Figure I. 14 : montre Seiko thermique utilisant la différence entre la température Ambiante et celle du corps humain.

I.9 Les applications futures :

Les applications possibles de la thermoélectricité sont très nombreuses. En effet, au vu des recherches engagées dans ce domaine on peut imaginer la récupération de toute énergie perdue sous forme de chaleur que ce soit dans les cheminées d'incinérateurs, les circuits de refroidissement des centrales nucléaires ou dans les pots d'échappements des véhicules... Dans un moteur de voiture 40% de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Les matériaux thermoélectriques offrent la possibilité de réduire la consommation d'essence en évitant l'usage de l'alternateur. Des capteurs réagissant à un échauffement pourraient aussi être créés. Le capteur à base de matériaux thermoélectriques produirait un courant qui déclencherait un système d'alerte [27].

De plus en électronique les refroidissements à air et à eau sont devenus insuffisants et pas assez précis. Ainsi nous pourrions refroidir, comme commence à le faire Apple, les ordinateurs grâce à la thermoélectricité ce qui, par ailleurs, réduirait la nuisance sonore de ceux-ci, et permettrait d'améliorer leurs performances. Pourquoi ne pas aussi récupérer la chaleur produite par ces mêmes circuits électriques afin de recharger les batteries de nos appareils portables, permettant de la sorte d'accroître leurs autonomies.

I.10 Générateur thermoélectrique utilisant de la chaleur perdue

Tout système de conversion d'énergie possède un rendement inférieur à 100% et donc admet des pertes. Dans la majorité des cas ces pertes sont de nature thermiques et sont évacuées naturellement ou par un système dédié vers l'extérieur. L'objet de cette partie est de répertorier les domaines où il existe des pertes thermiques importantes et où la thermoélectricité peut être compétitive.

Avant de parler plus spécifiquement de chaque secteur en particulier, intéressons-nous de manière globale aux pertes thermiques. Si l'on prend comme exemple l'estimation de l'énergie utilisée par les Etats-Unis en 2009 par le Lawrence Livermore national Laboratory, on obtient les chiffres significatifs suivants (l'unité utilisée est le quad qui vaut environ 293 millions de MW.h.) :

- La production d'électricité pour le résidentiel, le commercial et le tertiaire représente environ 38,2 quads, qui sont répartis en 12,1 quads d'électricité et 26,1 quads d'énergie thermique rejetée.
- Le secteur des transports consomme 25,3 quads dont 20,2 quads sont gaspillés sous forme de chaleur rejetée. Ces résultats montrent la marge de progrès qu'il est possible d'espérer sur cette récupération d'énergie.

Au sein des transports, il convient d'étudier séparément les secteurs automobile, aéronautique et maritime, chacun de ces secteurs ayant des contraintes particulières.

I.10.1 Secteur automobile

Le domaine le plus actif pour cette récupération d'énergie est le secteur de l'automobile où la compétition vers des voitures toujours plus propres est très dynamique et très encouragée par les gouvernements. Depuis 2009, l'Union Européenne a instauré des normes contraignantes pour les voitures neuves avec des émissions à hauteur de 130 g de CO₂ (5,2 l/100km) par km à partir de 2015 et 95 g de CO₂/km (3,7l/100km) dès 2020 (régulation No 443/ 2009.) Au-delà de ces seuils, les fabricants de voiture doivent payer des amendes de l'ordre de 20€ par gramme supplémentaire depuis 2012. Ces amendes monteront, à partir de 2020 à 95€ par gramme.

En plus de ces normes, le prix des carburants continuera à augmenter à cause de la demande croissante des marchés émergents.

Ces deux derniers points obligent les constructeurs des marchés européens à innover de manière à satisfaire aux normes précédemment citées et à réduire la consommation de carburant. Plusieurs technologies sont étudiées, elles doivent répondre à un ou plusieurs des critères suivants :

- Performance (W/kg, W/m³, W.h/kg, W/m³, W/€) ;
- Coût ;
- Robustesse et durée de vie (15 ans) ;

Adaptation, la technologie doit pouvoir s'adapter facilement sur toute la flotte de véhicules, d'une voiture particulière à un camion ou encore au type de carburant utilisé (gaz, diesel ou essence) ;

- Intégration, la technologie doit s'intégrer pleinement dans le système énergétique du véhicule ;
- Autres avantages (améliorer le confort du conducteur, réduire le bruit dans l'habitacle,).



CHAPITRE II :
fonctionnement
d'un module
générateur
thermoélectrique

II.1 INTRODUCTION

Le tellurure 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 trouve décliné surtout sous forme massive.

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.

II.2 Dispositifs thermoélectriques

Les dispositifs thermoélectriques sont principalement associés à la transformation de l'énergie thermique en énergie électrique ou vice-versa. En général, les dispositifs thermoélectriques peuvent être classés en deux groupes : dispositifs générateurs et dispositifs réfrigérateurs.

II.3 Principe d'un dispositif thermoélectrique

L'unité de base d'un système de conversion thermoélectrique (générateur ou réfrigérateur) et le thermocouple (TC).

Un dispositif est composé de deux matériaux thermoélectrique (un semi-conducteur de type P et un autre de type n appelés 'pattes' ou 'branche') connectés électriquement en série par une électrode métallique et thermiquement en parallèle ; le tout étant placé entre deux plaques céramiques (conducteurs thermiques).

Un thermocouple peut être utilisé sous deux modes:

- Génération d'électricité (conversion de la puissance thermique en puissance électrique).
- Réfrigération (conversion de la puissance électrique en absorption de chaleur).

II.4 Les deux modes d'un thermocouple

Un convertisseur thermoélectrique est une machine thermique qui obéit aux lois de la thermodynamique. L'expression des paramètres thermoélectriques peut être définie en considérant un simple générateur constitué d'un thermocouple réalisé en semi-conducteurs de type n et p. On note, par ailleurs, que les éléments de type n ont un coefficient Seebeck négatif, et ceux de type p un coefficient Seebeck positif. La Figure II. 01 schématise un générateur thermoélectrique (a) et un refroidisseur thermoélectrique (b).

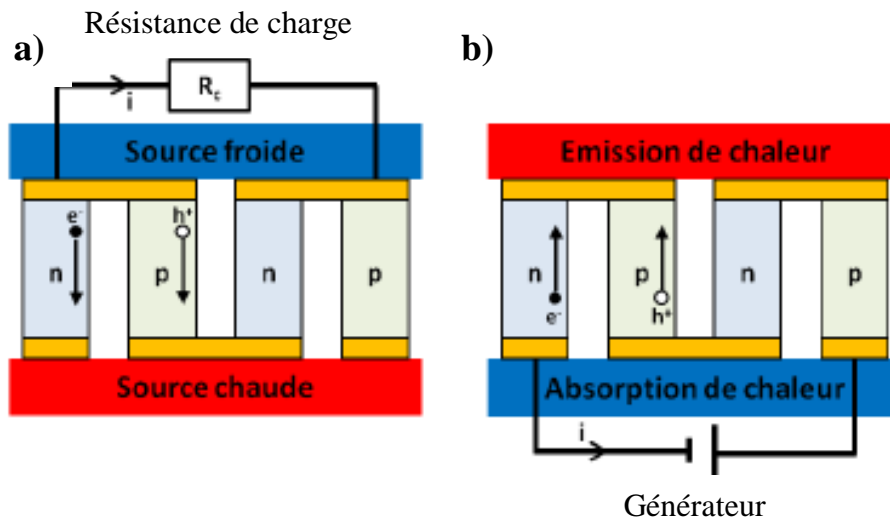


Figure II. 01 : a) générateur thermoélectrique, b) Un refroidisseur thermoélectrique.

II.5 Configuration des modules thermoélectriques

Un module thermoélectrique est un dispositif composé de plusieurs thermocouples. Chaque thermocouple contient deux pattes : une patte formée par un semi-conducteur de type p et l'autre par un semi-conducteur de type n. Ces pattes sont reliées par des contacts de cuivre, qui est un bon conducteur électrique, ce qui permet de réduire l'effet Joule qui influe sur la performance du module.

L'ensemble de ces pattes est couvert par deux plaques de céramique qui permettent de maintenir en place l'assemblage des thermocouples et qui assurent une conduction de la chaleur acceptable ainsi qu'une bonne isolation électrique. Les pattes sont alors connectées thermiquement en parallèle et électriquement en série. L'alternance des pattes et des plaques de cuivre forme un circuit électrique.

La figure II. 02 montre l'exemple d'un module conventionnel. Il existe, par ailleurs, d'autres types d'assemblage comme dans les micromodules TE. Notons que les flèches dans le thermocouple représentent le sens du flux de chaleur traversant le module.

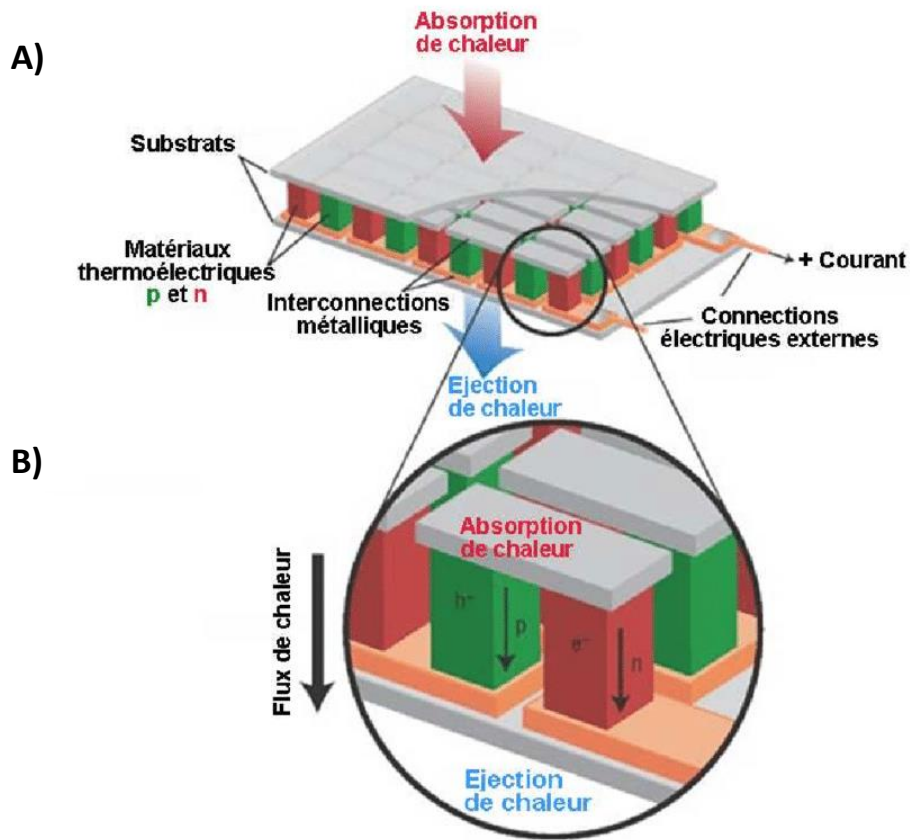


Figure II. 02 : A) Module thermoélectrique, B) Thermocouple [01].

Il existe deux types d'applications de modules thermoélectriques. On retrouve les modules soumis à un gradient de température qui peuvent servir à la génération d'un courant électrique qu'on appelle les modules générateurs, et les modules servant à la production d'un flux de chaleur nommés les modules de refroidissement.

II.6 Thermocouples :

Un thermocouple est un dispositif thermoélectrique générateur qui est typiquement constitué de deux pattes faites de matériaux semi-conducteurs, un de type P et un de type N de longueurs L_p et L_n et de sections A_p et A_n respectivement. Ces pattes sont connectées électriquement en série et thermiquement en parallèle à l'aide de plaques conductrices, le côté froid est connecté à une résistance externe R_0 [02]. La différence de température entre

les côtés chaud et froid génère un courant électrique qui dissipe une puissance dans la résistance de charge. La figure II. 03 montre le schéma du circuit électrique-thermique à l'intérieur d'un thermocouple sous effet Seebeck.

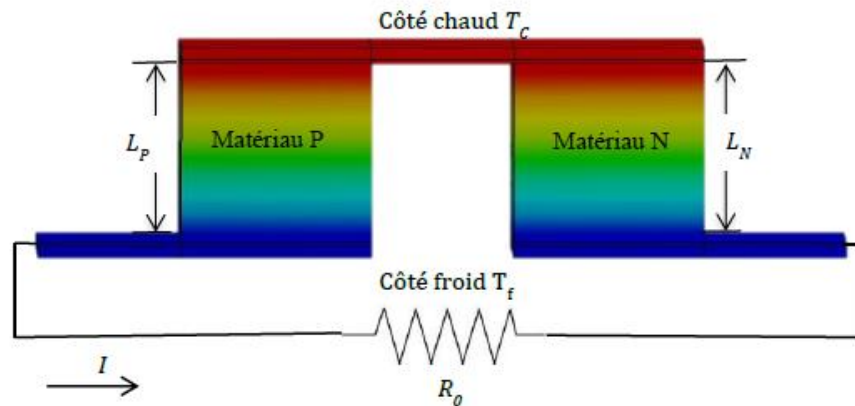


Figure II. 03 : Schéma d'un couple TE et du circuit électrique-thermique qui le parcourt.

Le transfert de chaleur à travers le couple est le résultat de la différence de température entre les côtés chaud et froid. Les données thermoélectriques telles que la chaleur, le courant électrique, la puissance et l'efficacité sont calculées comme suit en faisant quelques hypothèses simplificatrices. En général, cette simplification de la configuration d'un module est faite en négligeant les résistances thermique et électrique qui apparaissent dans les contacts.

Dans ce modèle, les flux de chaleur qui traversent le côté chaud et le côté froid du thermocouple sont donnés par [03]:

$$Q_c = ST_c I - \frac{1}{2} I^2 R + \kappa \Delta T \quad (\text{EQU II. 01})$$

$$Q_f = ST_f I + \frac{1}{2} I^2 R + \kappa \Delta T \quad (\text{EQU II. 02})$$

Où :

S est le coefficient de Seebeck combiné $S = |S_n| + |S_p|$

R est la résistance électrique interne du couple $R = \rho_n (L_n A_n) + \rho_p (L_p A_p)$

Où ρ est la résistance électrique de chaque matériau

κ est la conductance thermique interne $\kappa = \lambda_n (A_n L_n) + \lambda_p (A_p L_p)$

Où λ est la conductivité thermique de chaque matériau

ΔT est la différence de température appliquée entre le côté chaud et froid $\Delta T = T_c - T_f$

Le courant électrique est donné par :

$$I = S\Delta T / (R + R_0) \quad (\text{EQU II. 03})$$

Où : $S\Delta T$ est la tension de Seebeck ou V_{oc}

Ainsi la puissance de sortie peut être estimée théoriquement à partir des (équations II. 01 et II. 02)[04]:

$$P = Q_c - Q_f \quad (\text{EQU II. 04})$$

$$P = SI\Delta T - RI^2 \quad (\text{EQU II. 05})$$

$$P = I (V_{oc} - RI) \quad (\text{EQU II. 06})$$

Conventionnellement, l'efficacité dans la conversion d'énergie est donnée par le ratio entre la puissance de sortie et la chaleur absorbée, à partir des équations II. 01 et

II. 06 on peut définir l'efficacité comme suit :

$$\eta = \frac{P}{Q_c} = \frac{IV_{oc} - RI^2}{ST_c I - \frac{1}{2}I^2 R + \kappa\Delta T} \quad (\text{EQU II. 07})$$

II.7 Modules générateurs thermoélectriques (MGT):

Un module thermoélectrique est soumis à une différence de température qui génère un flux de chaleur à travers le module; une portion de ce flux de chaleur est transformée en puissance électrique. En général, un MGT est un dispositif formé par la connexion de plusieurs thermocouples, tous connectés électriquement en série et thermiquement en parallèle en utilisant des plaques de cuivre. En plus des plaques céramiques sont ajoutées

pour distribuer la chaleur de façon uniforme sur toute la surface du module. Un module générateur thermoélectrique typique est montré dans la figure II. 04.

