

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahleb Blida -1-



Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Département de Construction Aéronautique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master Aéronautique

Option : Structure Avion

THEME

Etude Numérique et Expérimentale d'un Générateur

Thermoélectrique

Proposé et dirigé par :

Dr. A. NECHE

Dr. R. RENANE

Réalisé par :

Mr. Abdelillah Zouaoui KHELIFI

Année Académique :

2023/2024

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon très cher père

A mes très chers frères

A mes très chers oncles

A mes amis d'enfance

A mes amis de résidence universitaire

A toute la promotion

De toutes les spécialités

Remerciement

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

*Je remercie mes encadreurs Docteur **A. NECHE** et Docteur **R. RENANE** enseignants à l'Institut d'Aéronautique Et des Etudes Spatiales, à l'Université Saad Dahleb, Blida-1-, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses encouragements et ses conseils judicieux tout le long de la réalisation de ce mémoire. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

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

*Je remercie Docteur **R. ALLOUCHE** pour ces Assistance matérielle et morale.*

*Je tiens à remercier infiniment à qui m'a aidé dans les expériences et la réalisation et je spécifie, mes frères **A, Yasser KHELFI** et **Abdelghafour KHELIFI, A, Ilies BENKOURGLOU** et **Sami BENFERHAT***

*Je remercie Docteur **T. REZOUG** Directeur de laboratoire de l'aéronautique pour ces facilitations d'accès.*

*Je remercie Mr. **L. SBAA** pour ces aides pour les simulations.*

N'oublions pas le service financier pour les facilitations afin d'obtenir le matériel nécessaire pour réaliser les expériences.

Je remercie tout enseignant qui m'a enseigné durant ma vie universitaire et je les salue pour tous ses efforts déployés pour transférer l'information.

'Cher père, tu es mon modèle de force, de sagesse et d'intégrité, et je te remercie du plus profond de mon cœur pour ton dévouement et ton amour inconditionnel'.

'Maman, même si tu n'es plus là physiquement, ton amour et tes enseignements vivent à jamais dans mon cœur et guident chacun de mes pas sur cette Terre'.

ملخص

الهدف من عملنا هو الدراسة العددية والتجريبية لوحدة كهر وحرارية بهدف إنتاج مولد كهر وحراري باستخدام مكثف شمسي، حيث يتم استغلال الحرارة الشمسية كطاقة بديلة، تعتمد الدراسة العددية، التي أجريت باستخدام برنامج **أنسيس الكهر وحراري** على ظواهر الإشعاع والتوصيل والحمل الحراري، بالإضافة الى خصوصيات الكهرياء الحرارية، المرتبطة بالخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد مثل معامل سيببيك وبلتيه والتوصيل الكهربائي ورقم الجدارة، كمعاملات رئيسية في حل المشكلة. يعد تحسين أداء المولد الكهر وحراري الحراري وتحسين الإمكانيات الكهربائية وكفاءة الخرج هي الأهداف الرئيسية لهذا العمل.

بالإضافة إلى ذلك، يتم إجراء دراسة تجريبية لتعزيز تطبيق تقنية الكهرياء الحرارية. تم إعداد تجريبي يتيح فحص المفاهيم النظرية عملياً. ويوضح هذا النهج أن إنتاج الطاقة المتجددة منخفضة التكلفة ليس فقط ممكناً بل هو واقع ملموس.

لكلمات المفتاحية: الكهرياء الحرارية، وحدة بلتيه، نقل الحرارة، مولد حراري

Résumé

L'objectif de notre travail est l'étude numérique et expérimentale d'un module thermoélectrique en vue de réaliser un générateur thermoélectrique utilisant un concentrateur solaire, où la chaleur solaire est exploitée comme énergie écologique. L'étude numérique, réalisée avec le logiciel **ANSYS Thermal-Electric**, repose sur les lois du transfert de chaleur, intégrant les phénomènes de rayonnement, conduction, et convection, les particularités de la thermoélectricité, liées aux propriétés physiques et chimiques des matériaux tels que le coefficient de Seebeck, l'effet Peltier, la conductivité électrique, et le facteur de mérite, sont introduites comme paramètres clés dans la résolution du problème. L'optimisation des performances du générateur thermoélectrique, l'amélioration du potentiel électrique, et l'efficacité de sortie constituent les principaux objectifs de ce travail.

En complément, une étude expérimentale est réalisée pour renforcer l'application de la technique de thermoélectricité. Un dispositif expérimental est mis en place, permettant d'examiner les notions théoriques en pratique. Cette approche démontre que la production d'énergie renouvelable à faible coût est non seulement faisable mais constitue une réalité tangible.

Mots clés : Thermoélectricité, Module Peltier, Transfer de chaleur, Thermo-générateur

Abstract

The objective of our work is the numerical and experimental study of a thermoelectric module to develop a thermoelectric generator using a solar concentrator, where the ecological energy used is the heat received from the sun. The numerical study, conducted with the **ANSYS Thermal-Electric** software, is based on the laws of heat transfer, incorporating the phenomena of radiation, conduction, and convection, the particularities of thermoelectricity related to the physical and chemical properties of materials, such as the Seebeck coefficient, Peltier effect, electrical conductivity, and the concept of the figure of merit, are introduced as key parameters in

solving the problem. The main objectives of this work are to optimize the performance of the thermoelectric generator, enhance the electrical potential, and improve the output efficiency.

Additionally, an experimental study is conducted to support the implementation of thermoelectric technology. An experimental setup is developed, allowing us to examine theoretical concepts in practice. This approach demonstrates that renewable energy production at a low cost is not only feasible but also a tangible reality.

Key words: Thermoelectricity, Peltier module, Heat transfer, Thermo-generator

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	14
I Chapitre I : ETAT DE L'ART DE LA THERMOELECTRICITE	
I.1 Introduction	19
I.2 La thermoélectricité : de l'arc de fer d'Alessandro Volta	19
I.3 Matériaux thermoélectriques	22
I.3.1 Matériaux thermoélectriques de basse température	23
I.3.2 Matériaux thermoélectriques au voisinage de la température ambiante	23
I.3.3 Matériaux thermoélectriques à température intermédiaire	24
I.3.4 Matériaux thermoélectriques pour les hautes températures	24
I.3.5 Autres matériaux thermoélectriques	25
I.3.5.1 Skuttérudites	25
I.3.5.2 Clathrates	26
I.3.5.3 Les phases de Zintl	27
I.3.6 Matériaux thermoélectriques récents	28
I.3.6.1 Oxychalcogénures de type BiCuSeO	28
I.3.6.2 Alliages de type AgBiSe ₂	28
I.3.6.3 Matériaux à base de polymères semi-conducteurs dopés	29
I.4 Applications thermoélectriques	29
I.4.1 Module à effet Peltier	29
I.4.2 Thermo-générateurs	31
I.5 Conclusion	33
II Chapitre II : FORMULATION MATHÉMATIQUE DE LA THERMOELECTRICITE	
II.1 Introduction	41
II.2 Qu'est-ce qu'un phénomène thermoélectrique	41
II.3 Les phénomènes de conversion d'énergie	41
II.3.1 La conduction thermique	41
II.3.1.1 Loi de Fourier de la conduction de chaleur	42
II.3.1.2 L'équation de la chaleur	42

II.3.1.3	Conditions aux limites.....	42
II.3.2	La convection thermique.....	43
II.3.2.1	Types de convection thermique.....	43
II.3.2.2	Equation mathématique.....	43
II.3.3	Le rayonnement thermique	43
II.3.3.1	La loi de Stefan-Boltzmann.....	44
II.4	Propriétés physiques et chimiques	44
II.4.1	La résistivité et la conductivité électrique	44
II.4.2	La conductivité thermique	44
II.4.3	Le coefficient de Seebeck	45
II.4.3.1	Schéma explicative du phénomène	45
II.4.3.2	Explication du phénomène	46
II.4.4	Le coefficient de Peltier	46
II.4.4.1	Explication du phénomène	47
II.4.5	Le coefficient de Thomson	47
II.4.6	Les relations de Kelvin	48
II.4.7	Le facteur de Mérite ZT	48
II.5	Performances et Facteur de Mérite des dispositifs thermoélectriques :.....	51
II.6	Conclusion.....	53
III Chapitre III : MODELE MATHEMATIQUE ET SIMULATION D'UN GENERATEUR THERMOELECTRIQUE		
III.1	Introduction	57
III.2	Méthodes numériques	57
III.3	La méthode des éléments finis	57
III.4	Equations gouvernant la thermoélectricité.....	58
III.5	Formulation par élément finis	59
III.6	Processus de la simulation numérique	61
III.6.1	Pré-traitement (Pre-Processing) :.....	62
III.6.2	La résolution :	62
III.6.3	Post-traitement (Post-Processing) :.....	62
III.7	Présentation du solveur ANSYS Thermal-electric :	62

III.8	Pré-traitement	63
III.8.1	Géométrie.....	63
III.8.2	ANSYS Thermal-Electric	66
III.9	Conclusion.....	72
IV Chapitre IV : RESULTAT NUMERIQUE ET DISCUSSION		
IV.1	Introduction	74
IV.2	Sensibilité de maillage et validation de résultats	74
IV.3	Evaluation des résultats.....	77
IV.3.1	Discussion générale sur le phénomène	77
IV.4	Influence de matériau et de température	79
IV.4.1	Le Tellure de Bismuth dopé par le Sn et Se.....	79
IV.4.1.1	Paramètres utilisés	79
IV.4.1.2	Résultats obtenus	79
IV.4.2	Le Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT	81
IV.4.2.1	Paramètres utilisés	81
IV.4.2.2	Résultats obtenus	81
IV.4.3	Le Tellure de Bismuth dopé par le Plomb	83
IV.4.3.1	Paramètres utilisés	83
IV.4.3.2	Résultats obtenus	83
IV.5	Conclusion.....	85
V Chapitre V : ETUDE EXPERIMENTALE D'UN MODULE THERMOELECTRIQUE		
V.1	Introduction	88
V.2	But de l'expérience.....	88
V.3	Schéma explicatif de l'expérience.....	88
V.4	Matériel utilisé.....	89
V.5	Expériences	90
V.5.1	Expérience N°1 – Convection naturelle.....	90
V.5.1.1	Protocole expérimentale.....	90
V.5.1.2	Résultats expérimentaux	91
V.5.2	Expérience N°2 – Convection forcée.....	93
V.5.2.1	Protocole expérimentale.....	93

V.5.2.2	Résultats expérimentaux	93
V.5.3	Expérience N°3 – Refroidissement avec ailettes	97
V.5.3.1	Protocole expérimentale	97
V.5.3.2	Résultats expérimentaux	97
V.5.4	Expérience N°4 – Refroidissement par l’eau.....	99
V.5.4.1	Protocole expérimentale	99
V.5.4.2	Résultats expérimentaux	99
V.5.5	Comparaison	103
V.6	Conclusion.....	104
VI Chapitre VI : CONCEPTION ET REALISATION D’UN GENERATEUR THERMOELECTRIQUE A L’AIDE D’UN CONCENTRATEUR SOLAIRE		
VI.1	Introduction	107
VI.2	Le concentrateur solaire	108
VI.3	Conception du dispositif.....	109
VI.3.1	Le concentrateur solaire	109
VI.3.2	Le récepteur	110
VI.3.2.1	Géométrie	110
VI.4	Conclusion.....	114
CONCLUSION GENERALE.....		116

Liste des figures

Figure I-1 : Facteur adimensionnel de mérite ZT en fonction de température des matériaux thermoélectrique de type n et p.....	22
Figure I-3 : Meilleures valeurs ZT obtenues avec les différents atomes invités pour les skutterudites de type n	25
Figure I-4 : a) The unit cell structure of VII-type Si ₂ Ge clathrate marked by black lines, b, c) Linkage of tetrakaidecahedra along selected directions, d) The 3D sodalite framework of Si ₂ Ge. Tetrakaidecahedron (Si ₈ Ge ₄) ₂ : blue polyhedron, yellow apex: Si atom; gre.....	26
Figure I-5 : XCuSb (X=Ca, Sr, Ba) : (a) vue de face et de coté de la structure cristalline, (b) diagramme schématique de la fusion sous vide, et c modèle XRD	27
Figure I-6 : Facteur de Mérite de BiCuSeO et autres matériaux thermoélectriques.....	28
Figure I-7 : Propriétés thermoélectriques élevées de n-type AgBiSe ₂	29
Figure I-8 : Module Peltier	29
Figure I-9 : Effet Peltier – Réfrigérateur.....	30
Figure I-10 : Schéma démonstratif d'exemple de récupération d'énergie.....	31
Figure I-11 : La montre-bracelet thermique de Seiko.....	32
Figure I-12 : Représentation et description d'un RTG	32
Figure II-1 : Schéma explicative de l'Effet de Seebeck	45
Figure II-2 : Explication du phénomène de l'Effet Peltier	47
Figure II-3 : Facteur de Mérite des trois catégories des matériaux.....	50
Figure II-4 : Schéma explicative des deux effets (Seebeck et Peltier)	51
Figure III-1 : Géométrie du module à étudier par le logiciel SolidWorks.....	64
Figure III-2 : Structure interne du module de thermo-générateur.....	65
Figure III-3 : représente un couple de pastilles semi-conductrices.....	66
Figure III-4 : Le solveur ANSYS Thermal-Electric	66
Figure III-5 : composition du solveur ANSYS Thermal-Electric.....	67
Figure III-6 : Importation de la géométrie	67
Figure III-7 : Géométrie du module dans le programme Design Modeler	68
Figure III-8 : Discrétisation du domaine à étudier.....	68
Figure III-9 : Discrétisation d'un couple de pastilles.....	69
Figure III-10 : Température imposée pour la face chaude.....	70