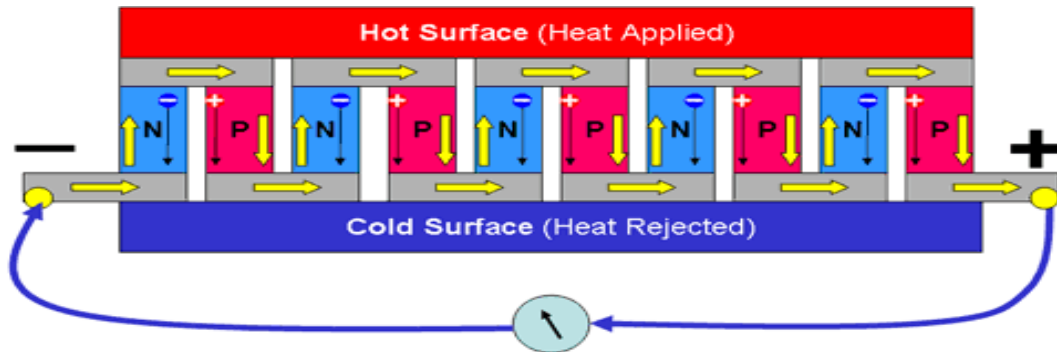


Figure II. 04 : Générateur Thermoélectrique (GTE).

Ce type de module est conçu pour supporter les contraintes mécaniques induites par la différence de température entre les deux côtés du module. Pour cette raison, ses pattes du côté chaud sont fixées avec une soudure à partir d'un alliage ayant un point de fusion élevé. Normalement, le point de fusion de la soudure doit dépasser largement la plus haute température que le module ait à supporter. Les modules de réfrigération, par contre, ne respectent pas nécessairement ces caractéristiques, ce qui explique pourquoi ils ne sont pas adéquats pour opérer dans des hautes températures.

II.8 Architecture du générateur (MGT)

Les générateurs thermoélectriques, qu'ils soient de géométrie perpendiculaire ou plane, 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 [05].

II.8.1 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 II. 05 représente l'architecture de la géométrie perpendiculaire des dispositifs

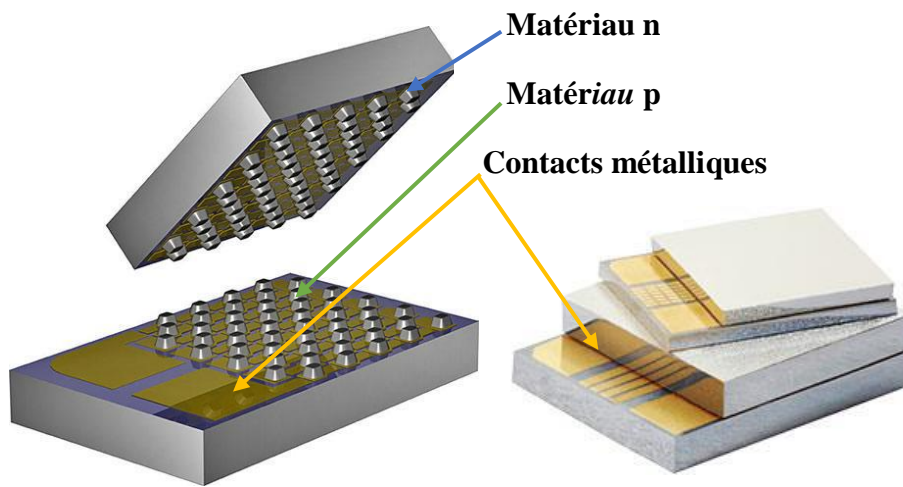


Figure II. 05: thermoélectrique en couche mince Micropelt.

Les générateurs Micropelt fonctionnent jusqu'à une température maximale de 200 °C. Leur facteur de mérite est 3 à 4 fois inférieur aux valeurs typiques des générateurs massifs, et la puissance électrique générée pour un même gradient de température est par conséquent inférieure. En revanche, un générateur massif nécessite un gradient de température d'au moins 20 °C pour générer une tension en circuit-ouvert de 1V, tandis qu'un générateur en couche mince génère la même tension en circuit-ouvert pour un gradient de température de 8 °C.

II.8.2 Géométrie planaire

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

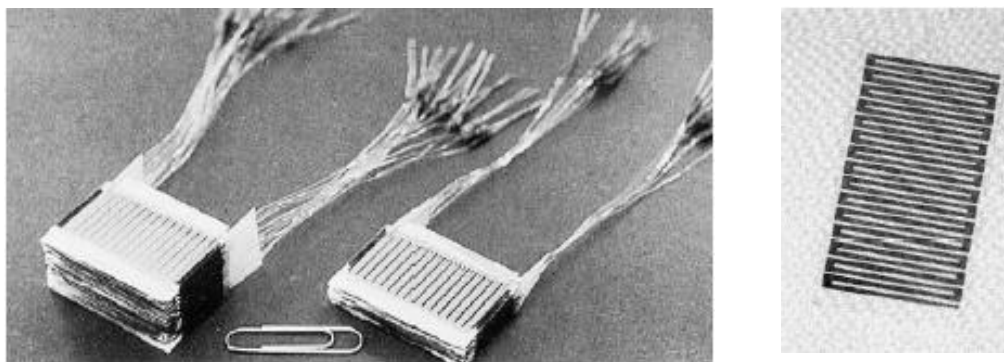
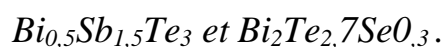


Figure II. 06 : Générateur thermoélectrique de Kim réalisé avec des couches



Quinze jonctions n-p sont déposées sur un substrat de verre suivant l'architecture présentée dans la Figure II. 06. La mise en série ou parallèle de 20 substrats permet d'obtenir des générations des courants respectifs de $1\mu A/K$ et $0,1mA/K$ pour une tension de $100mV/K$ et $5mV/K$ [06].

En 2007, Takashiri et Coll. s'intéressent à l'architecture utilisée par Kim avec 7 jonctions n-p, (présenter sur la Figure II. 07): Une tension de sortie maximale de $83,3mV$, pour une différence de température de $30K$, générant une puissance estimée de $0,21\mu W$ pour un module recuit à $523K$.

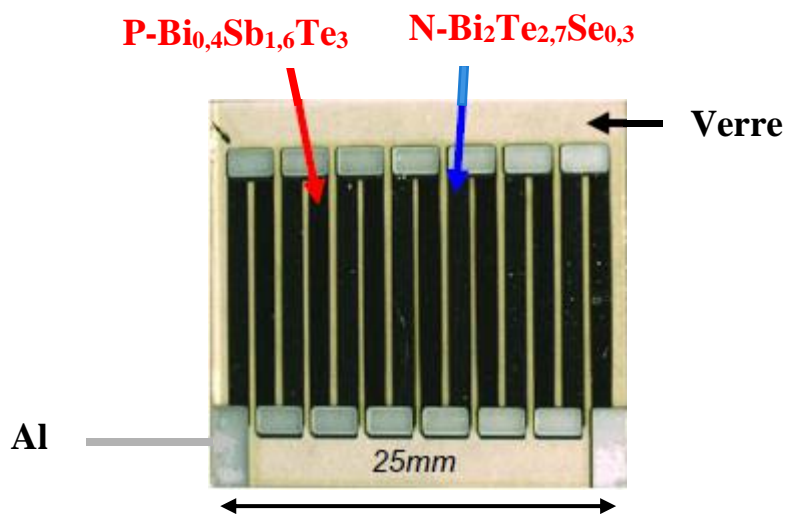


Figure II. 07 : Générateur thermoélectrique de Takashiri et coll.

II.9 Les modes de fonctionnement

Un générateur thermoélectrique pourrait être représenté par deux pattes constituées de deux semi-conducteurs 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 II. 08):

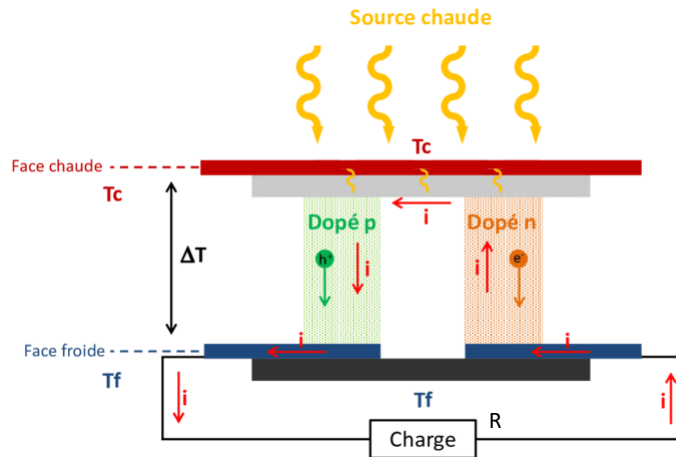


Figure II. 08 : Représentation d'un générateur thermoélectrique [07].

L'agitation thermique tend à éloigner les porteurs de la source chaude, ce qui entretient un courant dans le sens indiqué sur le schéma. La borne positive du générateur est donc celle qui est connectée au matériau p.

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 patte de type n et I_p est le courant dû à la patte p).

Pour simplifier, nous choisirons la même configuration géométrique pour les deux pattes.

Le pouvoir thermoélectrique du générateur est la somme des pouvoirs thermoélectriques de chaque patte [07].

$$S = S_n + S_p \quad (\text{EQU II. 08})$$

- S_n : le coefficient de Seebeck de la patte n (V/K).
- S_p : le coefficient de Seebeck de la patte p (V/K).

Leur conductivité thermique spécifique aussi [14]:

$$\lambda = \lambda_n + \lambda_p \quad (\text{EQU II. 09})$$

λ_n : la conductivité thermique de côté n (W/mK).

λ_p : la conductivité thermique de côté p (W/mK).

II.10 Modélisation du générateur thermoélectrique

La plupart des modèles combinent les équations de transferts thermiques avec les équations standards de la thermoélectricité qui prennent en compte les effets Seebeck, Fourier et Joule. Cette approche, proposée initialement par Ioffe en 1957, repose sur un bilan de puissance au niveau d'un matériau thermoélectrique. On qualifiera ce modèle de standard. Les équations II. 06, II. 07 et II. 08 suivantes décrivent le phénomène de génération thermoélectrique dans un module thermoélectrique.

Dans les formules qui vont suivre, n représente le nombre de pattes de la cellule, le courant traversant la cellule, T_f la température de la face froide, T_c la température de la face chaude des paves, pouvoir thermoélectrique S , de la résistivité électrique R et la conductivité thermique k

La puissance frigorifique absorbée Par la semelle froide de la cellule. Elle a pour expression

$$P_f = n[S.I.T_f - \frac{1}{2}.R.I^2 - k(T_c - T_f)] \quad (\text{EQU II. 10})$$

La puissance frigorifique absorbée par la semelle chaude de la cellule. Elle a pour expression

$$P_c = n[S.I.T_c + \frac{1}{2}.R.I^2 - k(T_c - T_f)] \quad (\text{EQU II. 11})$$

- La puissance électrique fournie à la cellule

$$P_{el} = (p_c - p_f) = n[S \cdot I \cdot (T_c - T_f) + R \cdot I^2] \quad (\text{EQU II. 12})$$

- Tension aux bornes de la cellule

$$U = n[S \cdot (T_c - T_f) + R \cdot I] \quad (\text{EQU II. 13})$$

D'après l'effet Seebeck (1824), une jonction PN soumise à une différence de température provoque l'apparition d'un champ électrique. A l'inverse, l'effet Peltier (1834) énonce que la circulation d'un courant dans une jonction impose la circulation d'un flux de chaleur [08]. En fonction des propriétés des matériaux utilisés de chaque côté de la jonction, le sens de transfert de la chaleur peut être contrôlé.

Un module thermoélectrique est une succession de jonctions PN utilisée dans le but de fournir une puissance électrique significative ou de permettre un transfert significatif de chaleur. Seul le mode de fonctionnement "génération électrique" est considéré. La figure II. 09 représente les sens de transfert de puissance dans la jonction.

La tension générée par effet Seebeck U_S est liée au gradient de température entre chaque côté du module [09].

$$U_S = S_{PN}(T_c - T_f) \quad (\text{EQU II. 14})$$

Le paramètre S_{PN} est le pouvoir thermoélectrique (PTE) de l'ensemble de la jonction PN. Si une charge électrique est connectée au module, un courant I_m circulera à travers le module et l'effet Seebeck provoquera un transfert de puissance de la source chaude vers la source froide. La différence entre la puissance prélevée du côté chaud P_{CS} et la puissance fournie à la source froide P_{fs} est égale à la puissance électrique générée P_s .

$$P_{CS} = S_{PN} I_m T_c \quad (\text{EQU II. 15})$$

$$P_{fs} = S_{PN} I_m T_f \quad (\text{EQU II. 16})$$



$$P_s = S_{PN} I_m (T_c - T_f) \quad (\text{EQU II. 17})$$

Il faut garder à l'esprit que les éléments P et N restent des matériaux qui possèdent une certaine résistivité électrique et conductivité thermique dépendant de la nature de ces matériaux.

L'effet joules transforme la puissance électrique en puissance thermique. On émet l'hypothèse que cette puissance thermique générée par effet Joules est équi-répartit entre la source chaude P_{cj} et froide P_{fj} . Le phénomène de conductance thermique des matériaux provoque un transfert thermique P de la source chaude à la source froide.

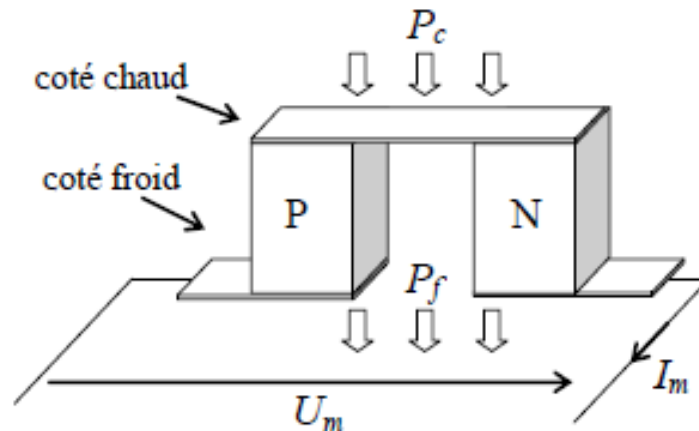


Figure II. 09 : Schéma d'une jonction (génération électrique).

$$P_J = R_{pn} I_m^2 \quad (\text{EQU II. 18}) \quad \text{avec} \quad R_{pn} = \frac{\rho_P(T)}{S_P} L_P + \frac{\rho_n(T)}{S_n} L_n \quad (\text{EQU II. 19})$$

$$P_{CJ} = P_{fJ} = \frac{R_{pn} I_m^2}{2} \quad (\text{EQU II. 20})$$

Avec R_{pn} , la résistance électrique de la patte P et de la patte N. Cette résistance dépend des paramètres intrinsèques de la jonction (longueur L et section S) ainsi que de la résistivité électrique ρ .

Le phénomène de conductance thermique des matériaux provoque un transfert thermique p_λ de la source chaude à la source froide. Ce transfert de puissance dépend de la différence de température entre les 2 sources ainsi que du paramètre d'échange conductif K_{pn} .

$$p_\lambda = \kappa_{pn}(T_C - T_f) \quad (\text{EQU II. 21}) \quad \text{avec} \quad \kappa_{pn} = \lambda_P(T) \frac{S_P}{L_P} + \lambda_p(T) \frac{S_n}{L_n} \quad (\text{EQU II. 22})$$

Afin de bien comprendre la répartition de puissance dans le module (Seebeck, Joule et conductance), elles peuvent être placées sur le schéma Figure II. 10.

A l'aide de cette figure, la puissance thermique prélevée à la source chaude P_c , fournie à la source froide P_f ainsi que la puissance électrique générée utilisable P_{el}

s'écrivent :

$$P_c = P_\lambda + P_{CS} - P_{CJ} \tag{EQU II. 23}$$

$$P_f = P_\lambda + P_{fs} + p_{ffj} \tag{EQU II. 24}$$

$$P_{el} = p_s - p_{cj} - p_{ffj} = p_{CS} - p_{fs} - p_{cj} - p_{ffj} \tag{EQU II. 25}$$

P_c, P_f :	Puissance de la source chaude et froide
P_λ :	Transfert par conductance thermique
P_{CS}, P_{fs}, P_s :	Transfert et conversion par effet Seebeck
$P_{Cj} P_{ffj}$:	Conversion par effet Joules
P_{el} :	Puissance électrique utilisable

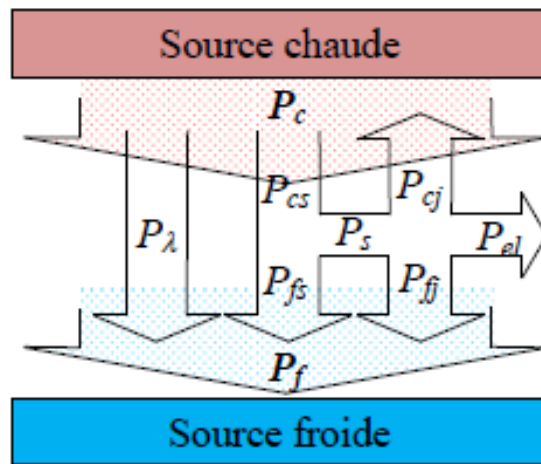


Figure II. 10 : Flux d'énergie dans le module.

II.10.1 Le rendement du MGT :

Si un convertisseur thermoélectrique opère comme un générateur idéal dans lequel il n'y a pas de perte de chaleur, l'expression de son rendement est alors définie comme

étant le rapport de la puissance électrique P_U délivrée par la résistance de charge R_C sur la puissance thermique absorbée du côté chaud Q_C , soit :

$$\eta = \frac{P_U}{P_C} \quad (\text{EQU II. 26})$$

La puissance électrique utile P_U fournie à la charge est :

$$P_U = (S_P - S_n) \times I \times \Delta T - RI^2 \quad (\text{EQU II. 27})$$

Le rendement du générateur peut être optimisé en jouant sur la résistance de charge, qui est reliée au courant débité I selon :

$$I = \frac{(S_P - S_n)}{R - R_C} \times \Delta T \quad (\text{EQU II. 28})$$

Quant à la puissance thermique absorbée Q_C , elle est la résultante du flux de chaleur, de l'effet Seebeck et de l'effet Joule soit :

$$Q_C = (S_P - S_n) \times I \times T_C + \lambda \times \Delta T - \frac{1}{2}RI^2 \quad (\text{EQU II. 29})$$

En injectant les équations (II. 25) et (II. 27) dans l'équation (II. 24), nous obtenons finalement l'expression du rendement maximum d'un générateur thermoélectrique :

$$\eta = \frac{T_C - T_f}{T_C} \times \frac{\sqrt{1 + ZT T_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT T_m} + \frac{T_f}{T_C}} \quad (\text{EQU II. 30})$$

Le maximum du rendement peut se mettre sous la forme :

$$\eta = \eta_f \times \eta_{th} \quad (\text{EQU II. 31})$$

Où η_f et η_{th} représentent respectivement le rendement de Carnot et le rendement propre au système thermoélectrique définis par :

$$\eta_f = \frac{T_c - T_f}{T_c} \quad (\text{EQU II. 32})$$

Et

$$\eta_{th} = \frac{\sqrt{1 + ZT T_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT T_m} + \frac{T_f}{T_c}} \quad (\text{EQU II. 33})$$

Dans cette dernière équation, ZT et T_m sont définis respectivement comme étant le facteur de mérite du couple n - p et la température moyenne, soit :

$$T_m = \frac{T_c + T_f}{2} \quad (\text{EQU II. 34})$$

Et

$$ZT = \frac{S^2 P_n}{\lambda \times \rho} \quad (\text{EQU II. 35})$$

Un raisonnement similaire permet, dans le cas d'un convertisseur thermoélectrique fonctionnant en réfrigérateur, de définir l'efficacité de ce dernier par le calcul du coefficient de performance (C.O.P.) comme étant :

$$C.O.P. = \frac{T_f}{T_c - T_f} \times \frac{\sqrt{1 + ZT T_m} - \frac{T_c}{T_f}}{\sqrt{1 + ZT T_m} + 1} = \frac{P_f}{P} \quad (\text{EQU II. 36})$$



CHAPITRE III :
Design et
simulation du
modèle MGT

III.1 INTRODUCTION

La puissance électrique ainsi que l'efficacité sont des paramètres très importants dans l'évaluation de la performance d'un dispositif thermoélectrique. Pour cette raison, elle est présentée dans presque tous les travaux qui portent sur l'analyse thermoélectrique.

L'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel (COMSOL) s'est avérée être une des meilleures solutions compte tenu de la difficulté des mesures expérimentales et des analyses. À cet effet, la méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.

De plus, cette méthode numérique avait été appliquée avec succès dans le calcul de la température et le potentiel électrique.

III.2 Utilisation d'un logiciel éléments finis

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM2000, CESAR, SAMCEF, etc. et dans notre cas en utilisant le logiciel COMSOL. Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- Analyses linéaire ou non d'un système physique continu;
- analyses statique ou dynamique;
- Prise en compte de lois de comportement complexes ;
- Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermique, électromagnétiques, thermoélectrique . . .) Pouvant être couplés ;
- Problèmes d'optimisation, etc.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale.

III.3 Description du logiciel « COMSOL Multiphysics »

La simulation numérique est une approche donnant la possibilité aux chercheurs d'analyser le comportement de plusieurs phénomènes qui, par leur complexité, échappent au calcul classique. La modélisation, quant à elle, est la mise en équations de ces phénomènes.

Vue la large gamme de problèmes scientifiques basés sur des équations aux dérivées partielles, COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis ou encore interagir avec des logiciels de programmation tels que Matlab [01].

COMSOL Multiphysics® est un logiciel de simulation polyvalent pour la modélisation de designs, de dispositifs et de procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la production et de la recherche scientifique.

COMSOL est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies, il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, thermoélectrique ...) et dans quel régime (stationnaire, temporel...) le modèle doit être construit selon ce choix, la modélisation est disponible en 1D, 2D, axisymétrique ou encore en 3D.

À propos de cette étude, le logiciel COMSOL Multiphysics a été retenu pour modéliser le générateur thermoélectrique. Le modèle géométrique du module thermoélectrique que nous avons conçu et utilisé lors de simulations thermiques est présenté figure III. 01. Ce module est essentiellement constitué d'une patte p et d'une patte n connectées en série.

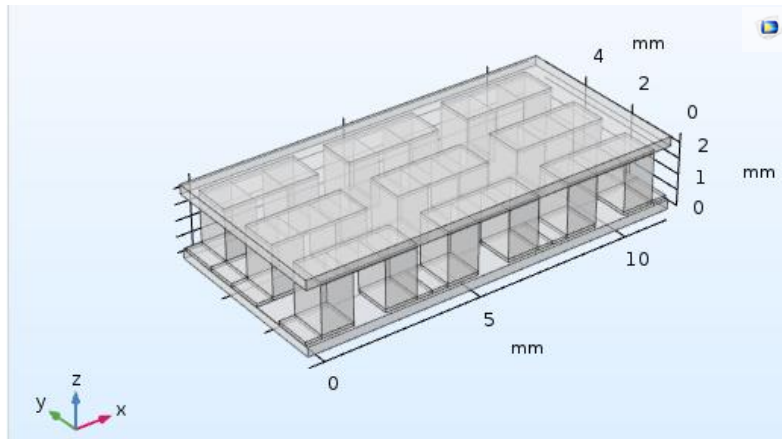


Figure III. 01 : Le modèle géométrique du module thermoélectrique par COMSOL.

III.4 Simulation par COMSOL Multi Physique du MGT

Lorsque les solutions analytiques sont difficiles à employer, les méthodes numériques peuvent être une alternative intéressante. Les simulations numériques sont un outil puissant dans l’optimisation du dispositif. Avec la modélisation 3D par éléments finis et les simulations effets physiques multidimensionnels engendrés par le transfert de chaleur, il est possible d’évaluer un comportement thermoélectrique avec la précision et de proximité au cas réel. Dans ce travail, nous avons utilisé COMSOL MULTIPHYSICS comme outil numérique de simulation.

Il est possible de modéliser un problème thermoélectrique dans COMSOL MP en couplant différentes interfaces physiques comme les courants électriques, le transfert de chaleur dans les solides, l’électromagnétique ainsi que l’effet thermoélectrique. Depuis la mise à jour 5.3, COMSOL MP propose un module thermoélectrique où les différents domaines de physique sont déjà implémentés.

Les équations fondamentales qu’emploie COMSOL MP lors simulations thermoélectrique sont :

$$\begin{array}{l} \text{Flux de} \\ \text{chaleur} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \vec{q} = S \cdot T \cdot \vec{J} - \kappa \cdot \vec{\nabla} T \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{q} = \vec{J} \cdot \vec{E} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{(EQU III. 01)} \\ \text{(EQU III. 02)} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Courant} \\ \text{électrique} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} - \sigma \cdot S \cdot \vec{\nabla} T \\ \nabla \cdot \vec{j} = 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{(EQU III. 03)} \\ \text{(EQU III. 04)} \end{array}$$

Où \vec{q} est le flux thermique, \vec{j} la densité de courant, E le champ électrique. Par ailleurs, l’origine de ces équations est expliquée dans le chapitre II. COMSOL couple toutes ces équations. Par exemple ; en utilisant l’expression du champ électrique dans un cas unidimensionnel (direction X) :

$$\vec{E}_x = S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{J_x}{\sigma} \quad \text{(EQU III. 05)}$$

Ceci permet d'obtenir une équation différentielle partielle exprimant le processus thermoélectrique:

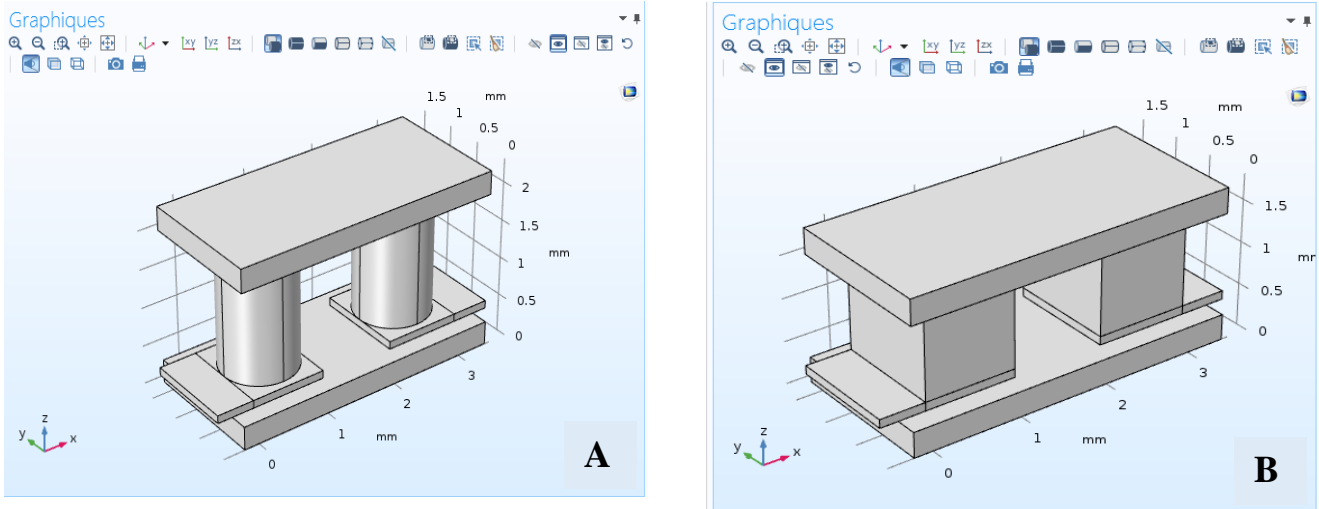
$$\kappa \frac{\partial T^2}{\partial x^2} \vec{e}_x - \vec{J}_x \frac{\partial(ST)}{\partial x} + \vec{J}_x \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -j \frac{x^2}{\sigma} \vec{e}_x \quad (\text{EQU III. 06})$$

On voit que COMSOL MP utilise les équations fondamentales du flux de charges électriques et de chaleur qui sont à la base du phénomène thermoélectrique (voir chapitre II). COMSOL précède ensuite à l'implémentation de ces équations dans le modèle géométrique construit par l'utilisateur en prenant en compte les contraintes physiques qu'il a introduites.

- Au cours de ce mémoire; les simulations numériques ont été réalisées en deux étapes :

La première étape de simulation traite des phénomènes thermiques. Elle a pour but d'évaluer la longueur des pattes et distances entre les pattes d'un thermocouple les plus optimales. Les simulations de comportement thermique ont été réalisées dans un mode temporel. L'objectif de la deuxième étape est d'évaluer les performances thermoélectriques du générateur (tension, courant ...) cette étape se base sur des phénomènes électriques et elle est réalisée dans un mode stationnaire.

On a comparé par simulation deux modèles de thermocouple avec des pattes cylindrique et rectangulaire. Ces modèles ont été conçus avec des alliages à base de tellure de bismuth (Bi_2Te_3); un matériau très connu pour sa performance thermoélectrique à basse température.



*Figure III. 02 : A-Model géométrie d'un thermocouple a des pattes cylindrique
B-Model géométrie d'un thermocouple a des pattes rectangulaires.*

III.5 L'interface graphique de COMSOL (Les étapes de simulation)

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparait. C'est lui que permettra de spécifier le ou les modèles physiques qui seront utilisés.

C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables propres à ce modèle (Figure III. 03).

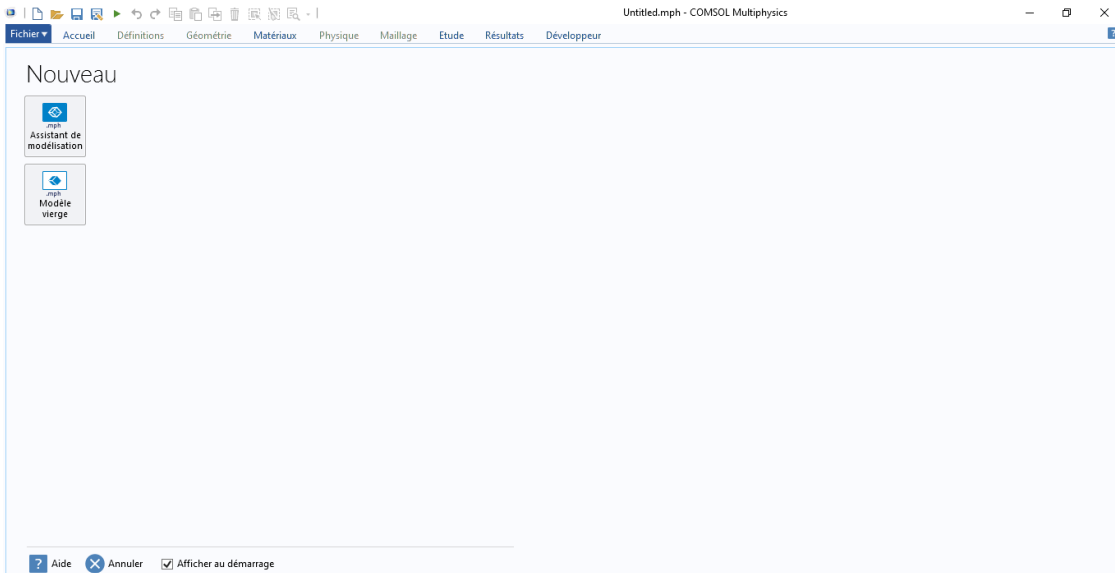


Figure III. 03 : Fenêtre de sélectionner l'espace.

Après on choisit « sélectionner l'espace » pour préciser les dimensions du travail (0D, 1D, 1D axisymétrique, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D)

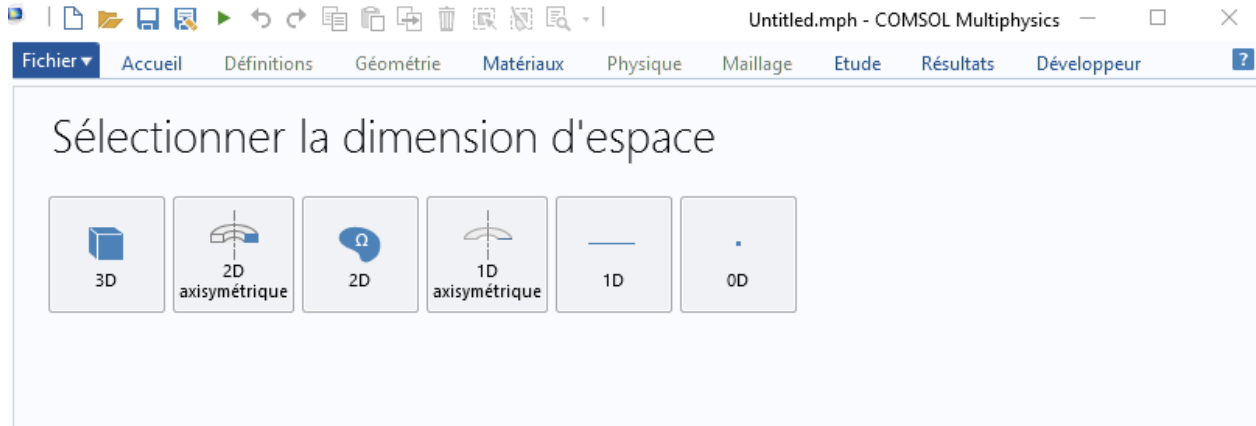


Figure III. 04 : Fenêtre de « sélectionner la dimension d'espace ».