Figure III-11 : Température imposée pour la face froide	70
Figure III-12 : potentiel électrique nul d'un côté pour créer la différence	71
Figure III-13 : Convection du fil avec le milieu extérieur	71
Figure IV-1 : Qualité des éléments	75
Figure IV-2 : Aspect Ratio.....	76
Figure IV-3 : Skeewness.....	76
Figure IV-4 : Champs de température sur le module ($T_c = 40^\circ\text{C}$, $T_f = 25^\circ\text{C}$, N° d'éléments = 143000)	77
Figure IV-5 : Champs de température sur la structure interne ($T_c = 40^\circ\text{C}$, $T_f = 25^\circ\text{C}$, N° d'éléments = 143000)	77
Figure IV-6 : potentiel électrique le long de module ($T_c = 40^\circ\text{C}$, $T_f = 25^\circ\text{C}$, N° d'éléments = 143000)	78
Figure IV-7 : Paramètres du Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se.....	79
Figure IV-8 : Potentiel électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se pour différentes quantités.....	79
Figure IV-9 : Courant électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se pour différentes quantités.....	80
Figure IV-10 : Puissance électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se pour différentes quantités	80
Figure IV-11 : Paramètres de Tellure de Bismuth dopé par le Lu et le CNT	81
Figure IV-12 : Potentiel électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT pour différentes quantités	81
Figure IV-13 : Courant électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT pour différentes quantités	82
Figure IV-14 : Puissance électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT pour différentes quantités	82
Figure IV-15 : Paramètre de Tellure de Bismuth dopé par le Plomb	83
Figure IV-16 : Potentiel électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par le Plomb pour différentes quantités	83
Figure IV-17 : Courant électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par le Plomb pour différentes quantités.....	84

Figure IV-18 : Puissance électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par le Plomb pour différentes quantités	84
Figure V-1 : Schéma explicatif de l'expérience	88
Figure V-2 : Dispositif pour la 1 ^{ère} expérience	90
Figure V-3 : Potentiel électrique (Convection naturelle).....	91
Figure V-4 : rendement de Carnot (Convection naturelle)	92
Figure V-5 : Dispositif de l'expérience (Convection forcée)	93
Figure V-7 : Potentiel électrique (Convection forcée).....	94
Figure V-8 : Rendement de Carnot (Convection forcée).....	95
Figure V-9 : Comparaison entre convection naturelle et forcée.....	96
Figure V-10 : Refroidissement par ailette.....	97
Figure V-11 : Potentiel électrique (aillette)	98
Figure V-12 : Rendement de Carnot (aillette)	99
Figure V-13 : Potentiel électrique (Bac d'eau).....	101
Figure V-14 : Rendement de Carnot (Bac d'eau)	102
Figure V-15 : Comparaison entre les expériences	103
Figure V-16 : Comparaison entre de module en convection naturelle	104
Figure VI-1 : Principe de fonctionnement d'un concentrateur solaire parabolique.....	109
Figure VI-2 : Le réflecteur solaire	110
Figure VI-3 : Structure interne du modèle conçu	111
Figure VI-4 : Modèle complet du récepteur	112
Figure VI-5 : Structure interne du récepteur.....	112
Figure VI-6 : Appareil du générateur thermoélectrique	113

Liste de nomenclatures

q : charge d'électron [C]	η : rendement
Π : coefficient de Peltier [V]	η_c : rendement de Carnot
h : coefficient de convection thermique [$Wm^{-2}K^{-1}$]	ρ_e : résistivité électrique [$S^{-1}m$]
COP : coefficient de performance	A : surface d'échange [m^2]
α : coefficient de Seebeck [VK^{-1}]	J : vecteur de densité de courant électrique [Am^{-2}]
β : coefficient de Thomson [VK^{-1}]	D : vecteur de densité de flux électrique [Cm^{-2}]
σ : conduction électrique [Sm^{-1}]	E : vecteur de champs d'intensité électrique [Vm^{-1}]
λ : conduction thermique [$Wm^{-2}K^{-1}$]	K^{TT} : matrice de rigidité thermique
h_p : constante de Planck [Kgm^2s^{-1}]	$K^{\phi\phi}$: matrice de rigidité électrique
I : courant électrique [A]	$K^{\phi T}$: matrice de rigidité de Seebeck
q''' : densité de flux de chaleur [Wm^{-2}]	C^{TT} : matrice d'amortissement thermique
V : différence de potentiel [V]	$C^{\phi\phi}$: matrice d'amortissement diélectrique
ϵ : émissivité	Q : vecteur des charges de production combinée de chaleur
ϵ_n : énergie [J]	Q^P : Vecteur de charge thermique Peltier
g : facteur de dégénérescence	Q^e : vecteur de charge électrique
ZT : facteur de mérite	$\{I\}$: vecteur de charge de courant électrique
\dot{Q} : flux de chaleur [W]	
f_0 : fonction de distribution de Fermi-Dirac	
N : fonction de forme	
ρ : masse volumique [Kgm^{-3}]	
Φ : potentiel électrique [V]	
Φ^e : potentiel élémentaire [V]	
P : puissance électrique [W]	
Q : puissance thermique [W]	
μ : potentiel chimique [$Jmol^{-1}$]	
T : température [K]	
T^e : température élémentaire [K]	
τ : temps de relaxation [s]	

INTRODUCTION GENERALE

Le monde est en train de passer progressivement des combustibles fossiles aux sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire, hydraulique et éolienne, qui sont considérées comme des alternatives plus propres et plus durables. Cette transition est motivée par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'atténuer les effets néfastes du changement climatique. De plus, l'énergie renouvelable offre l'opportunité d'économiser des milliards de dollars, de créer des emplois et de diversifier le mix énergétique, améliorant ainsi la stabilité et la durabilité à long terme de l'approvisionnement énergétique. Alors que cette transition est en cours, il est essentiel que la production d'énergie augmente rapidement pour répondre à la demande et remplacer réellement les combustibles fossiles tout en réduisant leur empreinte environnementale. Parmi ces sources d'énergie renouvelable, nous nous intéressons à explorer le domaine de la thermoélectricité, qui en est encore au stade de développement.

La thermoélectricité est une branche de la physique qui étudie les propriétés thermiques et électriques des matériaux thermoélectriques. Elle repose sur les effets Seebeck, Peltier et Thomson, qui résultent du couplage entre la conductivité électrique et thermique. La performance d'un matériau thermoélectrique est caractérisée par son facteur de mérite sans dimension.

L'histoire de la thermoélectricité remonte au début du XIXe siècle avec la découverte des trois effets thermoélectriques par Seebeck, Peltier et Thomson. Depuis lors, la thermoélectricité a connu des développements significatifs, notamment grâce à l'utilisation de semi-conducteurs dopés, qui présentent des effets thermoélectriques plus élevés que d'autres matériaux. Actuellement, la thermoélectricité est en plein essor car elle se classe parmi les alternatives écologiques aux combustibles fossiles pour la conversion d'énergie.

Les applications de la thermoélectricité sont vastes, allant de la récupération d'énergie dans les systèmes industriels à la production d'énergie électrique à partir de sources de chaleur renouvelable telles que le soleil et l'énergie géothermique. La thermoélectricité peut également être utilisée pour le refroidissement grâce à l'effet Peltier, qui permet le transfert de chaleur d'un côté à l'autre d'un matériau en appliquant une tension électrique.

Les matériaux thermoélectriques sont divisés en deux catégories : les matériaux de type n, qui ont une conductivité électrique négative et une conductivité thermique positive, et les matériaux de type p, qui ont une conductivité électrique positive et une conductivité thermique négative. Les matériaux thermoélectriques modernes sont fabriqués à partir de semi-conducteurs, qui offrent un meilleur facteur de mérite et un rendement de conversion plus élevé que les alliages.

En termes de recherche et de développement, il y a actuellement deux axes dominants dans le domaine scientifique : la fabrication à l'échelle sub-micron de matériaux bien connus et la recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques basés sur les polymères conjugués qui offrent de nouvelles perspectives pour exploiter les flux de chaleur à des températures plus basses.

Les matériaux thermoélectriques sont classés en deux catégories : les matériaux de type n, qui ont une conductivité électrique négative et une conductivité thermique positive, et les matériaux de type p, qui ont une conductivité électrique positive et une conductivité thermique négative. Les matériaux thermoélectriques modernes sont fabriqués à partir de semi-conducteurs, qui offrent un meilleur facteur de mérite et une efficacité de conversion plus élevée que les matériaux en alliage.

En termes de recherche et développement, deux domaines principaux dominent actuellement le spectre de l'activité scientifique : la fabrication à l'échelle sub-micron des matériaux connus et la recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques basés sur les polymères conjugués, qui offrent de nouvelles opportunités pour exploiter les flux de chaleur à des températures plus basses.

L'étude du phénomène thermoélectrique peut être divisée en deux domaines : la résolution numérique et les études expérimentales. La résolution numérique a subi une révolution grâce aux méthodes de calcul. Ces techniques permettent la simulation de configurations complexes, telles que les générateurs thermoélectriques ou les modules Peltier.

La principale raison d'utiliser la résolution numérique est d'éviter les coûts associés aux mesures expérimentales. De nombreux groupes industriels et organisations académiques ont développé des logiciels de simulation numérique. Cependant, une modélisation précise est nécessaire pour assurer une simulation correcte, étant donné la différence d'échelle significative entre les divers événements physiques et les configurations considérées.

ANSYS Thermal-Electric est l'un des logiciels utilisés pour la résolution numérique dans l'étude du phénomène thermoélectrique. La simulation directe de ces événements nécessite

beaucoup de mémoire. Le code ANSYS-Thermal-Electric est devenu un outil de simulation largement utilisé et populaire pour l'étude de ces phénomènes dans l'industrie et la recherche.

Le présent travail implique une étude numérique et expérimentale d'un générateur thermoélectrique. L'étude numérique comprend une analyse des processus thermo-électriques, une modélisation mathématique du phénomène et une simulation numérique du processus. L'objectif de l'étude est d'utiliser le logiciel ANSYS Thermal-Electric pour comparer les performances de différents matériaux thermoélectriques à différentes températures imposées, ce qui permettra d'économiser des coûts et du temps par rapport à l'expérimentation. L'étude expérimentale fournira des informations sur la façon d'améliorer les performances d'un générateur thermoélectrique en utilisant différents dispositifs.

Cette étude est divisée en cinq chapitres :

Chapitre 1 fournit un aperçu de la thermoélectricité, y compris l'évolution du phénomène, les différentes catégories de matériaux thermoélectriques et les applications thermoélectriques.

Dans le **chapitre 2**, nous introduisons le concept du phénomène thermoélectrique, les différents modes de conversion thermique et les propriétés physiques et chimiques telles que les effets Seebeck et Peltier. Nous explorons également le concept du coefficient de mérite et la performance d'un dispositif thermoélectrique.

Le **chapitre 3** définit le modèle mathématique et les schémas de discrétisation pour la méthode des éléments finis. Nous présentons également le logiciel ANSYS Thermal-Electric et fournissons la géométrie du modèle à étudier. Le chapitre se conclut par le prétraitement et la préparation du modèle pour la résolution.

Le **chapitre 4** présente les résultats obtenus à partir de la simulation numérique, y compris une comparaison des différents matériaux utilisés.

Dans le **chapitre 5**, nous réalisons une étude expérimentale sur le générateur thermoélectrique en utilisant le module TEC1-12706. En variant les dispositifs, nous tirons des conclusions sur l'influence des dispositifs sur les performances thermoélectriques.

Le **chapitre 6** se concentre sur la conception d'un générateur thermoélectrique utilisant un concentrateur solaire pour appliquer les résultats des chapitres précédents.

Ce travail se termine par une conclusion et les perspectives de cette étude, ainsi la présentation du protocole expérimentale et la démonstration de la faisabilité de la production d'énergie à partir de la chaleur solaire.

Chapitre I :

ETAT DE L'ART DE LA THERMOELECTRICITE

Chapitre I : ETAT DE L'ART DE LA THERMOELECTRICITE

I.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter le principe de fonctionnement de la thermoélectricité, en décrivant chronologiquement le développement de ce domaine afin de mieux comprendre son histoire. En se basant sur une présentation des matériaux thermoélectriques, nous aborderons les applications actuelles et futures qui exploitent l'énergie thermique pour produire de l'électricité, ou inversement.

En conclusion de ce chapitre, nous passerons en revue les recherches contemporaines menées à l'échelle mondiale, en mettant en lumière les avancées significatives et les tendances émergentes dans le domaine.

I.2 La thermoélectricité : de l'arc de fer d'Alessandro Volta

Au milieu du XVIIIe siècle, le phénomène de l'électricité, y compris l'électricité d'origine animale, est devenu une tendance et un sujet populaire dans le domaine scientifique.