Dans cette étape, on choisit le type de champ physique du modèle (physique). (Figure III. 05)

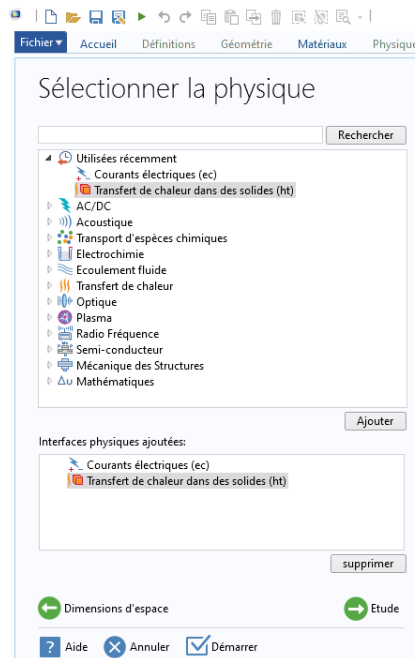


Figure III. 05 : Fenêtre de « SELECTIONNER LA PHYSIQUE (MODÈLE) ».

La prochaine étape est de sélectionner le type d'étude qu'on doit appliquer « Stationnaire ». Dans cette étude on choisit le type « STATIONNAIRE » et « TEMPOREL ».

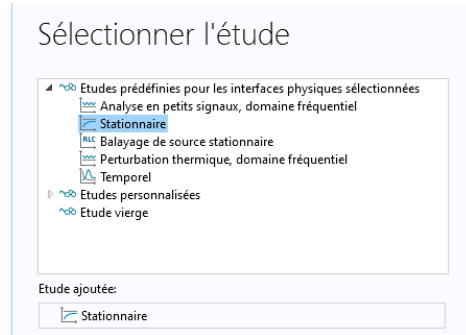


Figure III. 06 : Fenêtre “SELECTIONNER L’ETUDE”.

Ensuite, on dessine la géométrie de l'élément à simuler à travers des outils de la rubrique « GEOMETRIE ». Pour cela, on définit d'abord les unités de mesure (m, cm, mm ...), puis on construit la forme du modèle à partir de formes simples déjà disponibles (rectangle, circule...) ou bien importer la forme d'un autre logiciel de dessin.

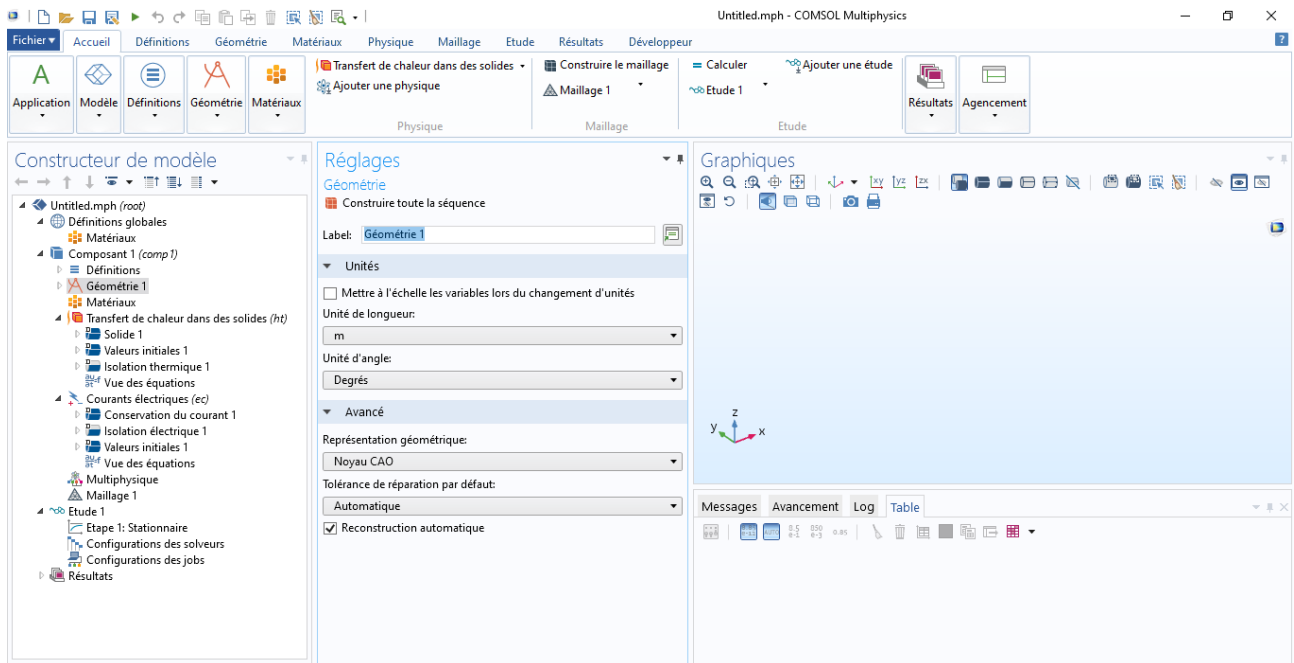


Figure III. 07 : fenêtre pour dessin Géométrie.

III.5.1 Détails techniques

Le module « design modeler » du logiciel COMSOL a été utilisé pour modéliser la géométrie des thermocouples et module GTE. Au total, 3 modèles ont été créés (deux thermocouples et un module thermoélectrique). Le premier modèle a été conçu à partir de la géométrie d'un thermocouple rectangulaire, puis cylindrique et le module générateur thermoélectrique qui porte 9 thermocouples rectangulaires. Toutes les dimensions ont été résumées dans le tableau III. 01 et III. 02, quelques-unes sont montrées sur la figure III. 08

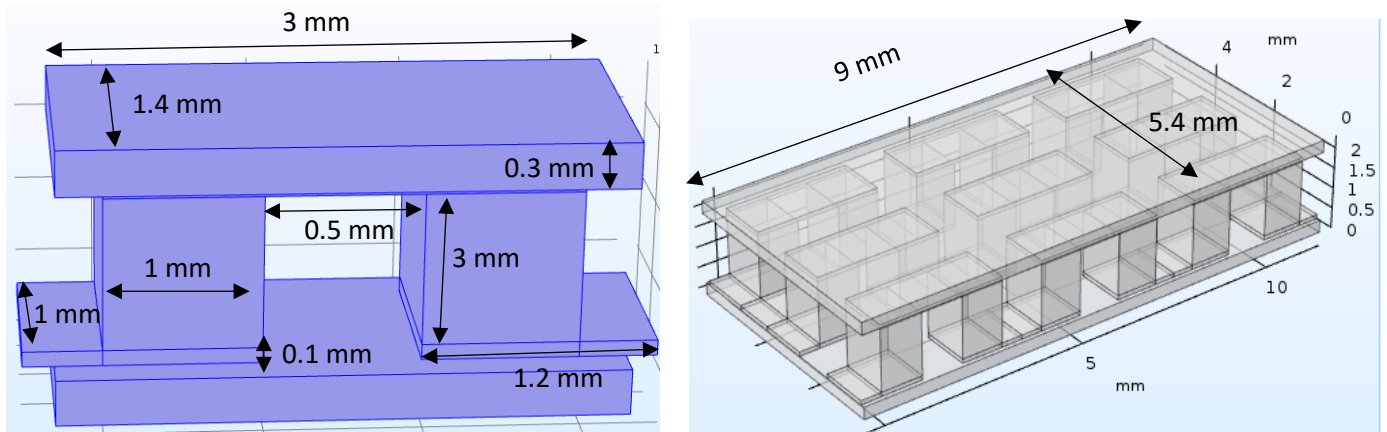


Figure III. 08: Dimensions générales du thermocouple rectangulaire et son module

Réglages
Paramètres

Paramètres

Nom	Expression	Valeur	Description
almnX	3	3	longeur sur l'axe X de alumina
almnY	1.4	1.4	longeur sur l'axe Y de alumina
almnH	0.3	0.3	hauteur de alumina sur l'axe Z
C1X	1	1	longeur du contact de cuivre sur l'axe X
C1Y	1.2	1.2	longeur du contact de cuivre sur l'axe Y
C1H	0.1	0.1	hauteur du contact de cuivre sur l'axe Z
ptX	1	1	longeur des pattes sur l'axe X
ptY	1	1	longeur des pattes sur l'axe Y
HT	3	3	hauteur des pattes sur l'axe Z
V0	0.3	0.3	la: tension du terminal

Tableau III. 01: Dimensions des éléments dans le premier modèle thermocouple rectangulaire.

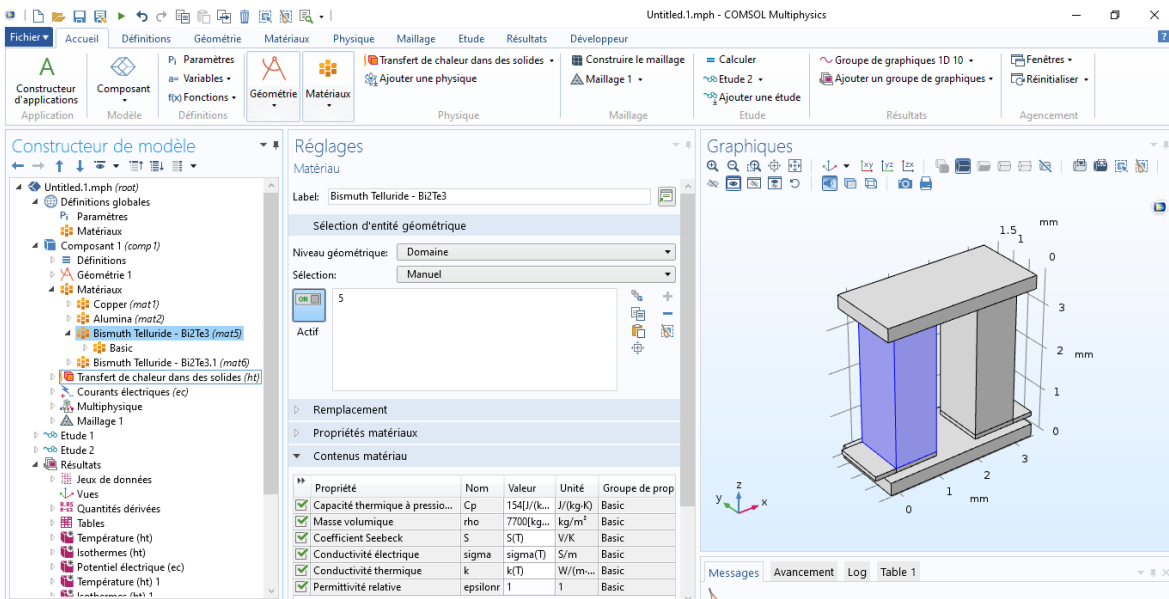
Réglages
Paramètres

Paramètres

Nom	Expression	Valeur	Description
almnX	3	3	la longueur de alumina sur l'axe X
almnY	1.4	1.4	la longueur de alumina sur l'axe Y
almnH	0.3	0.3	la hauteur de alumina sur l'axe Z
C1X	1	1	la longueur du contact en cuivre sur l'axe X
C1Y	1.2	1.2	la longueur du contact en cuivre sur l'axe Y
C1H	0.1	0.1	la hauteur du contact en cuivre sur l'axe Z
PTX	0.5	0.5	le rayon des pattes
HT	1.5	1.5	la hauteur des pattes sur l'axe Z
v0	0.3	0.3	la tension du terminal

Tableau III. 02: Dimensions des éléments dans la 2eme modèle thermocouple cylindrique.

Par la suite, on définit les matériaux utilisés dans chaque domaine du modèle Figure III. 09. Dans notre étude il y a trois différents matériaux on a choisi le matériaux Bi_2Te_3 pour les deux pattes (une de type n et l'autre de type p). Le Cuivre pour les contacts et l'alumine (Al_2O_3) comme dissipateur thermique.



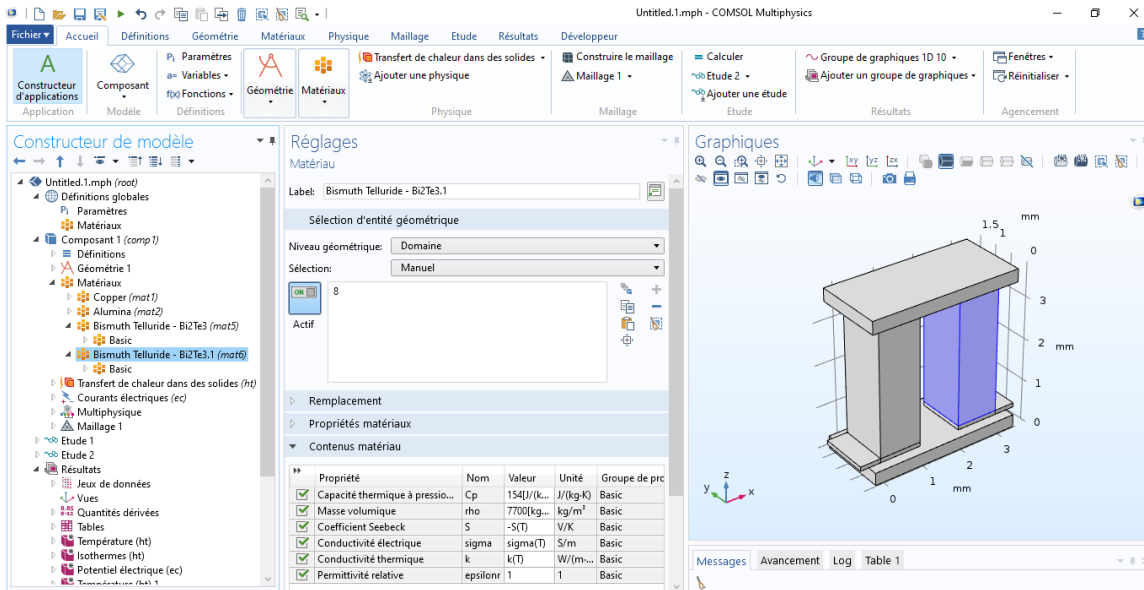
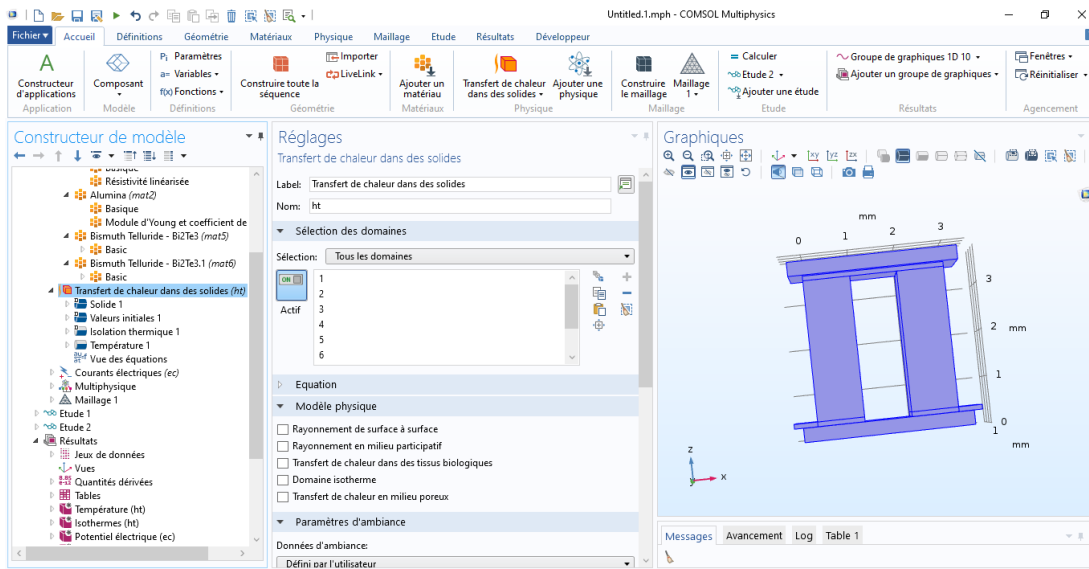


Figure III. 09 : Sélection des matériaux.

Après, on sélectionne le Type de champs physique. Dans un premier temps, nous avons implémenté le module Transfert de Chaleur dans les Solides sur toutes les composantes comme condition physique générale qui définit la base la physique de transfert de chaleur dans l’objet simulé. Nous avons aussi ajouté le module courants Electriques sur toutes les composantes (sauf les dissipateurs thermiques) pour introduire la physique du transport des charges électriques. Dans ce cas on doit préciser l’emplacement de la mise à terre ‘GROUND’, et la borne de tension « TERMINAL » (où la tension est appliquée).



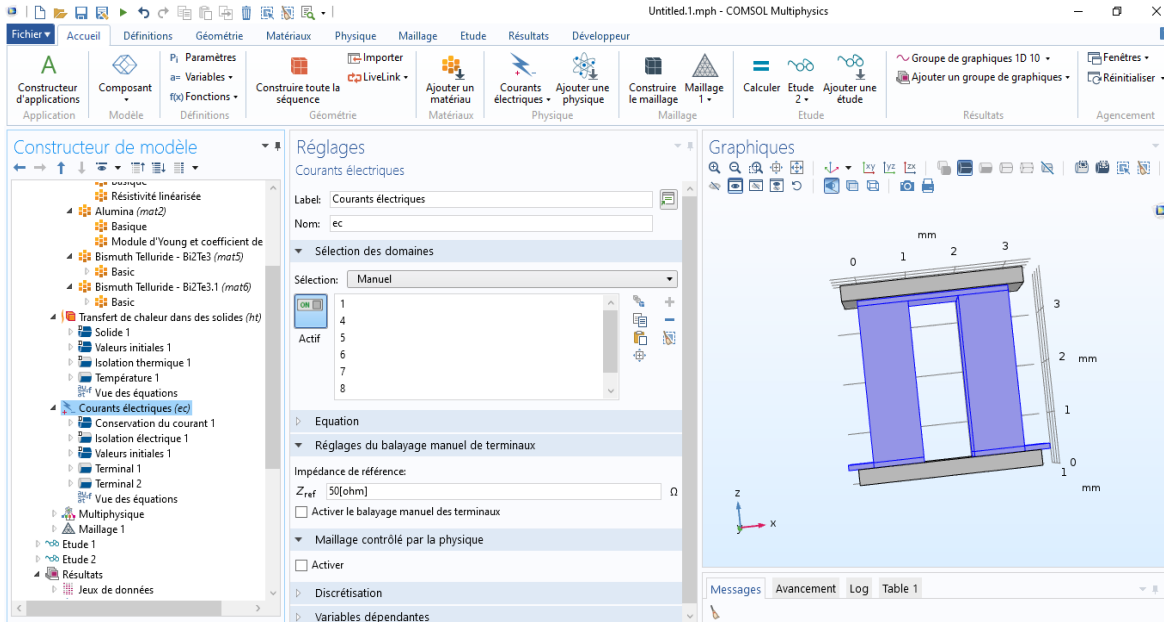


Figure III. 10 : Détermination de la physique.

Et puis une condition limite de température ambiante ($293.15\text{ K} = 20^{\circ}\text{C}$) a été appliquée pour simuler la source de chaleur.

III.6 Résultats de simulation

Cette dernière étape lance le programme de calcul des propriétés physiques recherchés. À partir de la rubrique « Résoudre » nous procédons à la résolution du problème, la figure III. 11 représente, le résultat de cette simulation. Cet affichage constitue la dernière étape de notre simulation qui est ou l’affichage des résultats de la simulation (Post-traitement)

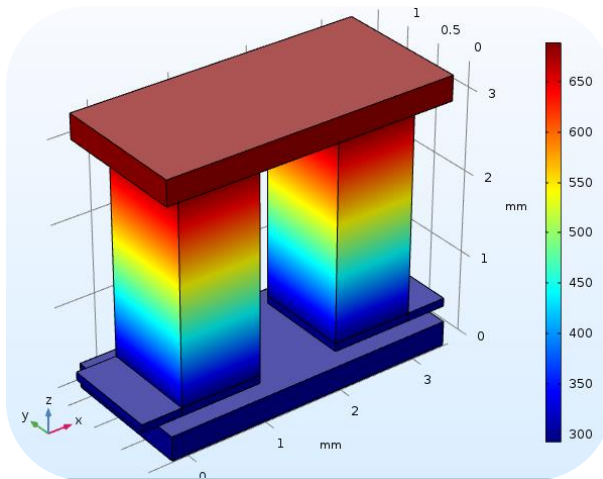


Figure III. 11 : Résultats de simulation.

III.7 Simulation

La caractérisation expérimentale des modules TE de génération d'électricité est basée sur des essais de mesure qui consistent à imposer une différence de température entre les deux surfaces du module. Cette différence de température va permettre de générer une différence de potentiel ou un courant électrique, selon le circuit de mesure. Pour cela, le système de mesure doit contenir une source chaude et une source froide afin de produire ce gradient de température.

Cette étude de simulation est appliquée aux thermocouples rectangulaires, cylindrique et le module générateur composé de 9 thermocouples rectangulaires.

Quatre paramètres doivent être considérés dans cette étude sur le comportement thermique :

- La longueur des pattes L : c'est l'un des principaux paramètres à déterminer dans l'établissement du gradient de température visé. La détermination de ce paramètre pour le matériau utilisé est la motivation principale de cette étude numérique sur le comportement thermique. Nous avons fait varier la hauteur pour le matériau utilisé sur les pattes n et p du Bi_2Te_3 .
- La distances entre les pattes n et p.
- Le temps t : Les processus thermiques sont temporels et doivent donc être considérés en fonction du temps du processus. Nous cherchons le temps au bout duquel le gradient de température dans le thermocouple est stabilisé.
- Le mode stationnaire : Dans le cadre de simulations électriques (la tension), le temps t est fixé.

III.7.1 Architecteur Thermocouple à pattes rectangulaires

La figure III. 12 montre un exemple de simulations avec le gradient de température.

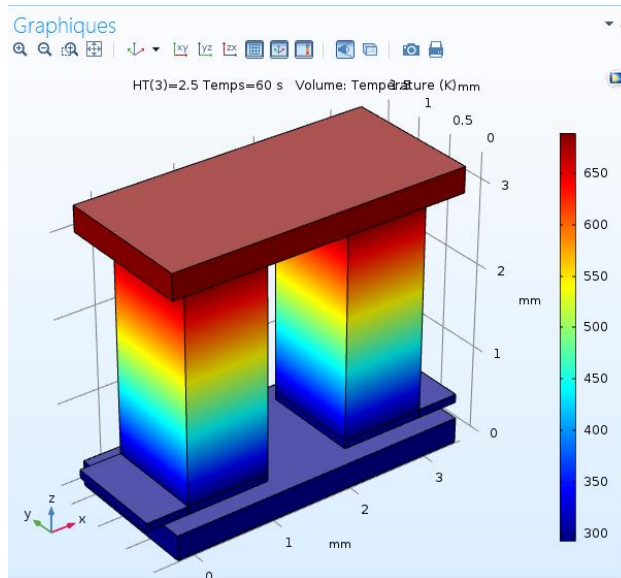


Figure III. 12 : Simulation thermique dans le thermocouple.

La figure III. 13 montre un exemple de simulations avec la distribution du potentiel électrique applique sur le module thermoélectrique.

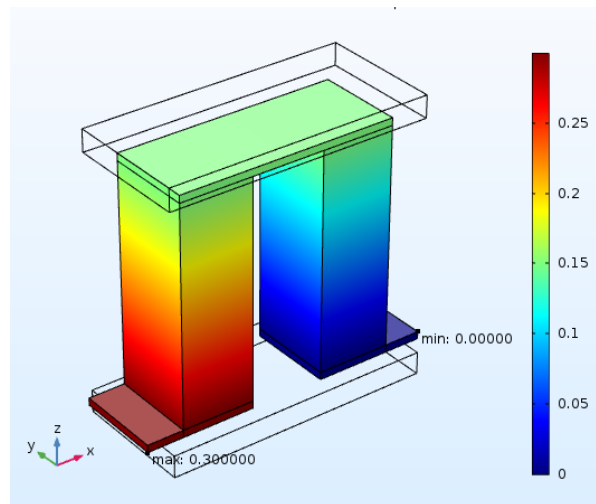


Figure III. 13 : Simulation du potentiel électrique.

La figure III. 14 montre la simulation avec la variation du potentiel électrique applique sur le module thermoélectrique dans l'intervalle (0.1 - 0.3 V).

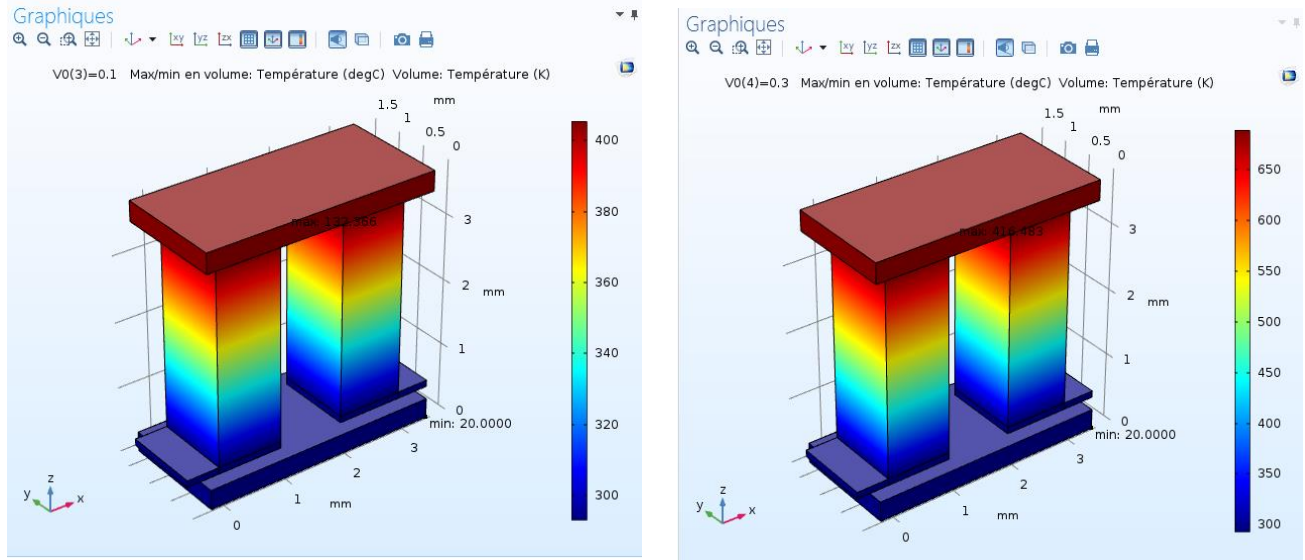


Figure III. 14 : Variation de température en fonction de tension.

III.7.2 Architecteur Thermocouple à pattes cylindriques

La figure III. 15 montre la simulation avec le gradient de température

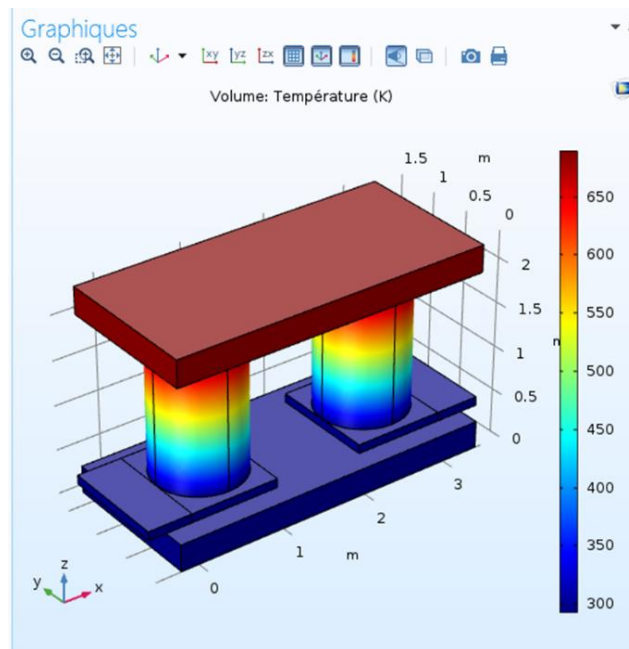


Figure III. 15 : Simulation thermique dans un thermocouple.

La figure III. 16 montre la simulation avec la circule du potentiel électrique applique sur le module thermoélectrique

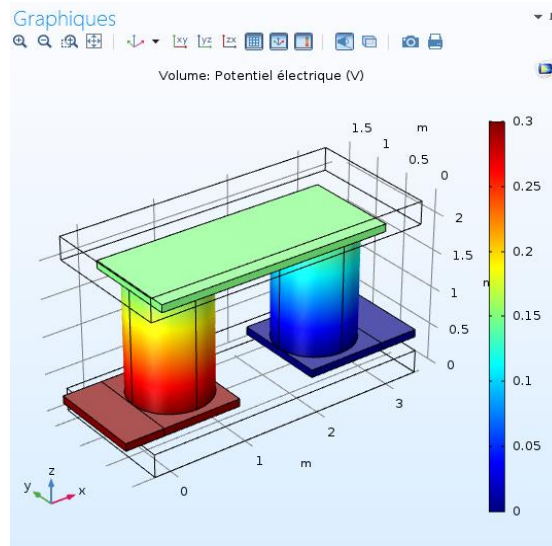


Figure III. 16 : Distribution de la tension le long du dispositif thermoélectrique.

III.7.3 Architecteur de générateur thermoélectrique à neuf thermocouples

La figure III. 17 montre la géométrie d'un générateur thermoélectrique composé de 9 thermocouples couplée en série électriquement et en parallèle thermiquement.

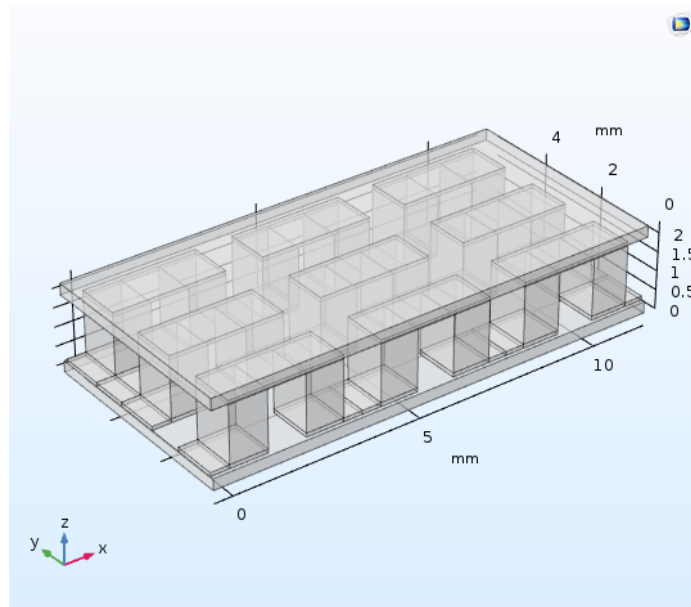


Figure III. 17 la géométrie d'un générateur thermoélectrique composé de 9 thermocouples.

La figure III. 18 montre la simulation avec le gradient de température d'un modèle du générateur thermoélectrique.

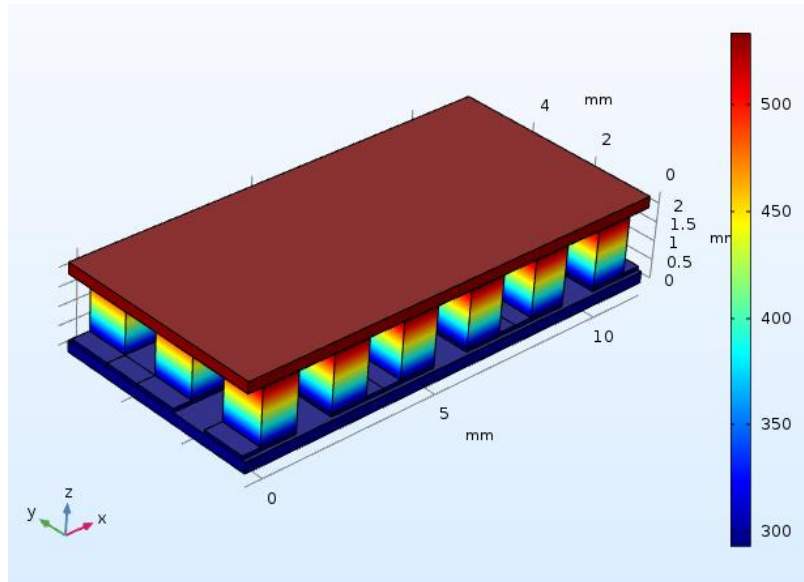


Figure III. 18 : Simulation thermique dans un module thermoélectrique.