Suite à cela, Luigi Galvani, physiologiste et professeur à l'université de Bologne, a réalisé une dizaine d'essais, aboutissant à la conclusion suivante : lorsqu'il touche les nerfs d'une grenouille avec un conducteur et applique une étincelle, la grenouille est saisie par un tremblement convulsif.

Alessandro Volta, professeur à l'université de Pavie, était sceptique à l'égard de l'« électricité animale ». Cependant, à l'insistance de ses collègues, il a répété l'expérience de Galvani. Lorsqu'il a observé le résultat, son scepticisme a commencé à se dissiper. En avril 1792, il a écrit à Galvani : « Ainsi, me voici finalement converti. Depuis que je suis devenu moi-même témoin oculaire et que j'ai observé ces miracles, je suis peut-être passé de la méfiance au fanatisme » [1].

En 1821, Thomas Johann Seebeck, physicien, chimiste et médecin germano-estonien, a remarqué que lorsqu'on forme un circuit avec deux matériaux différents et qu'on applique une différence de température, on obtient un courant électrique. Il a fait cette découverte en observant la déviation d'une aiguille magnétique placée à l'intérieur du circuit [2].

En 1834, Charles Athanase Peltier, un physicien français, a découvert que lorsqu'un courant électrique passe à travers une jonction connectant deux conducteurs, on observe une augmentation

ou une baisse de température selon le sens du courant. La quantité de chaleur dégagée ou absorbée est proportionnelle à l'intensité du courant. Cette découverte a été publiée dans les Annales de physique et chimie la même année.

En 1838, Heinrich Lenz, un physicien originaire de la région balte germanique, démontre que la chaleur est soit absorbée, soit libérée au niveau d'une jonction thermoélectrique, selon la direction du courant électrique [3].

En 1851, William Thomson, qui deviendra plus tard Lord Kelvin, montre que les effets Seebeck et Peltier sont liés par la relation de Thomson (également appelée deuxième relation de Thomson). Cette relation établit que le coefficient de Peltier est égal au produit de la température et du coefficient de Seebeck. Cela signifie que les deux phénomènes sont des manifestations d'un même processus physique, dans lequel les flux de courant électrique et de chaleur sont couplés [4].

Cependant, les explications de Peltier concernant le phénomène découvert étaient incorrectes. Il faudra attendre 1857 pour avoir, avec Thomson, une vue d'ensemble convenable des trois effets thermoélectriques (Seebeck, Peltier et Thomson) et une formulation encore acceptée aujourd'hui [5].

En 1909, Edmund Altenkirch, un thermodynamicien allemand, formule une théorie satisfaisante de la thermoélectricité, montrant qu'un matériau thermoélectrique de haute performance devrait avoir un coefficient de Seebeck élevé, une faible conductivité thermique et une faible résistivité électrique. Le facteur de mérite Z est utilisé pour évaluer la performance des matériaux thermoélectriques.

L'effet thermoélectrique a suscité un intérêt significatif au milieu du XXe siècle lorsque Abraham Ioffe a découvert que les semi-conducteurs dopés ont un effet thermoélectrique plus élevé que les autres matériaux. Cela a conduit au développement du premier générateur thermoélectrique en 1947 par Maria Telkes, qui a converti l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant un alliage de zinc-antimoniure et de bismuth-antimoniure (Bi-Sb).

En 1956, le même auteur propose l'idée de créer des alliages ou de former des solutions solides semi-conductrices isomorphes dans le but de réduire la conductivité thermique des matériaux thermoélectriques [6].

Avant les années 1970, le manque de progrès dans le domaine de la thermoélectricité a conduit à l'hypothèse selon laquelle un ZT égal à 1 constitue une sorte de limite pour l'efficacité thermoélectrique. Cette limite empirique a considérablement réduit l'intérêt pour la recherche en thermoélectricité, étant donné qu'un ZT d'au moins 3 est nécessaire pour rivaliser avec les systèmes de réfrigération traditionnels qui utilisent des fluides de transfert de chaleur.

Dans les années 1990, l'intérêt pour la thermoélectricité a connu un regain grâce au développement de semi-conducteurs [7].

Dès la fin des années 1930, les semi-conducteurs ont ravivé l'intérêt pour la thermoélectricité, car leurs coefficients de Seebeck dépassent $100 \mu\text{V/K}$, permettant la fabrication de dispositifs avec des rendements d'environ 5%.

En 1954, Goldsmid et Douglas ont montré que les réfrigérateurs thermoélectriques pourraient atteindre des températures inférieures à 0°C . Cependant, les semi-conducteurs à large bande interdite ont une faible conductivité, ce qui limite les performances des dispositifs thermoélectriques [8].

En 2008, les chercheurs Poudel et Al ont développé une nouvelle méthode de synthèse, la mécanosynthèse, pour produire des alliages massifs de BiSbTe avec des grains nanométriques. Les matériaux obtenus présentent un facteur de mérite thermoélectrique maximal de 1,4 à 100°C [9]. La même année, deux autres études ont révélé des performances thermoélectriques remarquables pour des nano-fils de silicium. Ainsi, des ZT de 0,6 à 300 K et de 1 à 200 K ont été rapportés, tandis que le ZT du silicium massif est seulement de l'ordre de 0,01 à 300 K [10].

Actuellement, la thermoélectricité suscite un regain d'intérêt, principalement en raison des préoccupations environnementales liées aux gaz à effet de serre et aux gaz utilisés dans la réfrigération [11]. Les effets thermoélectriques permettent en effet la conversion directe de la chaleur en électricité ou vice versa, ce qui présente un avantage.

Deux axes de recherche dominant actuellement le domaine de la thermoélectricité :

- Le développement de nouveaux matériaux thermoélectriques à structures complexes et/ou ouvertes afin d'améliorer leurs performances

- Le développement de matériaux thermoélectriques connus sous de nouvelles formes de basse dimensionnalité, telles que les puits quantiques, les nano-fils, les nanoparticules et les couches minces, dans le but d'optimiser leurs propriétés [12]

I.3 Matériaux thermoélectriques

Les matériaux thermoélectriques suscitent un grand intérêt car ils permettent de récupérer l'énergie thermique perdue, par exemple dans les systèmes de combustion, et de la convertir en électricité. Cela permet de réduire la consommation de combustibles fossiles et les émissions de CO2 [13].

Pour être efficaces, les matériaux thermoélectriques doivent avoir une faible conductivité thermique et une conductivité électrique élevée, afin de maximiser le coefficient de Seebeck qui détermine leur performance [14]. Les matériaux les plus couramment utilisés sont les semi-conducteurs et les alliages de métaux tels que le bismuth, l'antimoine, le plomb ou le tellure [15].

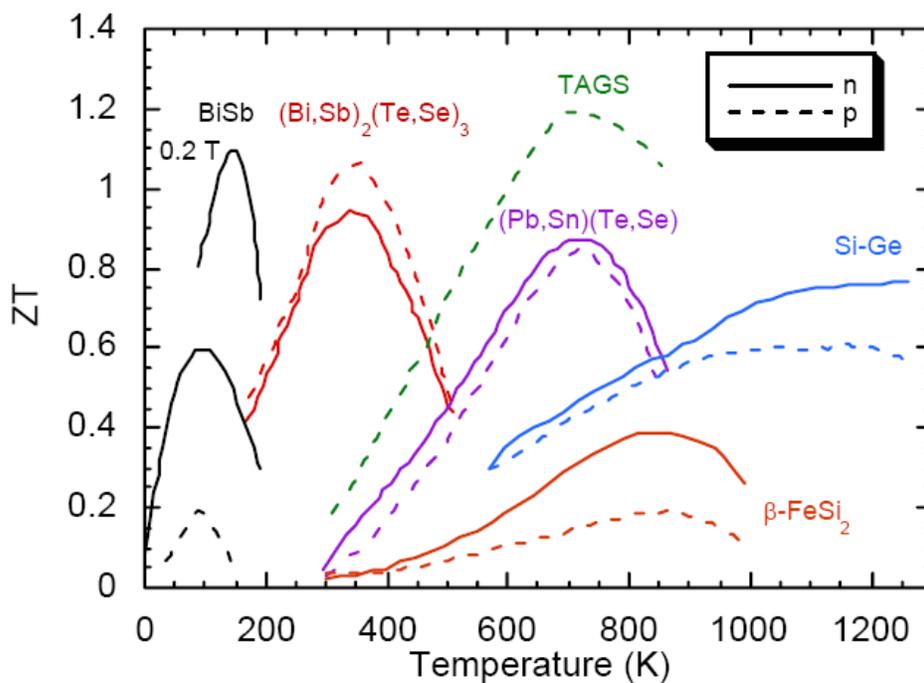


Figure I-1 : Facteur adimensionnel de mérite ZT en fonction de température des matériaux thermoélectrique de type n et p

Des efforts de recherche importants sont en cours pour développer de nouveaux matériaux thermoélectriques toujours plus performants, en particulier en utilisant une nano-structuration.

Cela permet d'accroître l'adoption de cette technologie dans des applications industrielles et domestiques [16]. Plus de détails seront donnés par la suite.

Les matériaux thermoélectriques actuels peuvent être classés en quatre gammes de températures.

I.3.1 Matériaux thermoélectriques de basse température

Les matériaux thermoélectriques à basse température sont des alliages semi-conducteurs qui présentent de bonnes performances dans une plage de température allant de 30 K à 300 K.

Les meilleurs matériaux thermoélectriques à basse température sont les alliages de type n à base de bismuth et d'antimoine. Cependant, aucun matériau de type n similaire n'a encore été découvert dans cette plage de température, ce qui a freiné le développement d'applications thermoélectriques dans cette plage.

Les composés à base de tellure de bismuth (Bi_2Te_3), ainsi que leurs isomorphes Sb_2Te_3 et Bi_2Se_3 , sont les seuls matériaux thermoélectriques ayant connu un développement industriel significatif. Ils sont adaptés pour des températures allant de 250K à 400K et sont notamment utilisés pour le refroidissement de composants électroniques [17].

Pour obtenir de meilleures performances thermoélectriques à basse température, les recherches se concentrent sur le concept de "Phonon Glass Electron Crystal" (PGEC), qui vise à obtenir un matériau ayant une conductivité thermique de type vitreuse dans une structure cristalline [18].

En résumé, les alliages de type n à base de bismuth et d'antimoine sont actuellement les matériaux thermoélectriques les plus performants à basse température, mais des efforts de recherche sont nécessaires pour développer des matériaux de type p similaires afin de permettre des applications dans cette plage de température [19].

I.3.2 Matériaux thermoélectriques au voisinage de la température ambiante

Les matériaux thermoélectriques les plus couramment utilisés près de la température ambiante sont le Bi_2Te_3 (Tellure de Bismuth) et ses alliages. En raison de leur efficacité près de la température ambiante, ces matériaux sont largement utilisés dans les systèmes de réfrigération actuels. Surtout, lorsqu'ils sont alliés à du Sb_2Te_3 (alliage d'Antimoine et de tellure) qui a la même

structure cristalline, ils offrent de meilleures performances [20]. Ces composés permettent de créer des matériaux de type p et de type n avec un facteur de mérite proche de 1, ce qui les rend efficaces pour la conversion d'énergie thermoélectrique [21]. Les bonnes valeurs du facteur de mérite sont dues à la faible conductivité thermique λ .

I.3.3 Matériaux thermoélectriques à température intermédiaire

En ce qui concerne les matériaux thermoélectriques à des températures intermédiaires (généralement entre 300K et 800K), on observe que le principal additif utilisé est le plomb Pb, qui forme une composition de Pb(Sn)Te et ses alliages. Ces matériaux ont un facteur de mérite plus élevé que les matériaux à basse température, atteignant des valeurs proches de 1 [22]. Cependant, ces valeurs ne sont obtenues que pour les matériaux de type n, car la contribution du Pb ne donne pas de résultats aussi bons que dans le cas des matériaux de type p, qui sont généralement composés de matériaux de type TAGS (Tellure, Antimoine, Germanium, Argent) [23].

Cependant, la majorité de ces matériaux sont instables dans l'air et présentent une certaine toxicité. C'est pourquoi la recherche s'est également tournée vers les oxydes thermoélectriques, qui sont plus stables et moins toxiques, bien que leurs performances soient généralement inférieures [24].

Parmi les oxydes étudiés, l'oxyde $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ est réputé pour présenter de bonnes propriétés thermoélectriques sur une large plage de température intermédiaire. D'autres stratégies telles que la consolidation microstructurale et le dopage chimique ont également permis d'améliorer les performances de certains matériaux pour les températures intermédiaires [25].

Malgré les progrès réalisés, les matériaux thermoélectriques pour les températures intermédiaires restent un défi, nécessitant encore des améliorations en termes de stabilité, de toxicité et de facteur de mérite ZT.

I.3.4 Matériaux thermoélectriques pour les hautes températures

Les alliages de silicium et de germanium présentent d'excellentes propriétés thermoélectriques dans cette plage de température (supérieure à 1000 K) et sont principalement utilisés pour la production d'électricité dans le domaine spatial [26]. Les oxychalcogénures de composés tels que BiCuSeO ont montré des valeurs élevées de ZT, allant jusqu'à 1,5 en type p, grâce à leur très faible conductivité thermique intrinsèque [27].

De plus, des films d'oxyde de cobalt recouverts de baryum ont démontré une stabilité thermique jusqu'à 600°C, avec un ZT atteignant ~ 0,55, comparable à certains convertisseurs thermoélectriques commerciaux [28].

I.3.5 Autres matériaux thermoélectriques

I.3.5.1 Skuttérudites

Les Skuttérudites sont des matériaux thermoélectriques prometteurs. Ils possèdent une structure cristalline cubique à face centrée, avec des atomes de cobalt et d'arsenic, souvent contaminés par des terres rares, et appartiennent à la classe des sulfures. Les Skuttérudites ont été découverts pour la première fois en 1928 à Skutterud, en Norvège, et présentent d'excellentes propriétés électriques. Ces matériaux se caractérisent par une mobilité de porteurs de charge très élevée et un coefficient de Seebeck de taille moyenne. Leur conductivité thermique pose un défi, car elle est initialement trop élevée pour une utilisation efficace dans différentes applications. Cependant, des recherches récentes ont montré qu'il est possible de modifier les Skuttérudites afin de réduire leur conductivité thermique, ce qui en fait des candidats potentiels pour des convertisseurs thermoélectriques plus efficaces capables de convertir directement la chaleur perdue en électricité, par exemple dans les systèmes d'échappement des automobiles [29] [30] [31].

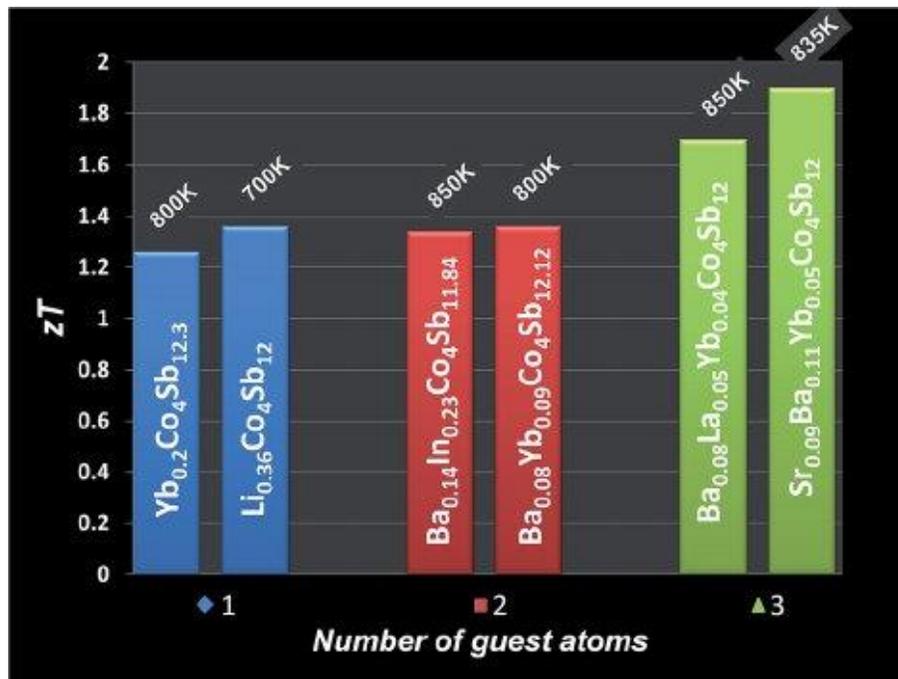


Figure I-2 : Meilleures valeurs ZT obtenues avec les différents atomes invités pour les skuttérudites de type n

I.3.5.2 Clathrates

L'avantage unique qui attire l'attention des chercheurs sur ces matériaux est leur très faible conductivité thermique, caractéristique essentielle pour les matériaux thermoélectriques. Cette propriété est due à leur structure cristalline complexe qui crée de nombreuses interfaces et défauts, facilitant ainsi la diffusion de la chaleur [32].

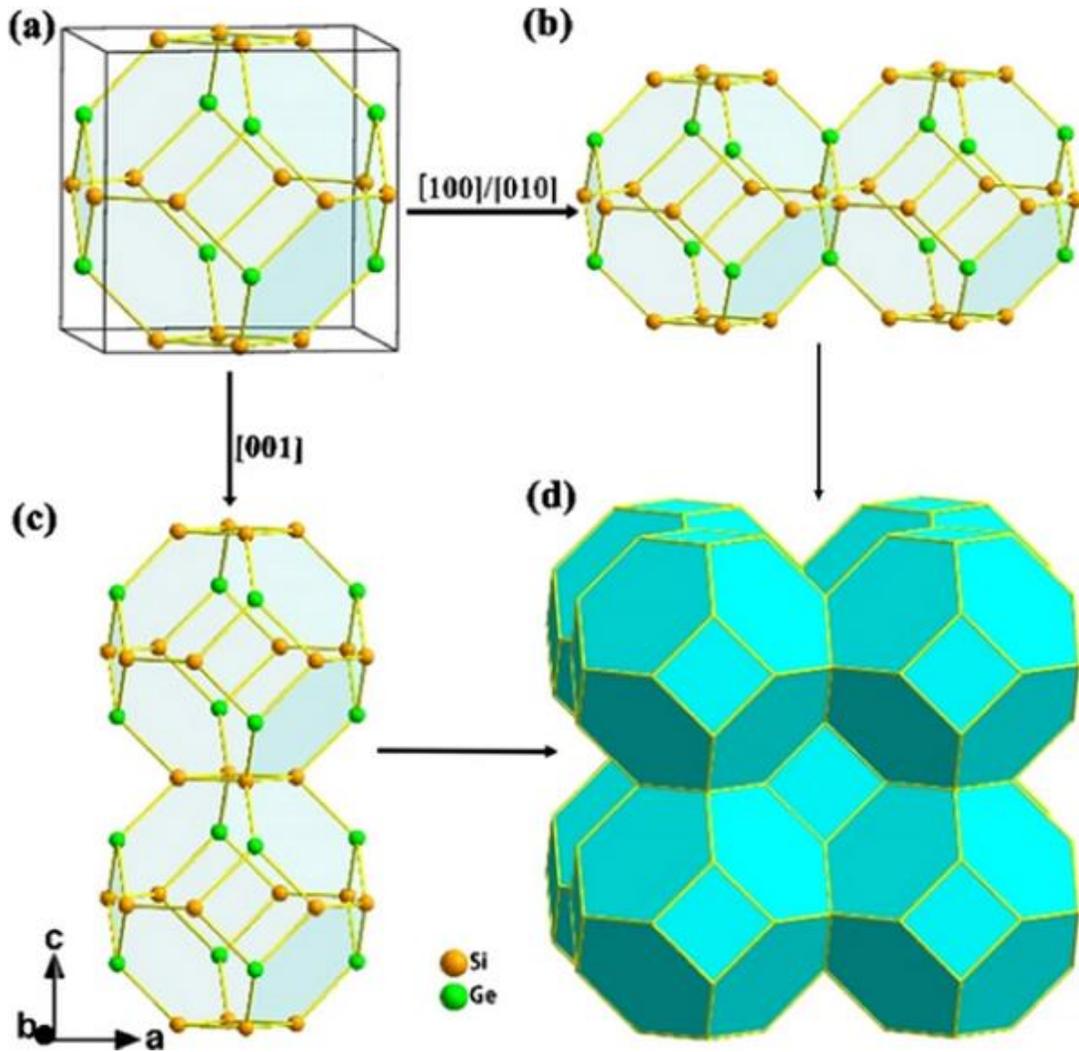


Figure 1-3 : a) The unit cell structure of VII-type Si₂Ge clathrate marked by black lines, b, c) Linkage of tetrakaidecahedra along selected directions, d) The 3D sodalite framework of Si₂Ge. Tetrakaidecahedron (Si₈Ge₄)₂: blue polyhedron, yellow apex: Si atom; gre

De plus, les Clathrates peuvent être dopés pour optimiser leurs propriétés électriques et thermoélectriques. Par exemple, l'insertion d'atomes 'invités' dans les cages de la structure clathrate permet de contrôler la concentration des porteurs de charge et d'améliorer le facteur de mérite thermoélectrique [33].

En fin, certains clathrates à base de silicium présentent l'avantage d'être composés d'éléments abondants et non toxiques, ce qui facilite leur production à grande échelle.

I.3.5.3 Les phases de Zintl

Ces dernières années, les phases de Zintl ont suscité un vif intérêt. Ce sont généralement des semi-conducteurs à faible bande interdite et à structure cristalline complexe. Elles possèdent des propriétés physiques variées, une bonne stabilité thermique à haute température et une résistance mécanique robuste. Ces caractéristiques en font des candidats prometteurs pour des applications thermoélectriques [34].

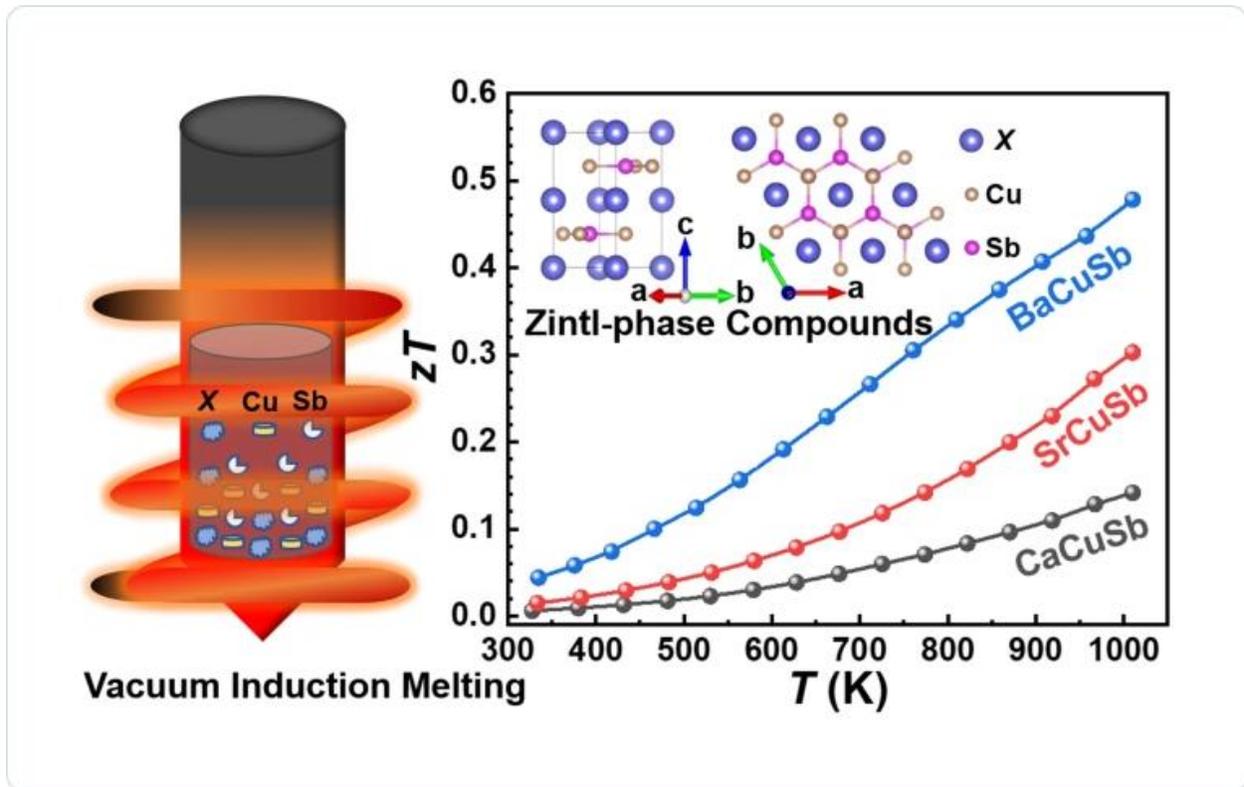


Figure I-4 : $XCuSb$ ($X=Ca, Sr, Ba$) : (a) vue de face et de côté de la structure cristalline, (b) diagramme schématique de la fusion sous vide, et c modèle XRD

Les meilleures valeurs de facteur de mérite obtenue pour les phases de Zintl sont généralement entre 1 et 1.5. Cela présente une amélioration significative par rapport aux matériaux thermoélectriques conventionnels qui atteignent rarement un ZT supérieur à 1 [35].

La structure cristalline des phases de Zintl et la possibilité de substitution chimique permettent d'ajuster finement leurs propriétés électriques afin d'optimiser leur performance thermoélectrique.

Par exemple, le composé Mo_3Sb_7 et ses dérivées substituées au tellure $\text{Mo}_3\text{Sb}_{7-x}\text{TeX}$ se sont révélés être de bons candidats pour des applications à haute température [36].

I.3.6 Matériaux thermoélectriques récents

I.3.6.1 Oxychalcogénures de type BiCuSeO

Les Oxychalcogénures de type BiCuSeO sont une famille de matériaux très prometteuse pour la thermoélectricité. Ils possèdent une conductivité thermique intrinsèquement très faible, ce qui leur permet d'attendre des facteurs de mérite élevés, jusqu'à 1.4 à 923 K. Bien que ces matériaux aient initialement été étudiés pour des applications en optoélectronique, leurs propriétés thermoélectriques les rendent très intéressants, en particulier dans la gamme de température 400-650°C [37].