La figure III. 19 montre la simulation avec le potentiel électrique appliqué sur le générateur thermoélectrique.

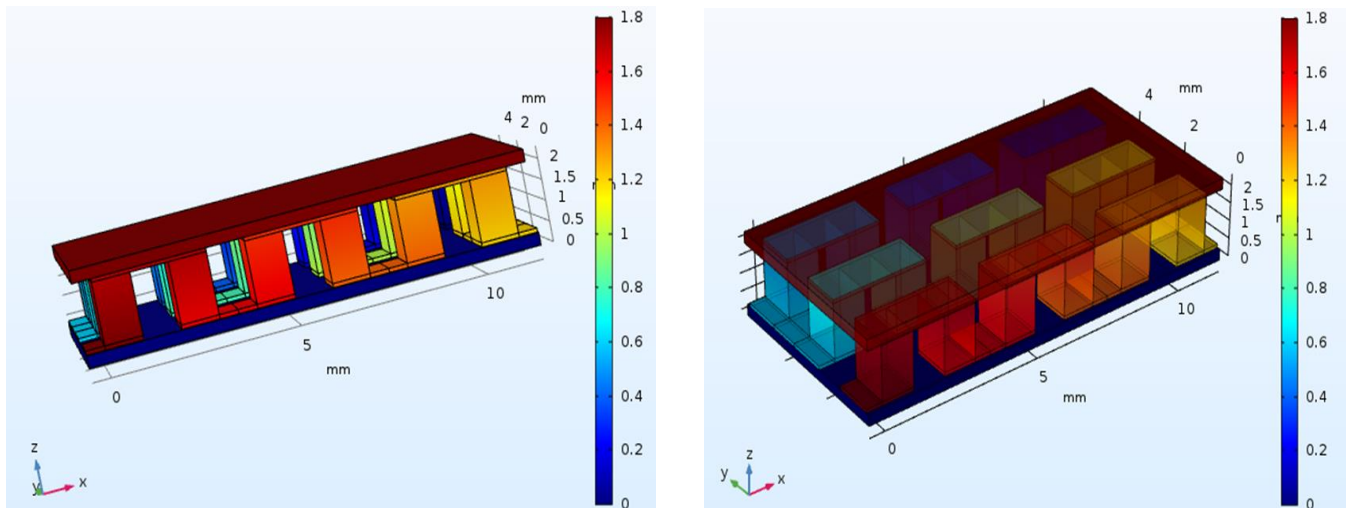


Figure III. 19 Distribution de potentiel dans un générateur composé de 9 thermocouples.

Le tableau suivant représente les paramètres d'entrés, les paramètres tracés par COMSOL:

Paramètres D'entrées	Les valeurs						
Le temps(s)	0-60						
Hauteur (HT) (mm)	4	3.5	2.5	1.5	1	/	/
La distance (D) (mm)	0.3	0.6	0.9	1.2	/	/	/
La tension(v)	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	/	/
Courbe Tracé Par COMSOL	T=f (t)	Température en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT) et pour une tension donner"					
	I=f (t)	Courant en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT) "					
	T=f(V)	Température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une longueur (HT)donner"					

Tableau III. 03: Paramètres d'entrés, paramètres calculés et puis tracés par COMSOL.

III.8 Résultats des simulations et discussion

III.8.1 Etude du thermocouple

III.8.1.1 Influence de la variation de la longueur des pattes

III.8.1.1.1 Géométrie rectangulaire

III.8.1.1.1.1 La température en fonction du temps $T=f(t)$

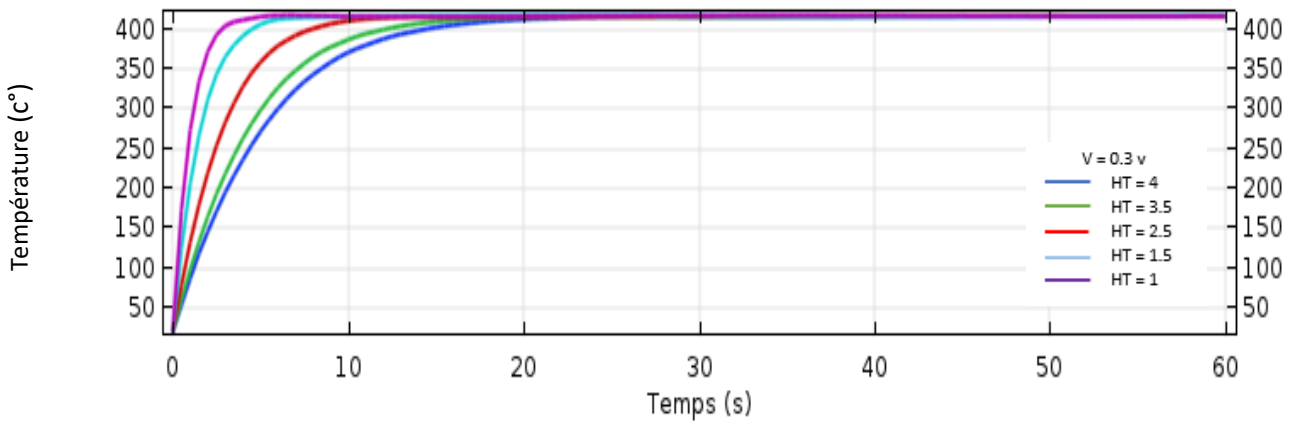


Figure III. 20 : Température en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT) et pour une tension donnée".

III.8.1.1.1.2 Courant électrique en fonction du temps $I=f(t)$

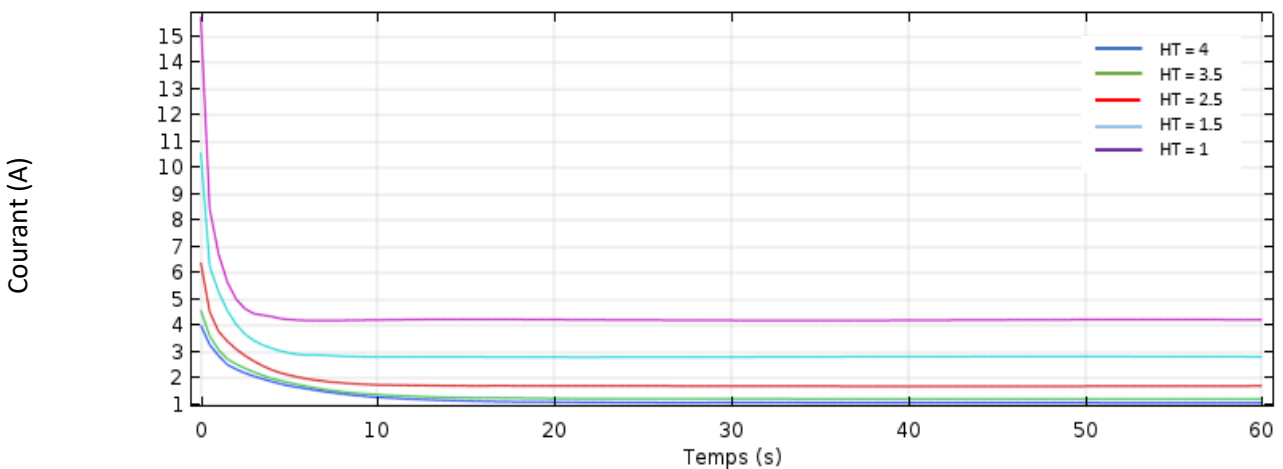


Figure III. 21 : Courant en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT)".

III.8.1.1.3 Température en fonction de la tension $T=f(V)$

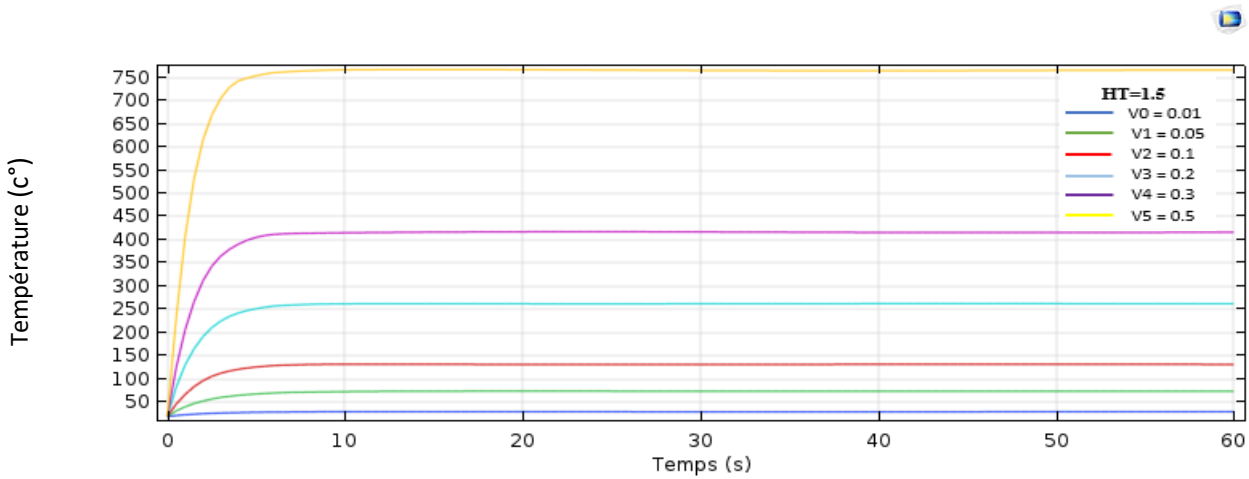


Figure III. 22 : Température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une longueur (HT) donner".

III.8.1.1.2 Géométrie cylindrique

III.8.1.1.2.1 La température en fonction du temps $T=f(t)$

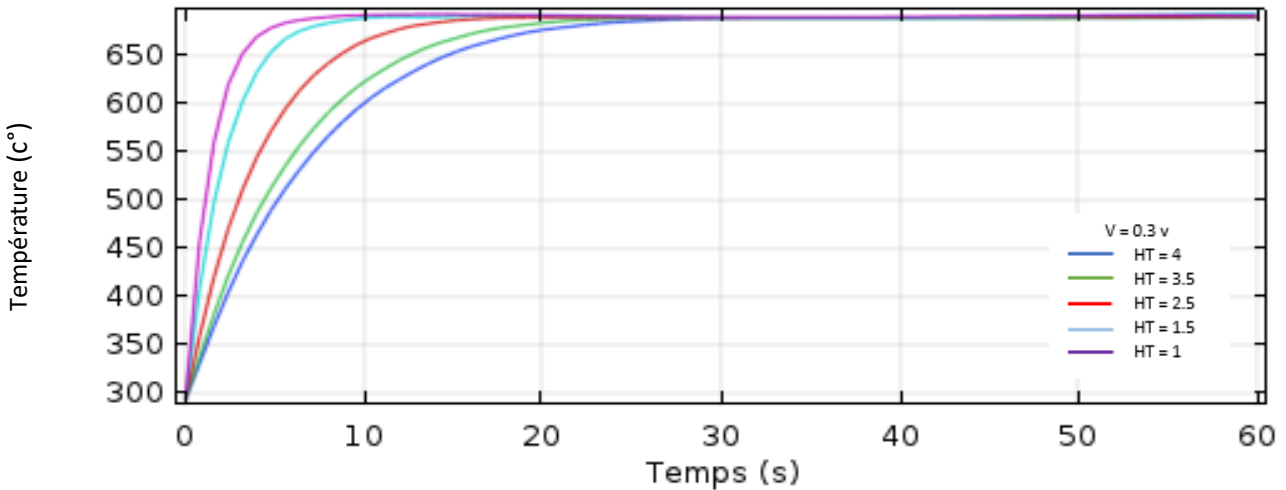


Figure III. 23 : température en fonction du temps "pour différentes hauteurs (HT) et pour une tension donner".

III.8.1.1.2.2 Courant électrique en fonction du temps $I=f(t)$

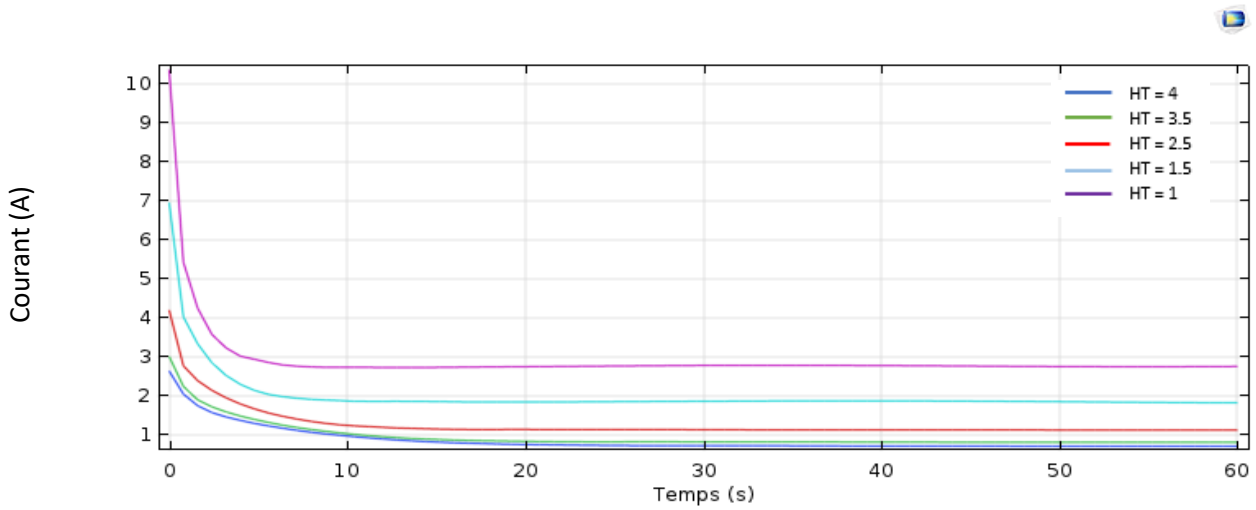


Figure III. 24 : courant en fonction du temps " pour différentes hauteurs (HT)".

III.8.1.1.2.3 Température en fonction de la tension $T=f(V)$

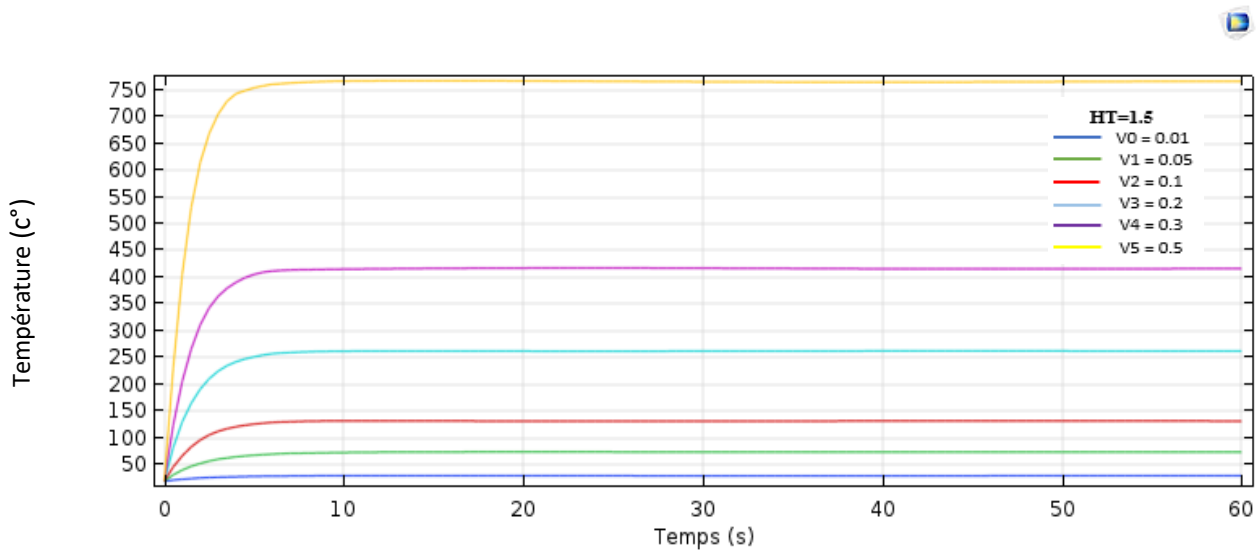


Figure III. 25 : température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une hauteur (HT) donner".