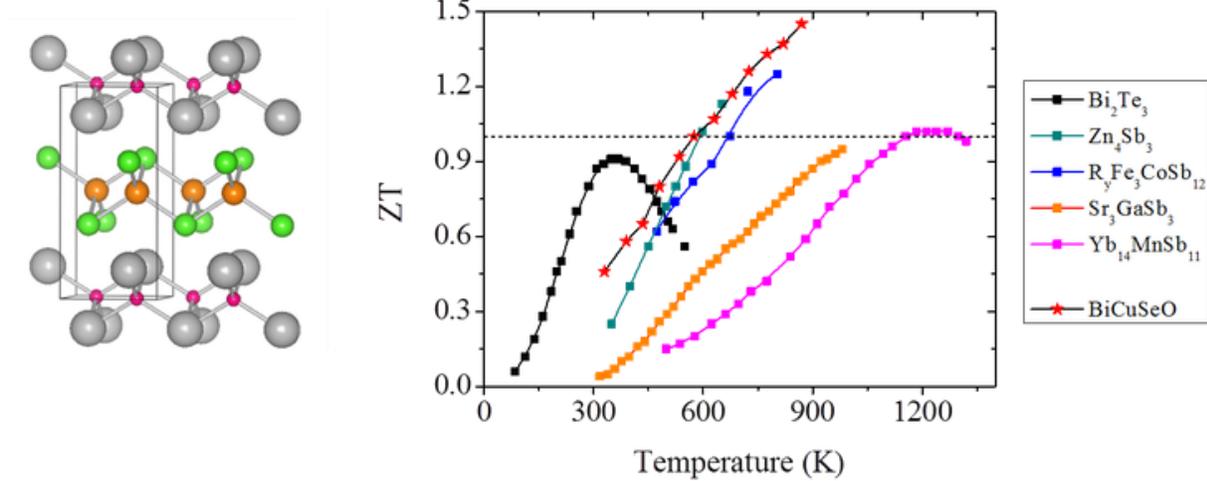


Figure I-5 : Facteur de Mérite de BiCuSeO et autres matériaux thermoélectriques

I.3.6.2 Alliages de type AgBiSe_2

Ces alliages sont une autre famille de matériaux thermoélectriques récents qui présentent un fort potentiel. Contrairement à la plupart des autres matériaux de cette famille qui sont de type p, les I-V-VI de type AgBiSe_2 peuvent être de type n, offrant ainsi de nouvelles possibilités pour la conception des modules thermoélectriques [38].

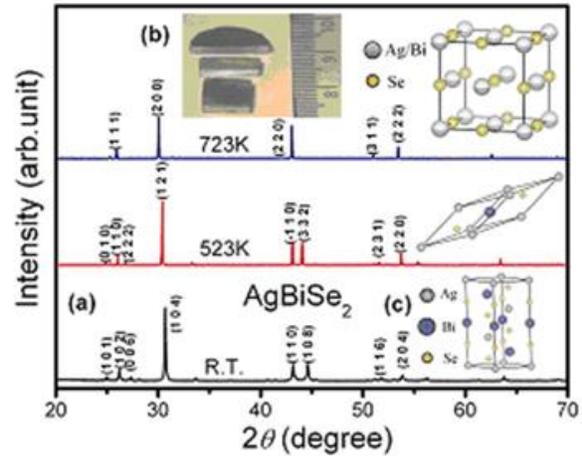
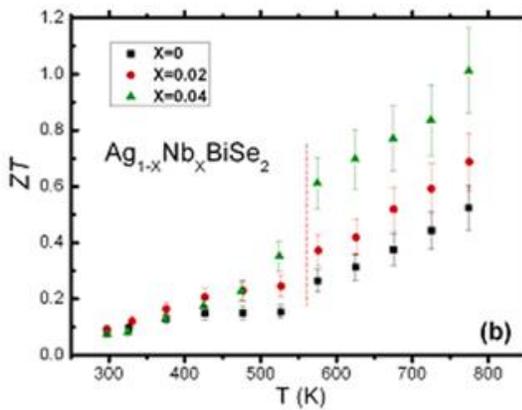


Figure I-6 : Propriétés thermoélectriques élevées de n-type $AgBiSe_2$

I.3.6.3 Matériaux à base de polymères semi-conducteurs dopés

Plus récemment, des équipes de recherche ont réussi à établir un nouveau record de performance thermoélectrique pour des matériaux à base de polymères semi-conducteurs dopés. Ces matériaux présentent l'avantage d'être souple et légers, ouvrant la voie à de nouvelles applications [39].

I.4 Applications thermoélectriques

I.4.1 Module à effet Peltier



Figure I-7 : Module Peltier

Les modules à effet Peltier sont des composants électroniques qui fonctionnent comme des pompes à chaleur compactes et efficaces. Ils sont composés de deux matériaux semi-conducteurs de type n et p, connectés électriquement en série et thermiquement en parallèle, et placés entre deux substrats en céramique [40].

Lorsqu'un courant électrique continu est appliqué à ces modules, il se produit un phénomène appelé effet Peltier : la chaleur est déplacée d'un côté du module à l'autre, refroidissant une face et réchauffant l'autre simultanément. Ce phénomène est réversible, ce qui permet d'utiliser ces modules aussi bien pour le refroidissement que le chauffage [41].

Les principaux avantages des modules Peltier sont :

- Fiabilité et robustesse (pas de fluides, composant solide)
- Contrôle précis et rapide de la température en modulant le courant
- Faible encombrement
- Fonctionnement silencieux et faibles interférences électriques
- L'absence de vibration et une durée de vie infinie

Cependant, ils sont limités à de petites surfaces et courants. Leur utilisation nécessite l'emploi de dissipateurs thermiques pour évacuer la chaleur pompée, ainsi que l'utilisation d'interfaces thermiques pour assurer l'efficacité du transfert de chaleur.

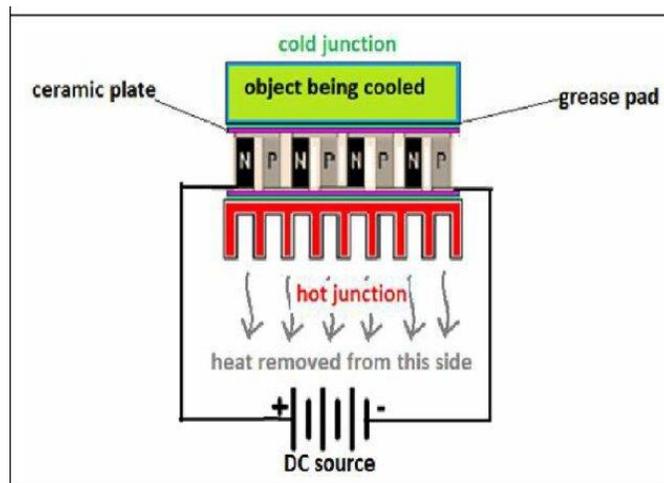


Figure I-8 : Effet Peltier – Réfrigérateur

Les modules Peltier peuvent être utilisés en mode actif (alimentés électriquement) ou passif (comme capteurs de température). Ils trouvent de nombreuses applications dans des domaines comme l'électronique, l'instrumentation, la médecine ou encore l'industrie.

Pour choisir le module Peltier le plus adapté à une application, il est recommandé de calculer les charges thermiques impliquées, de définir les températures cibles, et de déterminer le nombre d'étages requis. Des outils de calcul en ligne peuvent également aider à la sélection [42].

I.4.2 Thermo-générateurs

Les thermo-générateurs ont diverses applications, notamment :

Récupération de la chaleur perdue : Les GTE sont utilisés pour exploiter la chaleur perdue et la convertir en énergie électrique utile. Ils offrent une méthode efficace et à l'état solide pour la récupération d'énergie, en particulier dans les scénarios où une source de chaleur perdue est disponible [43].

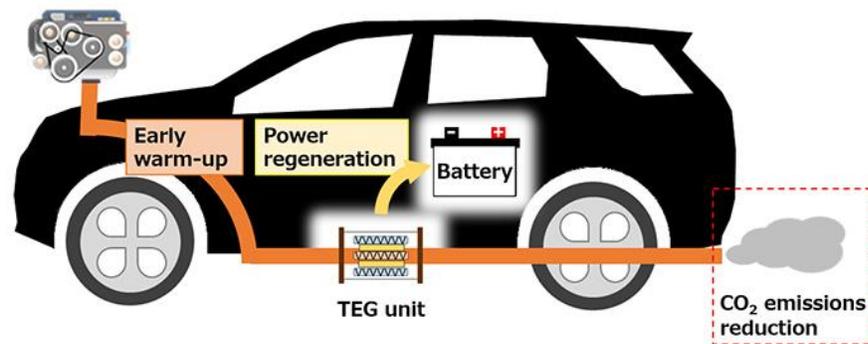


Figure I-9 : Schéma démonstratif d'exemple de récupération d'énergie

Internet of Things (IoT) : Avec l'essor de l'IoT et le besoin d'autonomie énergétique microscopique pour des milliards de capteurs, les GTE présentent une solution prometteuse. Ils peuvent fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement autonome des capteurs sans les défis logistiques liés au remplacement de milliards de piles [44].

Applications à basse température : Des recherches sont en cours pour développer des dispositifs thermoélectriques pouvant fonctionner efficacement à des températures plus basses. Des innovations telles que les diodes à jonction tunnel MOS bipolaires montrent des promesses dans la conversion de la chaleur en électricité dans des plages de température plus basses [43].

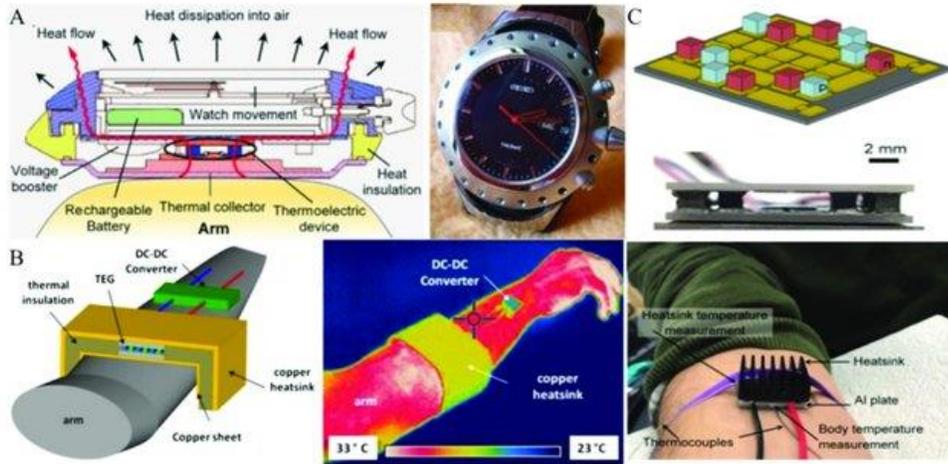


Figure I-10 : La montre-bracelet thermique de Seiko

Applications spatiales : L'application la plus connue dans le domaine spatial est les Radio-Isotope Thermo-générateurs (RTG) [45], ils sont des batteries nucléaires qui utilisent des thermocouples pour convertir la chaleur produite par la désintégration de matériaux radioactifs en électricité grâce à l'effet Seebeck. Ces générateurs se caractérisent par leur fiabilité dans des environnements éloignés et hostiles, car ils ne comportent pas de pièces mobiles, réduisant ainsi le risque de dysfonctionnement sur des périodes prolongées.

On utilise les RTG car ils fournissent une source d'énergie fiable dans les confins lointains de l'espace où la lumière du soleil est limitée ou irrégulière. Contrairement aux panneaux solaires qui dépendent de la lumière du soleil, les RTG peuvent générer de l'électricité de façon continue, indépendamment de l'emplacement ou de l'orientation du vaisseau spatial par rapport au Soleil [46].

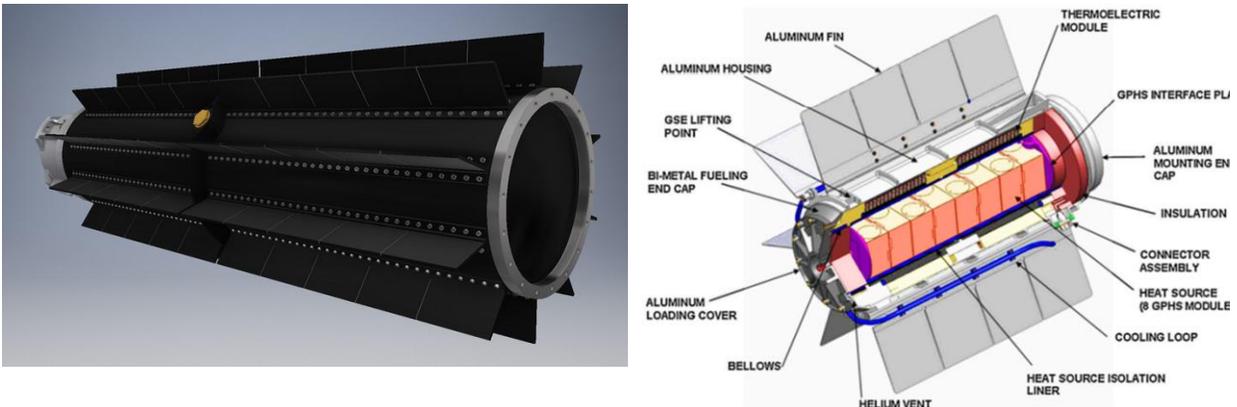


Figure I-11 : Représentation et description d'un RTG

I.5 Conclusion

Des recherches intensives ont été menées sur les matériaux thermoélectriques récents dans le but d'améliorer leur efficacité dans la conversion de chaleur en électricité. Des progrès significatifs ont été réalisés, avec des valeurs du facteur de mérite ZT dépassant 1,3 dans plusieurs familles de composés, et même atteignant 1,7 dans certains cas. Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives pour des applications pratiques en permettant une utilisation plus étendue de la thermoélectricité dans différents domaines de température. Les recherches actuelles se concentrent sur l'optimisation du facteur de puissance et la réduction de la conductivité thermique afin d'améliorer encore les performances des matériaux thermoélectriques.