III.8.1.1.3 Remarques

Les figures 20 et 23 présente la courbe de température en fonction de temps. Ce sont des courbes non linéaires qui comportent deux parties, ils montrent les résultats de simulations de la température entre les extrémités chaudes et froides en fonction de la longueur des pattes pour le matériaux semi-conducteur Bi_2Te_3 . Selon les simulations sur COMSOL, la différence de température commence par augmenter avec la longueur des pattes. Température augment jusqu'à l'équilibre.

D'après les figures Nous constatons que plus les pattes sont courtes, plus le flux de chaleur traversant le module est important, et ce pour les deux gammes de température présentées. En effet, la quantité du flux de chaleur qui circule à travers le MTE dépend de la conductance thermique des pattes. Plus les pattes sont courtes, plus il y a de conductance thermique et donc, une quantité plus grande du flux de chaleur circule à travers le module.

La diminution de la différence de température à travers les jonctions est plus prononcée pour les modules à pattes courtes. Ceci aura des répercussions sur la puissance générée et pourrait expliquer les écarts dans les valeurs de la tension entre les deux catégories de modules qu'on verra dans la prochaine section; plus la longueur des pattes est longue plus le temps d'équilibre est grand, vis-vers-ça.

Figures 21 et 24 présente le courant électrique en fonction du temps. En constate une décroissance exponentielle du courant jusqu'à une valeur minimale.

La génération du courant se fait durant le régime de déséquilibre, 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.

Sur les figures 22 et 25 La courbe de tension en fonction de la température est une courbe non linéaire comporte deux partie. Quand la variation du courant prend un temps plus long (à partir de 10s), l'effet Peltier est plus prononcé, ce qui implique la génération d'une chaleur responsable de la perturbation de la température dans cet intervalle de temps. Évidemment, si la température est perturbée, ceci va influencer sur la différence de température ΔT et par conséquent sur les quantités mesurées à partir de ce paramètre comme la tension, le courant et la puissance

On déduit que le coefficient de Seebeck S du matériau est sensible à la température (T).

III.8.1.2 Influence de la variation de la distance entre les pattes

III.8.1.2.1 Géométrie rectangulaire

III.8.1.2.1.1 La température en fonction du temps $T=f(t)$

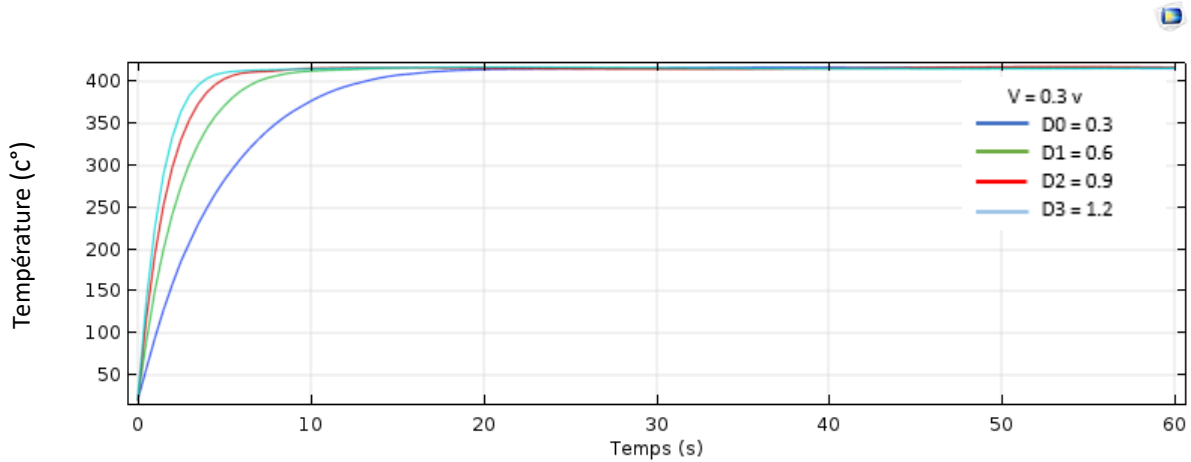


Figure III. 26 : température en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes et pour une tension donnée".

III.8.1.2.1.2 Courant électrique en fonction du temps $I=f(t)$

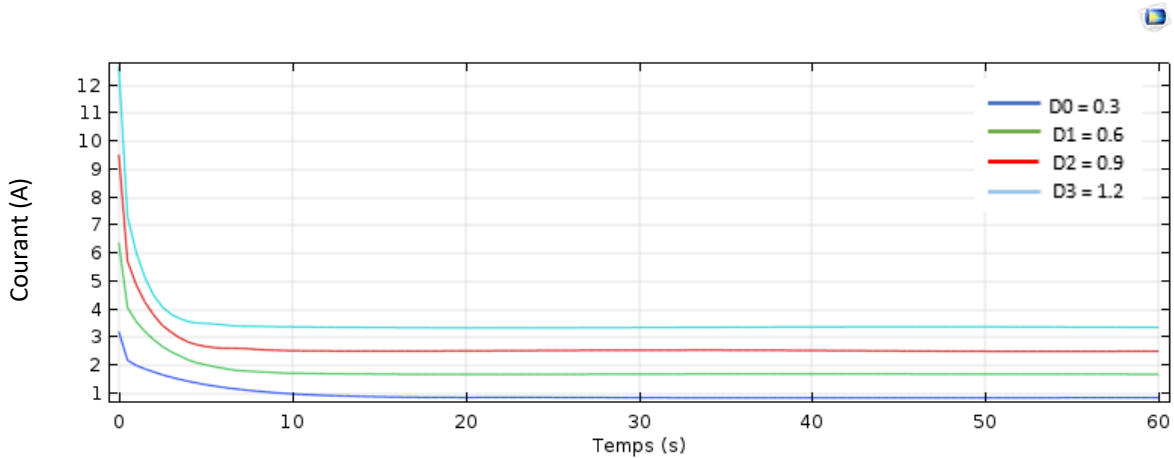


Figure III. 27 : courant en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes".

III.8.1.2.1.3 Température en fonction de la tension $T=f(V)$

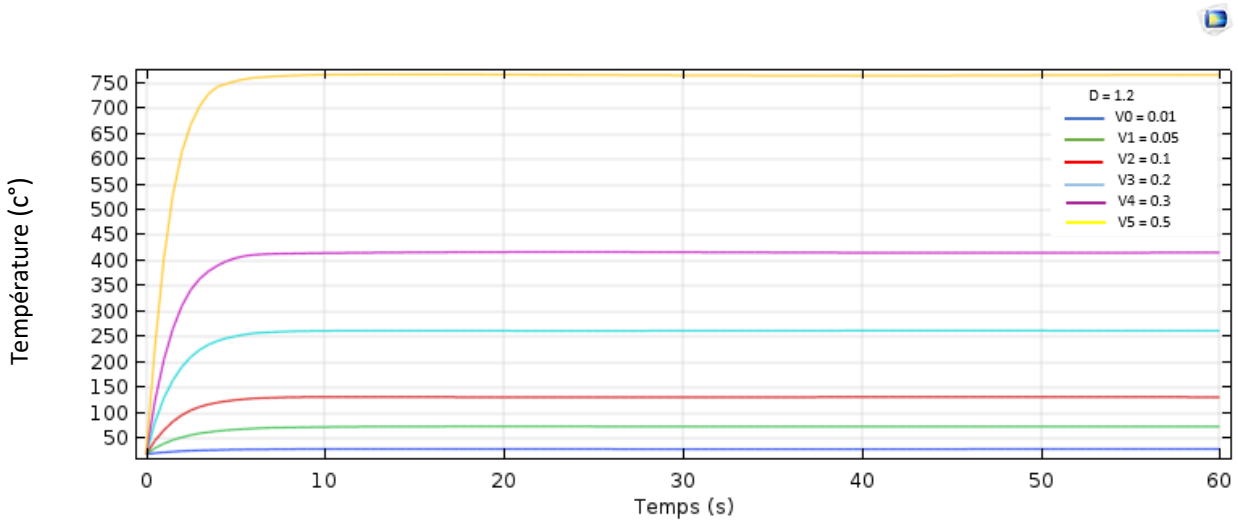


Figure III. 28 : température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une distance entre les pattes donner".

III.8.1.2.2 Géométrie cylindrique

III.8.1.2.2.1 La température en fonction du temps $T=f(t)$

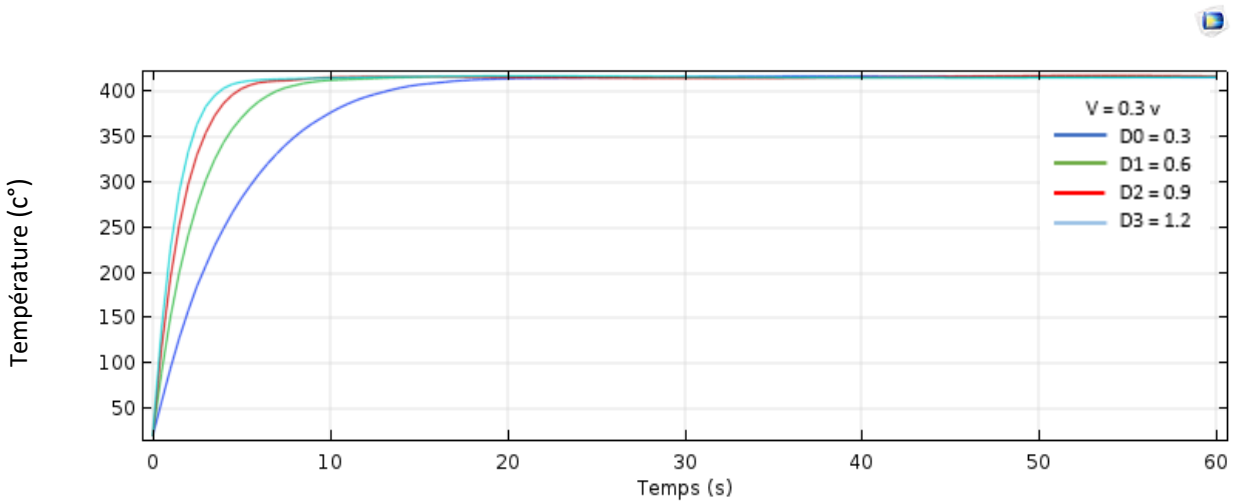


Figure III. 29: température en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes et pour une tension donner".

III.8.1.2.2.2 Courant électrique en fonction du temps $I=f(t)$

III.8.1.2.2.2 Courant électrique en fonction du temps $I=f(t)$

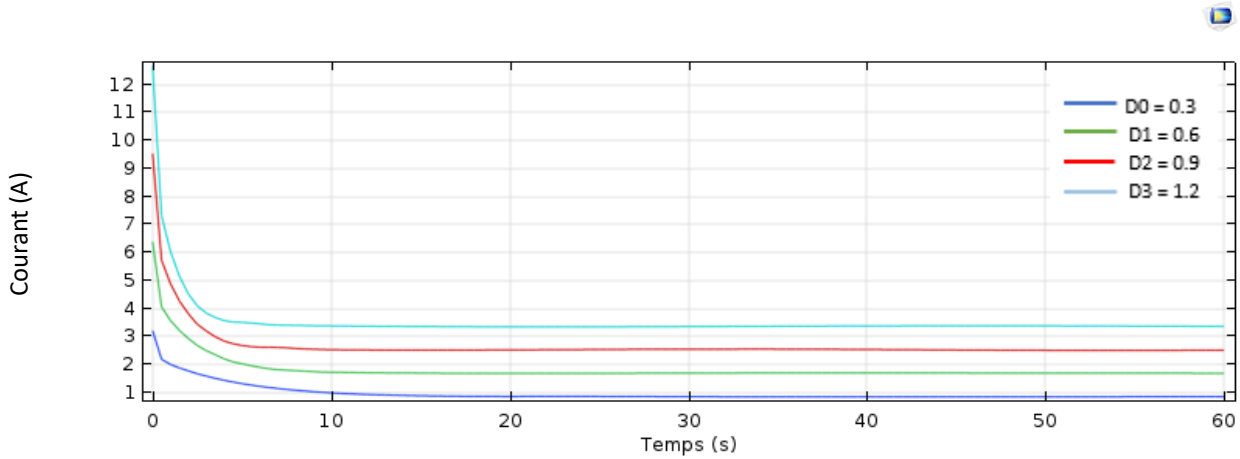


Figure III. 30 : courant en fonction du temps "pour différentes distances entre les pattes donner".

III.8.1.2.2.3 Température en fonction de la tension $T=f(V)$

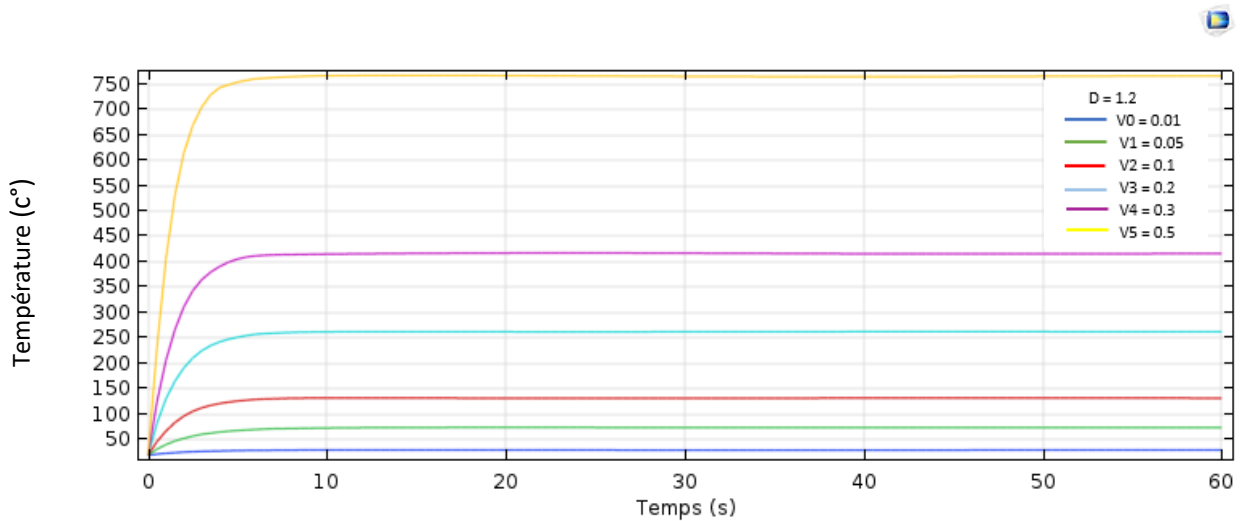


Figure III. 31: température en fonction du temps "pour différentes tensions V et pour une distance entre les pattes donner".

III.8.1.2.3 remarques

Les figures 26 et 29 présente la courbe de température en fonction de temps sont des courbes non linéaires comportent deux parties.

Après une certaine durée de temps, le changement du flux de chaleur entraine une variation de la distance entre les pattes. Autrement dit, ceci résultera en une température

de chauffage ou de refroidissement (T_C et T_f) différente sur les deux surfaces du module TE.

Les figures 27-30 représentent la distribution de la courant le long du module thermoélectrique. Avec cette configuration le module thermoélectrique fonctionnera en mode Peltier en générant une différence de température sur ses deux faces.

La caractéristique du courant généré par le générateur thermoélectrique en fonction de la température et la distance entre les pattes sont des courbe croissante, ce dernier atteint une valeur maximale, et puis on constate une décroissance, pour cela on peut dire que la température avec variation de la distance a un effet non linéaire sur la thermoélectricité.

III.8.2 Etude du module générateur thermoélectrique

À partir des résultats obtenus du les deux modèles de thermocouples (pattes rectangulaire et cylindrique) nous avons choisi un thermocouple qu'il est donné des bons résultats, la figure III. 32 montre le thermocouple rectangulaire qui nous avons choisi

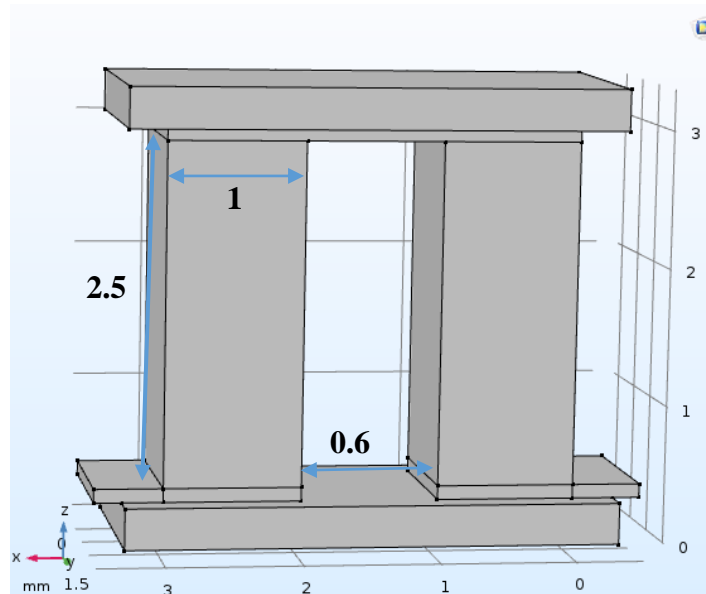


Figure III. 32 : le thermocouple rectangulaire qui nous avons choisi.