Références

- [1] - I, Chikina; C, Goupil; S, Sharapov G; A, Varlamov A, ‘Thermoelectricity: from the iron arc of Alessandro’, 2024, Pages 2-3, disponible en version numérique [<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/ad0a06/pdf>]
- [2] - Bryan Charlotte, ‘Etude et développement de capteurs thermiques pour composants de puissance’, 2020, disponible en version numérique : [<https://theses.hal.science/tel-03173170v1/document>]
- [3] - PIRE, Bernard, ‘PELTIER JEAN CHARLES ATHANASE (1785-1845)’, 16/03/1999 modifié le 14/03/2009, URL : [<https://www.universalis.fr/encyclopedie/jean-charles-athanase-peltier/>]
- [4] – Salim Ferhat, ‘Générateurs thermoélectriques imprimés sur substrats souples à base de matériaux hybrides pour des applications autour de la température ambiante’, 2018, disponible en version numérique : [<https://theses.hal.science/tel-01875552v1/document>]
- [5] - Michel ALAIS, ‘THERMOÉLECTRICITÉ’, 19/01/1999 modifié le 14/03/2009, URL : [<https://www.universalis.fr/encyclopedie/thermoelectricite/>]
- [6] - Ioffe, A. F, ‘Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling’, London 1957
- [7] - Feng, Xiaohua, ‘Etude des propriétés thermoélectriques des revêtements de matériaux de type β -FeSi₂’, 2016, disponible en version numérique : [<https://theses.hal.science/tel-01873483v1/document>]
- [8] – Driss Kenfau, ‘Étude des propriétés mécaniques et thermoélectriques des matériaux Ca₃Co₄O₉ texturés pour la conversion d'énergie’, 2010, disponible en version numérique : [<https://theses.hal.science/tel-00547858v1/document>]
- [9] – Valéry Ouvarov-Bancalero, ‘NOUVEAUX MATÉRIAUX D'ANODES INERTES ÉLABORÉS PAR MÉCANOSYNTÈSE POUR LA PRODUCTION D'ALUMINIUM’, 2013, disponible en version numérique : [<https://espace.inrs.ca/id/eprint/2159/1/Ouvarov-Bancalero.V.pdf>]

- [10] - Gérard, Le Caër, R. de Araujo, Pontès, D. Osso, S., Bégin-Colin, P, Matteazzi, 'Mécanosynthèse de composés et des composites nanocristallins', 1994, disponible en version numérique :
[<https://jp4.journaldephysique.org/articles/jp4/abs/1994/03/jp4199404C332/jp4199404C332.html>]
- [11] - Bertrand LENOIR, Jean-Pierre MICHENAUD, Anne DAUSCHER, 'Thermoélectricité : des principes aux applications', Déc 2021, URL : [<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/proprietes-electriques-et-electrochimiques-42336210/thermoelectricite-des-principes-aux-applications-k730/>]
- [12] - Claude GODART, 'Matériaux à effets thermoélectriques', juin 2009, URL : [<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-actifs-et-intelligents-42126210/materiaux-a-effets-thermoelectriques-n1500/>]
- [13] – Linseis, 'Analyse des matériaux thermoélectriques – le chiffre de mérite et sa mesure', URL : [<https://www.linseis.com/fr/connaitre/analyse-des-materiaux-thermoelectriques-le-chiffre-de-merite-et-sa-mesure/>]
- [14] - Djalila Boudemagh, 'Synthèse et Etude des Matériaux hermoélectrique du Système Mg₂Si_{1-x}Sn_x', 2010, disponible en version numérique : [<https://theses.hal.science/tel-00488411v1/document>]
- [15] - Roux-Briffaud Jonas, 'La Thermoélectricité', Mai 2008, disponible en version numérique : [https://www.univ-nantes.fr/medias/fichier/thermoelectricitev2_1227128936574.pdf]
- [16] - Giorgio MATTANA, Jennifer PERON, 'Matériaux thermoélectriques polymères', Oct. 2023, URL : [<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/proprietes-electriques-et-electrochimiques-42336210/materiaux-thermoelectriques-polymeres-k721/>]
- [17] - Jean-Baptiste Vaney, 'Contribution à l'étude des propriétés thermoélectriques de vitrocéramiques et verres de chalcogénures semi-conducteurs', Sep. 2014, disponible en version numérique : [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2014_0115_VANEY.pdf]

- [18] - Driss Kenfaui, 'Étude des propriétés mécaniques et thermoélectriques des matériaux $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ texturés pour la conversion d'énergie', 2010, disponible en version numérique : [https://theses.hal.science/tel-00547858v1/document]
- [19] - Thi Thanh Xuan Vo, 'Nanomatériaux pour applications thermoélectriques', 2015, disponible en version numérique : [https://theses.hal.science/tel-01228226v1/document]
- [20] - O. Yamashita, S. Tomiyoshi, 'Effect of annealing on thermoelectric properties of bismuth telluride compounds', 2003
- [21] - Goldsmid, H, 'Thermoelectric refrigeration', 1964
- [22] - Iratni Meriem, 'Contribution à l'étude théorique des propriétés thermoélectriques des matériaux (Cas : l'oxychalcogénure)', 2021, disponible en version numérique : [https://dspace.univ-bba.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/1176/M.FINAL%20%20%28Enregistr%c3%a9%20automatiquement%29%20Copy.pdf?sequence=1&isAllowed=y]
- [23] - Sharp, J. W, 'Some properties of Ge-Te based thermoelectric materials', 2003
- [24] - Driss Kenfaui, 'Étude des propriétés mécaniques et thermoélectriques des matériaux $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ texturés pour la conversion d'énergie', 2010, disponible en version numérique : [https://theses.hal.science/tel-00547858v1/document]
- [25] - Thi Thanh Xuan Vo, 'Nanomatériaux pour applications thermoélectriques', 2015, disponible en version numérique : [https://theses.hal.science/tel-01228226v1/document]
- [26] - O. Yamashita, N. Sadatomi, 'Thermoelectric properties of $\text{Si}_{1-x}\text{Gex}$ ($x < 0.10$) with alloy and dopant segregations', 2000, disponible en version numérique: [https://www.researchgate.net/publication/234977411_Thermoelectric_properties_of_Si1-xGexx010_with_alloy_and_dopant_segregations]
- [27] - David Bérardan, Céline Roux-Byl, Nita Dragoë, Nghi Pham, 'Développement de nouveaux matériaux thermoélectriques', URL : [https://www.icmمو.universite-paris-saclay.fr/fr/equipes/sp2m/thematiques/materiaux-fonctionnels/materiaux-thermoelectriques/]

- [28] – CHEMEUROPE.COM, ‘Découverte d'un matériau thermoélectrique efficace, stable et respectueux de l'environnement’, Juil 2022, URL : [https://www.chemeurope.com/fr/news/1176934/decouverte-d-un-materiau-thermoelectrique-efficace-stable-et-respectueux-de-l-environnement.html]
- [29] - Rebekka Taubmann, Katrin Tamang, ‘Skutterudite: High-Performance Material for Thermoelectric Applications’, URL : [https://analyzing-testing.netzsch.com/en-US/application-literature/skutterudite-high-performance-material-for-thermoelectric-applications]
- [30] - M. Rull-Bravo, A. Moure, J. F. Fernandez, M. Martin-Gonzalez, ‘Skutterudites as thermoelectric materials: revisited’, 2015, disponible en version numérique : [https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ra/c5ra03942h]
- [31] - Zhi-Yuan LIU, Jiang-Long ZHU, Xin TONG, Shuo NIU, Wen-Yu ZHAO, ‘A review of CoSb₃-based skutterudite thermoelectric materials’, 2020
- [32] - Marta Rull, Jose F. Fernandez, Alberto Moure, Marisol Martin-Gonzalez, ‘Skutterudites as Thermoelectric Materials : Rvisited’, 2015
- [33] - Bo B. Iversen, Anders E.C. Palmqvist, David E. Cox..., ‘Why are Clathrates Good Candidates for Thermoelectric Materials ?’, 2000, disponible en version numérique : [https://www.researchgate.net/publication/229314483_Why_are_Clathrates_Good_Candidates_for_Thermoelectric_Materials].
- [34] - Amine, ZOUÏ Mohamed, ‘Conception et optimisation de la performance d'un module thermoélectrique pour génération d'énergie thermique ou électrique’, 2022
- [35] - Christophe Candolfi, ‘Synthèse, caractérisation physico-chimique et propriétés de transport de composés de type Mo₃Sb₇’, 2008, disponible en version numérique : [https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01753022v1/document]
- [36] - Christophe Candolfi, ‘Synthèse, caractérisation physico-chimique et propriétés de transport de composés de type Mo₃Sb₇’, 2008, disponible en version numérique : [https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01753022v1/document]

- [37] - David Bérardan, Céline Roux-Byl, Nita Dragoë, Nghi Pham, ‘Développement de nouveaux matériaux thermoélectriques’, URL : [<https://www.icmmo.universite-paris-saclay.fr/fr/equipes/sp2m/thematiques/materiaux-fonctionnels/materiaux-thermoelectriques/>]
- [38] - David Bérardan, Céline Roux-Byl, Nita Dragoë, Nghi Pham, ‘Développement de nouveaux matériaux thermoélectriques’, URL : [<https://www.icmmo.universite-paris-saclay.fr/fr/equipes/sp2m/thematiques/materiaux-fonctionnels/materiaux-thermoelectriques/>]
- [39] - Nicolas Leclerc, Martin Brinkmann, ‘Thermoélectricité : un rendement record pour des matériaux semi-conducteurs polymères dopés’, 2022, disponible en version numérique : [<https://www.inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/thermoelectricite-un-rendement-record-pour-des-materiaux-semi-conducteurs-polymeres-dopes>]
- [40] – Ferrotech, ‘Modules Thermoélectriques a effet Peltier’, URL : [<https://www.technicome.com/solutions/composants/solutions-thermal-management/modules-thermoelectriques-a-effet-peltier/>]
- [41] - PITCH TECHNOLOGIES, ‘Principe du module Peltier’, URL : [<https://pitch-technologies.fr/produits/laird-principe-module-peltier-agent-en-france/>]
- [42] - PITCH TECHNOLOGIES, ‘Comment choisir un module Peltier’, URL : [<https://pitch-technologies.fr/produits/comment-choisir-le-module-peltier-application-industrielle/>]
- [43] - Lee Teschler, ‘Solid-state devices that convert heat to energy have a reputation for being inefficient. New materials may eventually change the equation’, URL : [<https://www.designworldonline.com/harnessing-waste-heat-for-electrical-power/>]
- [44] - Luis Fonseca, Inci Donmez-Noyan..., ‘Transitioning from Si to SiGe Nanowires as Thermoelectric Material in Silicon-Based Microgenerators’, 2021, disponible en version numérique : [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7922322/>]
- [45] - Lee Teschler, ‘Solid-state devices that convert heat to energy have a reputation for being inefficient. New materials may eventually change the equation’, URL : [<https://www.designworldonline.com/harnessing-waste-heat-for-electrical-power/>]
- [46] - R.C. O’Brien, R.M. Ambrosi, N.P. Bannister, S.D. Howe, H.V. Atkinson, ‘Safe radioisotopes thermoelectric generators and heat sources for space applications’, 2008

[47] - Chris Morrison, 'Space Exploration with Radioisotope Power', juil. 2015, disponible en version numérique : [<https://anstd.ans.org/how-radioisotope-power-systems-work/>]

Chapitre II

FORMULATION MATHEMATIQUE DE LA THERMOELECTRICITE

Chapitre II : FORMULATION MATHÉMATIQUE DE LA THERMOÉLECTRICITÉ

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons répondre à la question de ce qu'est la thermoélectricité. Nous allons exposer et expliquer les formulations mathématiques qui décrivent le phénomène de la thermoélectricité, ainsi que les performances d'un dispositif thermoélectrique en tant que réfrigérateur ou générateur d'électricité. Nous parlerons également de la célèbre grandeur appelée « facteur de mérite ZT », qui est utilisée pour comparer les matériaux thermoélectriques.

II.2 Qu'est-ce qu'un phénomène thermoélectrique

Un phénomène thermoélectrique est un processus physique qui implique la conversion directe d'énergie thermique en électricité, et vice versa. Ce phénomène est observé dans certains matériaux et est à la base de diverses applications. L'effet thermoélectrique relie les flux de chaleur à travers les matériaux aux courants électriques qui les parcourent.

Plus précisément, un matériau thermoélectrique a la capacité de convertir directement la chaleur en électricité ou de déplacer l'énergie thermique en appliquant un courant électrique.

L'effet thermoélectrique se base sur deux axes, l'effet de Seebeck qui est le responsable de transformer différence de température en un potentiel d'électricité, et l'effet inverse c'est l'effet Peltier qui est la cause de la production d'énergie thermique à partir d'un potentiel électrique.

II.3 Les phénomènes de conversion d'énergie

Pour qu'un phénomène thermoélectrique (soit en mode réfrigérateur ou en mode thermogénérateur), se produise, il faut une conversion d'énergie.

II.3.1 La conduction thermique

La conduction de la chaleur est le transfert d'énergie thermique à travers un matériau en raison d'un gradient de température, sans l'implication d'un mouvement de masse du matériau. Le taux de conduction de la chaleur est régi par la loi de Fourier et peut être décrit mathématiquement à l'aide de l'équation de la chaleur.

II.3.1.1 Loi de Fourier de la conduction de chaleur

La loi de Fourier stipule que le taux de transfert de chaleur à travers un matériau est proportionnel au gradient négatif de température et à la surface perpendiculaire à la direction de l'écoulement de chaleur. Mathématiquement, elle peut s'exprimer ainsi :

$$\dot{Q} = -\lambda \nabla T \quad (II-1)$$

Le signe négatif indique que la chaleur s'écoule d'une région de température plus élevée vers une région de température plus basse.

II.3.1.2 L'équation de la chaleur

L'équation de la chaleur décrit la distribution de température dans un matériau au fil du temps, en tenant compte de la conduction de la chaleur. Elle est dérivée du principe de conservation de l'énergie et de la loi de Fourier.

En coordonnées cartésiennes, la forme générale de l'équation de la chaleur est :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + q''' \quad (II-2)$$

L'équation de la chaleur peut être simplifiée pour des cas spécifiques :

- Régime permanent, sans génération de chaleur :

$$\nabla(\lambda \nabla T) = 0 \quad (II-3)$$

- Unidimensionnel, régime permanent, sans génération de chaleur :

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (II-4)$$

- Unidimensionnel, transitoire, sans génération de chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (II-5)$$

II.3.1.3 Conditions aux limites

Pour résoudre l'équation de la chaleur, des conditions aux limites appropriées doivent être spécifiées. Les conditions aux limites courantes incluent [1][2] :

- a- Condition aux limites de Dirichlet : Spécifie la température à la limite
- b- Condition aux limites de Neumann : Spécifie le flux de chaleur à la limite

- c- Condition aux limites de Robin : Spécifie un coefficient de transfert de chaleur par convection et la température ambiante à la limite

II.3.2 La convection thermique

C'est un processus fondamental de transfert de chaleur, où la chaleur est transférée d'un endroit à un autre en raison du mouvement d'un fluide. Ce rapport fournit une analyse approfondie de la convection de chaleur, y compris ses types, ses équations mathématiques et les facteurs qui l'influencent.

II.3.2.1 Types de convection thermique

- a- Convection naturelle : elle se produit lorsque des différences de densité dues aux variations de température provoquent le mouvement du fluide. Ce phénomène est courant dans des processus naturels comme la circulation de l'air dans l'atmosphère et le mouvement de l'eau dans les océans
- b- Convection forcée : elle est provoquée par des moyens externes comme des pompes ou des ventilateurs, qui font circuler le fluide. Elle est couramment utilisée en ingénierie, notamment dans les échangeurs de chaleur, les systèmes de refroidissement et les systèmes de ventilation

II.3.2.2 Equation mathématique

La relation de base pour le transfert de chaleur par convection est donnée par la loi de refroidissement de Newton, qui stipule que le taux de perte de chaleur d'un corps est proportionnel à la différence de température entre le corps et son environnement :

$$\dot{Q} = hA(T - T_f) \quad (II-6)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection h dépend des propriétés physiques du fluide et de la situation physique. Les valeurs de h ont été mesurées et tabulées pour les fluides et les situations d'écoulement couramment rencontrés.

II.3.3 Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit par l'émission d'ondes électromagnétiques, sans l'intervention d'un milieu matériel. Ce rapport fournit une analyse approfondie du rayonnement thermique, y compris ses équations mathématiques et les facteurs qui l'influencent.

II.3.3.1 La loi de Stefan-Boltzmann

Le taux de transfert de chaleur par rayonnement à partir d'une surface est donné par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\dot{Q} = \sigma A \epsilon (T^4 - T_s^4) \quad (II-7)$$

L'émissivité ϵ est une grandeur sans dimension qui représente l'efficacité d'une surface à émettre de l'énergie par rayonnement. Elle varie de 0 à 1, avec une valeur de 1 représentant un corps noir parfait.

II.4 Propriétés physiques et chimiques

Ce phénomène est caractérisé par des paramètres de base qui sont les suivants.

II.4.1 La résistivité et la conductivité électrique

La résistivité électrique d'un matériau, notée ρ , est un nombre décrivant dans quelle mesure ce matériau résiste à la circulation de l'électricité. La résistivité est mesurée en unités d'ohm mètres ($\Omega \text{ m}$). Si l'électricité peut circuler facilement à travers un matériau, ce matériau a une faible résistivité. Si l'électricité a beaucoup de difficulté à circuler à travers un matériau, ce matériau a une haute résistivité.

La conductivité électrique est représentée par la lettre grecque σ (sigma) et est définie comme l'inverse de la résistivité. Cela signifie qu'une résistivité élevée est la même chose qu'une faible conductivité, et qu'une faible résistivité est la même chose qu'une forte conductivité [3].

$$\sigma = \frac{1}{\rho_e} \quad (II-8)$$

II.4.2 La conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau, notée λ , peut être définie comme le taux de transfert de chaleur à travers une épaisseur unitaire du matériau par unité de surface et par différence de température unitaire. La conductivité thermique d'un matériau est une mesure de la capacité du matériau à conduire la chaleur. Une valeur élevée de conductivité thermique indique que le matériau est un bon conducteur de chaleur, et une faible valeur indique que le matériau est un mauvais conducteur de chaleur ou un isolant.

Notez que les matériaux tels que le cuivre et l'argent, qui sont de bons conducteurs électriques, sont également de bons conducteurs de chaleur et ont des valeurs élevées de conductivité thermique. Les matériaux tels que le caoutchouc, le bois et le Styrofoam sont de mauvais conducteurs de chaleur et ont des valeurs de conductivité faibles, dans notre problème on est besoin d'un matériau qui est un bon conducteur électrique et qui a une basse conductivité thermique [4].

II.4.3 Le coefficient de Seebeck

Considérons le circuit ouvert composé de deux conducteurs différents avec des coefficients de Seebeck respectifs $\alpha_A(T)$ et $\alpha_B(T)$, joints ensemble au point c à la température $T_h = T + \Delta T$, et déconnectés entre les points A et B, à une température plus basse T. Cette configuration est illustrée dans la Fig. Pour des conducteurs homogènes, la valeur de $\alpha_{A,B}(x)$ au point x est déterminée par $T(x)$ et la force électromotrice entre A et B est obtenue en utilisant l'équation qui donne :

$$V_{AB} = \bar{\Phi}(A) - \bar{\Phi}(B) = \int_A^B dx \alpha(x) \frac{dT}{dx} = \int_{T_A}^{T_c} dT \alpha_B(T) - \int_{T_B}^{T_c} dT \alpha_A(T) \quad (II-9)$$

II.4.3.1 Schéma explicative du phénomène

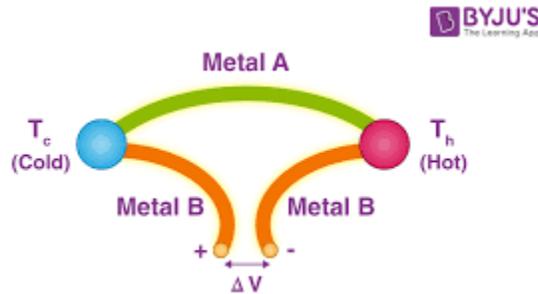


Figure II-1 : Schéma explicative de l'Effet de Seebeck

Si $T(A) = T$ et $\Delta T = T(C) - T(A)$ est petit, alors :

$$V_{AB} = \int_T^{T+\Delta T} dT (\alpha_B - \alpha_A) \sim \Delta T [\alpha_B(T) - \alpha_A(T)] \quad (II-10)$$

Pour que le coefficient de Seebeck relatif des deux matériaux soit obtenu [3] :

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B = \frac{V_{AB}}{\Delta T} \quad (II-11)$$

II.4.3.2 Explication du phénomène

Considérons maintenant deux matériaux A et B comme des semi-conducteurs de type n et de type p respectivement. Lorsqu'une différence de température est appliquée à ce couple, l'effet Seebeck entre en jeu. Ce phénomène s'explique par la diffusion des porteurs de charge, à savoir les électrons (e-) pour le semi-conducteur de type n et les trous (e+) pour le semi-conducteur de type p, du côté chaud vers le côté froid du matériau. Dans le cas d'un circuit ouvert, les électrons se concentrent dans la partie froide du semi-conducteur de type n, tandis que les trous se rassemblent dans la partie froide du semi-conducteur de type p. Par conséquent, la partie froide du semi-conducteur de type n se charge négativement, tandis que celle du semi-conducteur de type p se charge positivement. Cette séparation de charges crée une différence de potentiel entre les deux extrémités froides des matériaux [5].

II.4.4 Le coefficient de Peltier

La chaleur absorbée ou émise par unité de temps (flux de chaleur) au niveau d'une jonction est donnée par :

$$Q = \Pi I \quad (II-12)$$

Le coefficient de Peltier est relié avec le coefficient de Seebeck par la relation :

$$\Pi = \alpha T \quad (II-13)$$

ou :

- Q est le flux de chaleur absorbé ou émis au niveau de la jonction (positif pour l'absorption, négatif pour l'émission)
- Π est le coefficient de Peltier de matériau
- I est la densité de courant [6]

Le coefficient Peltier peut être exprimé en termes des propriétés électroniques du matériau :

$$\Pi = \frac{gq\tau}{(2\pi h_p)^3} \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty (8m\epsilon_n)^{\frac{1}{2}} (\epsilon - \mu) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \epsilon}\right) d\epsilon \quad (II-14)$$

Où :

- g est le facteur de dégénérescence
- q est la charge de l'électron

- τ est le temps de relaxation
- h est la constante de Planck réduite
- ϵ_n est l'énergie
- μ est le potentiel chimique
- f_0 est la fonction de distribution de Fermi-Dirac [7]

II.4.4.1 Explication du phénomène

L'effet Peltier est le contraire de l'effet Seebeck – tandis que l'effet Seebeck génère une tension à partir d'une différence de température, l'effet Peltier génère une différence de température à partir d'une tension [8]. Lorsqu'un courant électrique traverse une jonction de deux matériaux différents, de la chaleur est absorbée à une jonction et libérée à l'autre jonction, permettant des effets de refroidissement ou de chauffage. L'effet Peltier est utilisé dans les refroidisseurs thermoélectriques et les pompes à chaleur, qui n'ont pas de pièces mobiles et peuvent fournir un refroidissement ou un chauffage modeste en faisant passer un courant électrique à travers un module thermoélectrique.

Cependant, l'efficacité des dispositifs Peltier est limitée à environ 5% [9].

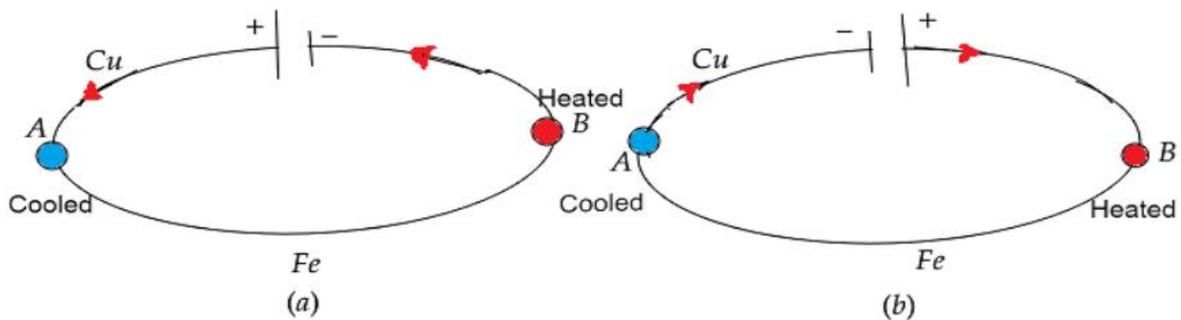


Figure II-2 : Explication du phénomène de l'Effet Peltier

II.4.5 Le coefficient de Thomson

Si une densité de courant I est passée à travers un conducteur, la chaleur produite par unité de volume est :

$$q = \rho I^2 - \beta I \frac{dT'}{dx} \quad (II-15)$$

Ces trois coefficients thermoélectriques sont liés les uns aux autres de telle manière que :

$$\Pi = \alpha T \quad (II-16)$$

$$\beta = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (II-17)$$

Cela est connu sous le nom d'effet Thomson. Le taux d'absorption ou de libération de chaleur est déterminé par le gradient de température et la densité de courant à travers le conducteur.

Ces trois effets, combinés, donnent naissance au phénomène thermoélectrique dans son ensemble. Ces effets sont présents dans tous les métaux et semi-métaux et ne sont pas exclusifs aux matériaux thermoélectriques. Dans des combinaisons sélectionnées de semi-métaux dissemblables (matériaux thermoélectriques), ces effets sont plus prononcés et deviennent importants d'un point de vue applicatif [10].