D'après ce dernier on a désignés le module générateur thermoélectrique porte 9 thermocouples reliés en série par un matériau conducteur (souvent le cuivre) et des semelles d'échange thermique en l'alumine (Al₂O₃).

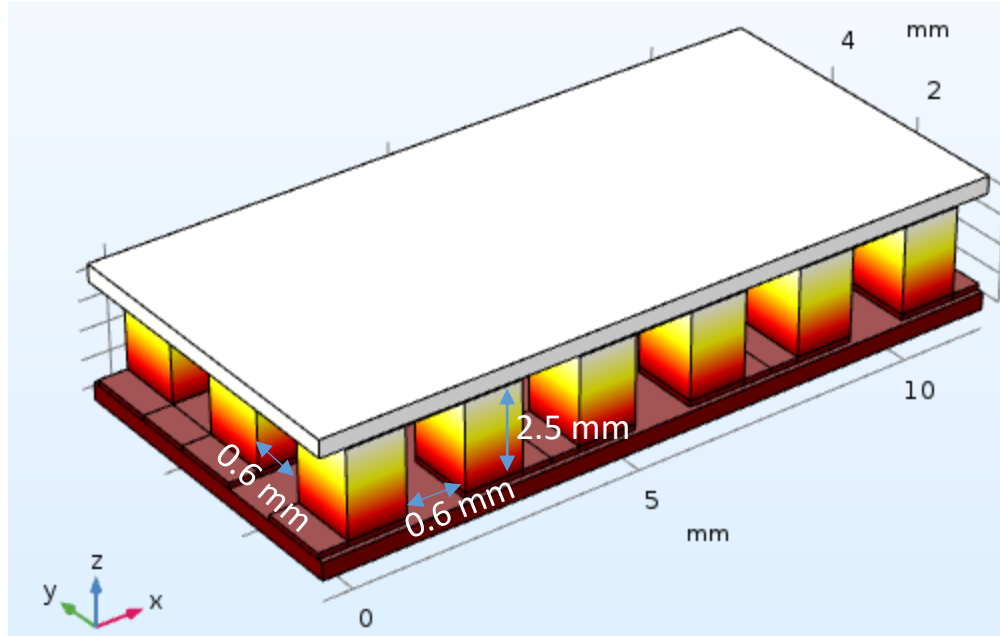


Figure III. 33 : module générateur thermoélectrique porte 9 thermocouples rectangulaire que nous avons choisi.

III.8.2.1 calcul de puissance du MGT

- La puissance frigorifique absorbée Par la semelle froide de la cellule

$$P_f = n[S \cdot I \cdot T_f - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - k(T_c - T_f)]$$

- La puissance frigorifique absorbée par la semelle chaude de la cellule

$$P_c = n[S \cdot I \cdot T_c + \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - k(T_c - T_f)]$$

Ou :

R : la résistivité électrique

k : la conductivité thermique

I : le courant traversant la cellule

T_c : Température de cote chaud en (K)

T_f : Température de cote froid en (K)

n : représente le nombre de pattes de la cellule

- La puissance électrique fournie à la cellule

$$P_{el} = (p_c - p_f) = n[S.I.(T_c - T_f) + R.I^2]$$

$$P_{el} = 1.656 \text{ W}$$

Nos données :

$$I = 2 \text{ A}; K = 2 \text{ W/m.K}; T_c = 350 \text{ K}; n = 9 \text{ S} = 240 \mu\text{V/K}; R = 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{m}; T_f = 50\text{K}.$$

III.8.2.2 Calcul du rendement du MGT

$$\eta = \frac{P_f}{P_{el}}$$

$$\eta = 0.03\%$$

Nous estimons que ce rendement est très faible et c'est dû principalement à la faible taille des thermocouple et leurs faible nombres dans le module.

III.8.3 Etude électrique par le code PSIM

III.8.3.1 montage équivalent du thermocouple

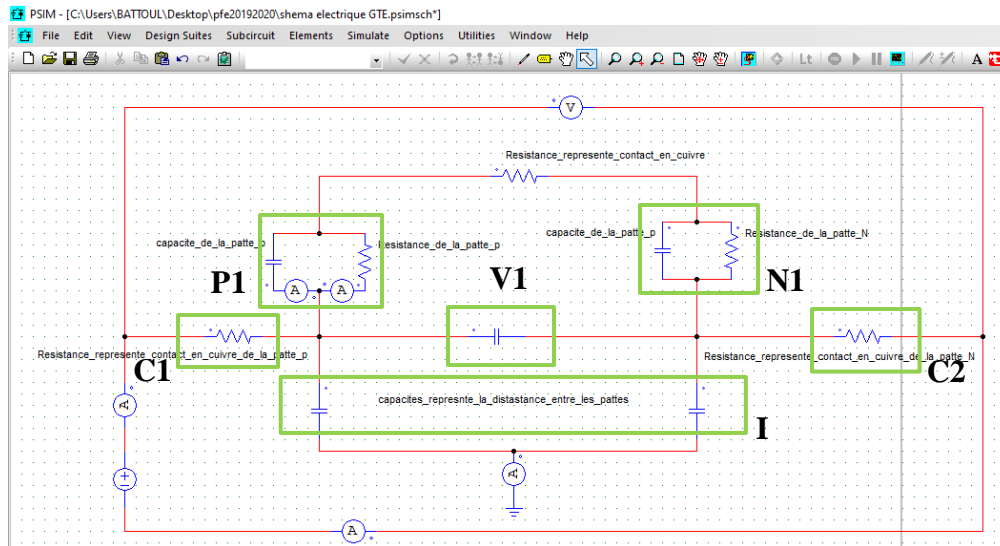


Figure III. 34 : montage électrique équivalent du thermocouple par le code PSIM.

Figure III. 34 représente schéma électrique équivalent de thermocouple avec **C1**, **C2** sont définis respectivement comme étant le résistance équivalent de contact en cuivre au-dessous du la patte p et n.

P1, **N1** sont définis respectivement comme étant la résistance en parallèle avec condensateur équivalent de la patte p et n, **V1** est la capacité équivalent du la distance entre les pattes et **I** représente des capacités équivalentes de la partie l'insolence (l'alumine (Al_2O_3)).

III.8.3.2 montage équivalent du module

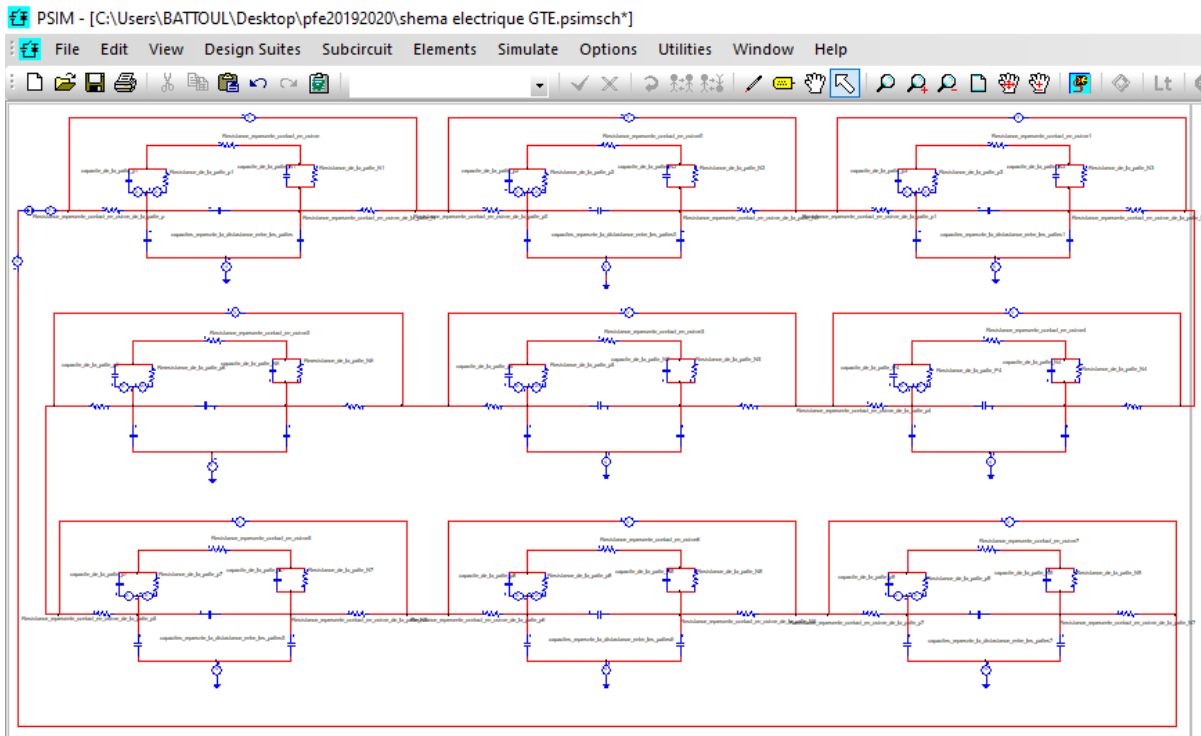


Figure III. 35 : montage électrique équivalent du module GTE par le code PSIM.

Figure III. 35 représente le schéma électrique équivalent du module générateur thermoélectrique porte 9 thermocouples sont reliés en série Nous pouvons remarquer que les jonctions sont de type p-n sur une face et n-p sur l'autre.

Lorsqu'on fait circuler un courant électrique continu dans un tel circuit, il apparait une face « froide » et une face « chaude ». Si on inverse le sens du courant, la température des deux faces change de cote.

III.9 CONCLUSION

- La chaleur à travers le module thermoélectrique est une fonction de la vitesse du refroidissement du générateur thermoélectrique ; ce dernier 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.

CHAPITRE I: Thermoélectricité

- [01] D. M. Rowe and C. M. Bhandari, Modern thermoelectrics. Prentice Hall, 1983. 8, 9, 11
- [02] H. J. Goldsmid, Electronic refrigeration. Pion, 1986. 8, 9, 11
- [03] D. M. Rowe, Handbook of thermoelectrics. CRC press, 1995. 8
- [04] D. Rowe, ‘‘General principles and basic considerations, in Thermoelectrics handbook:macro to nano, pp. 1_1, CRC Press, 2005. 8
- [05] mémoire ‘‘étude et Modélisation d’un Générateur Thermoélectrique’’, Master de physique Spécialité Physique Énergétique et Matériaux, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen –, présenté par M elle SIFI IBTISSEM, Soutenue publiquement le 01 Juillet 2013.
- [06] http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2015_0338_MAAS.pdf
- [07] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/T1-d682-Fig.348.%E2%80%94Exp%C3%A9rience%20de%20Seebeck.png>
- [08] G. J. Snyder et E. S. Toberer, « Complex thermoelectric materials », Nat Mater, 2008.
- [09] http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2015_0338_MAAS.pdf.
- [10] <https://www.theses.fr/2014PAUU3010.pdf>
- [11] S. Priya et D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies. Springer, 2008.
- [12] Synthèses et caractérisations de matériaux thermoélectriques nanostructurés, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à CentraleSupélec, École doctorale n°579 : Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences (SMEMAG) Spécialité de doctorat: Sciences des matériaux, p-30.
- [13] D. M. Rowe, Thermoelectrics handbook: macro to nano: CRC press, 2006.
- [14] K. Kurosaki, A. Kosuga, H. Muta, S. Yamanaka Tl_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).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [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. Jägler, 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 NaCo₂O₄ 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 Bi₂Te₃ alloys J. Alloys Comp., Vol.399, pp.14, (2005).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [24] M. Ohta, S. Hirai Synthesis and thermoelectric properties of ternary rare-earth sulfides LnGdS₃ and LnCuS₂ (Ln:Nd, and Sm) The 26th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Jeju Island, South Korea, (2007).
- [25] M. Beekman, G. S. Nolas Synthesis and thermal conductivity of type II silicon clathrates Physica B, Vol.383, pp.111, (2006).
- [26] D.-H. Kim, T. Mitani Thermoelectric properties of fine-grained Bi₂Te₃ alloys J. Alloys Comp., Vol.399, pp.14, (2005).
- [27] M. Ohta, S. Hirai Synthesis and thermoelectric properties of ternary rare-earth sulfides LnGdS₃ and LnCuS₂ (Ln:Nd, and Sm) The 26th International Conference on Thermoelectrics: ICT Symposium Proceedings, Jeju Island, South Korea, (2007).

CHAPITRE II : fonctionnement d'un module générateur thermoélectrique

- [01] D. Yan, « Modeling and application of a thermoelectric generator », M.Sc.A, University of Toronto, Canada, 2011.
- [02] S. W. Angrist, *Direct energy conversion*. Boston: Allyn and Bacon, 1976.
- [03] S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, et A. Taroni, "Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 99-107, 2009.
- [04] G. Min et D. Rowe, "Recent concepts in thermoelectric power generation," in *Thermoelectrics, 2002. Proceedings ICT'02. Twenty-First International Conference on*, 2002, pp. 365-374.
- [05] 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.
- [06] 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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [06] H. Y. CHEN « *Procédés de micro fabrication 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.
- [07] W.G.J.H.M Van Sark « *Feasibility of photovoltaic –thermoelctric hybrid moduls* » Applied Energy 88, 2785-2790, 2011.
- [08] D. Pollock, « Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool », Astm Intl , ISBN 080310409, Chap. 4, January 1985
- [09] D. Champiera, J. P. Bédécarratsb, T. Kousksoua, M. Rivalettoa, F. Strubc, P. Pignolet, « Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove », Energy, vol. 36, no. 3, pp. 1518 – 1526, March 2011

CHAPITRE III : Design et simulation du modèle MGT

- [01] <https://www.comsol.fr/>



*CONCLUSION
GENERALE*

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail et l'étude et la simulation d'un générateur thermoélectrique. Ainsi, Nous avons commencé par présenter une étude bibliographique. Une présentation générale des effets et notions de bases de la thermoélectricité, passant également en revue les applications thermoélectriques actuelles, nous sommes intéressés par la modélisation et le dimensionnement par COMSOL d'un 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 des paramètres thermoélectriques, un bon matériau thermoélectrique doit posséder aussi un bon coefficient Seebeck, 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 logiciel COMSOL du générateur thermoélectrique nous ont permis d'étudier :

Un thermocouple rectangulaire et cylindrique et un module thermoélectriques portant 9 thermocouple. Ces études ont permis de mettre en évidence l'influence de la température et le potentielle électrique sur les performances thermoélectriques. La première étape de simulation traite des phénomènes thermiques. Elle a pour but d'évaluer la longueur des pattes et distances entre les pattes d'un thermocouple les plus optimales. Les simulations de comportement thermique ont été réalisées dans un mode temporel. L'objectif de la deuxième étape est d'évaluer les performances thermoélectriques du générateur (puissance, rendement ...) cette étape est basée sur des phénomènes électriques et elle est réalisée dans un mode stationnaire.

On a comparé à travers cette simulation deux modèles de thermocouple, avec des pattes cylindrique et rectangulaire. Ces modèles ont été conçus avec des alliages à base de tellure de bismuth (Bi_2Te_3) ; un matériau très connu pour ses performances thermoélectriques à basse température.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons vu également la répartition du flux thermique dans les deux différentes géométries de pattes, à savoir, la longueur des pattes et la distances entre les pattes. Le flux thermique était uniformément repartit dans chacune des essais et les valeurs mesurées des températures dans les deux et nous avons constaté qu'il n'y a pas une grande différence entre les deux modèles que nous avons étudiés, le gradient de température à travers les jonctions est plus prononcé pour les modules à pattes courtes. Ceci aura des répercussions sur la puissance générée. Plus la longueur des pattes est longue plus le temps d'équilibre est grand, vis-vers-ça.

Le calcul du rendement du module thermoélectrique à 9 thermocouple s'est montré trop faible à cause probablement de la taille des pattes « estimée trop petite » et aussi pour le faible nombre des thermocouples.

Afin, nous avons utilisé le logiciel PSIM, pour faire le montage électrique équivalent de thermocouple et le module générateur thermoélectrique.