II.4.6 Les relations de Kelvin

Nous notons qu'il est beaucoup plus simple de mesurer le coefficient de Seebeck que le coefficient de Peltier. Ainsi, bien que les deux quantités entrent dans la théorie de la conversion d'énergie thermoélectrique, il serait préférable si l'une d'elles avait à être spécifiée. En fait, l'une des relations de Kelvin nous permet d'exprimer le coefficient de Peltier en termes du coefficient de Seebeck. L'équation pertinente est :

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (II-18)$$

L'autre relation de Kelvin relie le coefficient de Seebeck et le coefficient de Thomson, ou plutôt la différence entre les coefficients de Thomson des deux conducteurs. Le coefficient de Thomson est défini comme le taux de chauffage par unité de longueur résultant du passage d'un courant unitaire le long d'un conducteur dans lequel il y a un gradient de température unitaire. La relation de Kelvin appropriée est [11] :

$$\beta_A - \beta_B = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (II-19)$$

II.4.7 Le facteur de Mérite ZT

L'efficacité d'un dispositif thermoélectrique est directement liée aux performances des matériaux de type n et p dont il est composé, Les performances de ces matériaux sont incarnées dans un paramètre qui a eu une notion « Paramètre de qualité Thermoélectrique », comme le

physicien russe A. IOOF l'a introduit, connu aujourd'hui comme « Facteur de Mérite », la grandeur adimensionnelle définie par la formule :

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\lambda} \quad (II-20)$$

Avec : λ est la conductivité thermique [W/m. K] [12]

Le numérateur $\sigma\alpha^2$ est également appelé le facteur de puissance thermoélectrique. La majorité des études sur l'amélioration du facteur de mérite ont été dirigées vers la réduction de la conductivité thermique, par exemple, par des super-réseaux ou des nanoparticules intégrées, tout en maintenant le facteur de puissance inchangé. Il y a eu plusieurs autres études sur l'amélioration du facteur de puissance grâce à l'ingénierie des bandes et au filtrage de l'énergie des électrons par des hétérostructures. Les approches pour améliorer le facteur de mérite du matériau sont discutées dans les sections suivantes. En réalité, les propriétés des matériaux constituant ZT sont toutes dépendantes de la température, de sorte que [13] :

$$ZT(\theta) = \frac{\sigma(\theta)\alpha(\theta)^2}{\beta(\theta)} T, \left(T - \frac{\Delta T}{2} \leq 0 \leq T + \frac{\Delta T}{2}\right) \quad (II-21)$$

D'après les deux équations ci dessus, on remarque que les trois coefficients λ, α, σ , jouent le rôle principal dans la définition du facteur de mérite ZT , et ils dépendent les uns des autres.

Pour avoir un matériau qui a un bon facteur de mérite, ce dernier doit répondre aux trois exigences : une conductivité électrique élevée, une basse conductivité thermique et un bon coefficient de Seebeck.

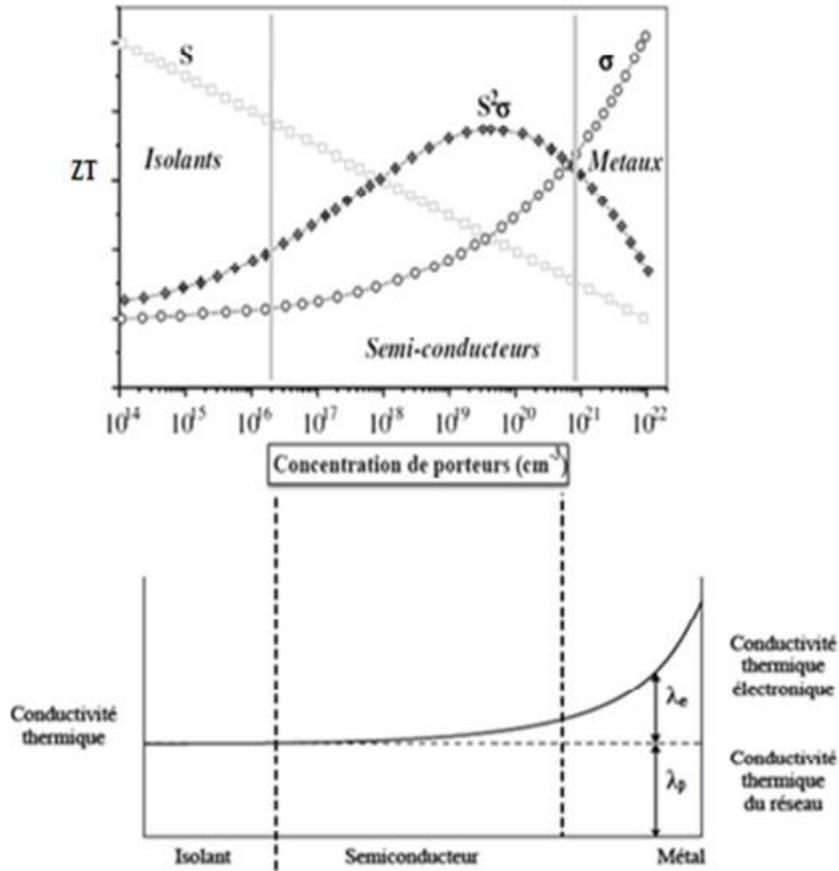


Figure II-3 : Facteur de Mérite des trois catégories des matériaux

Selon la Figure II-3, il apparaît que ni les métaux ni les isolants ne possèdent des facteurs de mérite appropriés, car les métaux, malgré leur excellente conductivité électrique, sont pénalisés par un coefficient Seebeck S très faible et une conductivité thermique λ très élevée.

Quant aux isolants, ils présentent l'avantage d'avoir de faibles conductivités thermiques et de grands coefficients Seebeck. Cependant, ces atouts ne suffisent pas à compenser leurs trop faibles conductivités électriques. Il apparaît donc clairement que seuls les semi-conducteurs sont en mesure d'atteindre de bons facteurs de mérite ZT .

En outre, pour les semi-conducteurs, il est envisageable de réguler la concentration des porteurs de charge en ajustant la quantité de dopage. Les facteurs de mérite les plus élevés sont observés pour des concentrations de porteurs de charge allant de 10^{19} à 10^{21} cm^{-3} , ce qui correspond aux semi-conducteurs fortement dopés [14].

Le tableau II-1 expose les valeurs typiques des grandeurs thermoélectriques des trois catégories des matériaux [15] :

Table II-1 : les valeurs typiques des grandeurs thermoélectriques des trois catégories des matériaux

	Isolants	Semiconducteurs	Métaux
Coefficient de Seebeck [V. K ⁻¹]	1000	200	5
Conductivité électrique [Ω ⁻¹ .m ⁻¹]	10 ⁻¹⁰	10 ⁵	10 ⁸
Conductivité thermique [W/m. K]	0.1 – 1	1 – 100	10 – 100

II.5 Performances et Facteur de Mérite des dispositifs thermoélectriques :

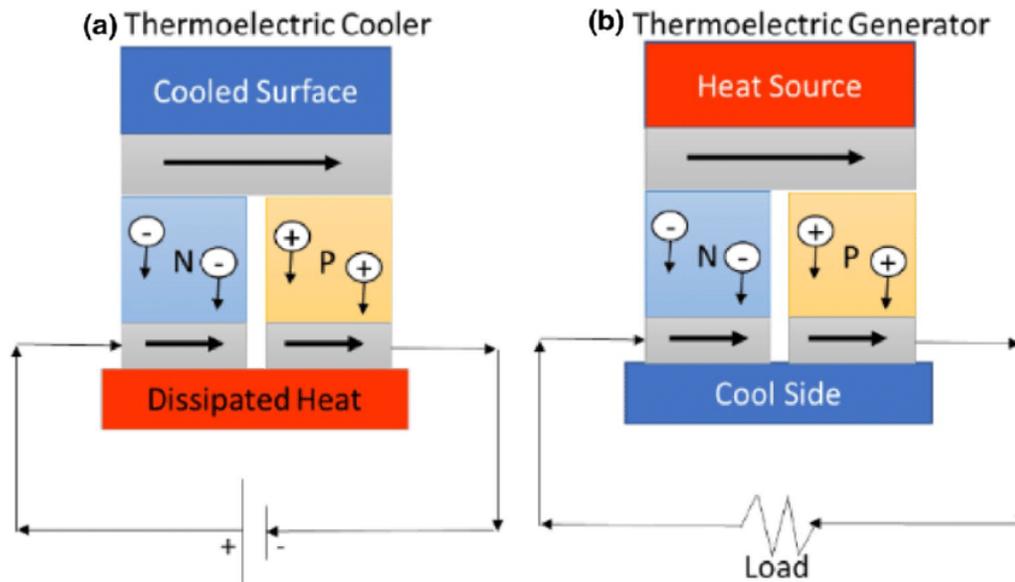


Figure II-4 : Schéma explicative des deux effets (Seebeck et Peltier)

Comme il est mentionné dans le chapitre précédent, l'effet thermoélectrique se décompose en deux axes, le refroidissement (effet Peltier) et les thermo-générateurs (effet Seebeck).

Pour un générateur thermoélectrique, sa performance est évaluée par son rendement « η », qui correspond au rapport entre la puissance électrique P générée par le module et la puissance thermique Q_c cédée par la source chaude.

$$\eta = \frac{P}{Q_c} \quad (II-22)$$

Pour un réfrigérateur thermoélectrique, sa performance est donnée par le coefficient de performance « COP » définie par le rapport de la puissance thermique Q sur la puissance électrique P_f fournie au module.

$$COP = \frac{Q}{P_f} \quad (II-23)$$

Il est possible de reformuler les deux équations correspondant pour un couple thermoélectrique respectivement à l'efficacité η et au coefficient de performance COP, en fonction du cycle de Carnot et du facteur de mérite ZT . L'équation II. 21 se réécrit de la manière suivante :

$$\eta = \frac{P}{Q_c} = \eta_c \frac{\sqrt{1 - ZT_{pn}T_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{pn}T_m} + \frac{T_f}{T_c}} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \frac{\sqrt{1 + ZT_{pn}T_m} - 1}{\sqrt{1 - ZT_{pn}T_m} + \frac{T_f}{T_c}} \quad (II-24)$$

Le facteur de mérite du couple p-n défini par :

$$ZT_{pn} = \frac{(\alpha_n - \alpha_p)^2}{(\sqrt{\rho_p \lambda_p} + \sqrt{\rho_n \lambda_n})^2} \quad (II-25)$$

Tandis que l'Équation II. 24 peut s'établir sous la forme suivante :

$$COP = \frac{Q}{P_f} = COP_c \frac{\sqrt{1 + ZT_{pn}T_m} - \frac{T_c}{T_f}}{\sqrt{1 + ZT_{pn}T_m} + 1} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \frac{\sqrt{1 + ZT_{pn}T_m} - \frac{T_c}{T_f}}{\sqrt{1 + ZT_{pn}T_m} - 1} \quad (II-26)$$

De ces nouvelles expressions, plusieurs informations sont disponibles :

- L'efficacité maximale d'un générateur thermoélectrique (Equation 5-3) ne peut être supérieure à celle d'un cycle de Carnot. En revanche, elle sera d'autant plus grande que la température moyenne T_m , l'écart entre T_f et T_c et le facteur de mérite Z_{pn} le sont aussi.
- Le COP maximal d'un module thermoélectrique (Équation II. 25) ne peut être supérieur à celui du cycle de Carnot. Il dépend de la température des différentes faces, de la température moyenne T_m et du facteur de mérite ZT_{pn} .

A noter que ce soit pour η ou COP, ces derniers seront plus importants pour un facteur de mérite ZT_{pn} grand or d'après l'Equation 4-13, ce facteur ne dépend que de propriétés liées aux

matériaux : un bon matériau pour la génération thermoélectrique est donc également un bon matériau pour la réfrigération [16].

II.6 Conclusion

Pour obtenir un Facteur de Mérite ZT élevé, il est crucial d'avoir un coefficient de Seebeck élevé, une conductivité électrique élevée et une conductivité thermique faible. Ces caractéristiques permettent de maximiser la conversion de chaleur en électricité.

Les trois grandeurs clés en thermoélectricité – le coefficient de Seebeck (S), la conductivité électrique (σ) et la conductivité thermique (λ) – sont interdépendantes et dépendent de la concentration des porteurs de charges dans le matériau.

Selon H. J. Goldsmith, les semi-conducteurs sont les matériaux thermoélectriques les plus performants et adaptés. Cela est dû à leur grande mobilité des porteurs de charges, leur grande masse effective et leur faible conductivité thermique [17].

Références

- [1] – Çengel, Yunus A, 'INTRODUCTION TO THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFERT' (2nd edition), 2008
- [2] – Mahaffy, Joseph M, 'Partial Differential Equations Heat Conduction – in one dimensional rod', 2023
- [3] – Heaney, Michael B, 'Electrical Conductivity and Resistivity', 2003, disponible en version numérique :
[https://www.researchgate.net/publication/309188334_Electrical_Conductivity_and_Resistivity]
- [4] – Çengel, Yunus A, 'INTRODUCTION TO THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFERT' (2nd edition), 2008
- [5] – Jonas, Roux-Briffaud, 'La Thermoélectricité', 2008
- [6] – Lundstrom, Mark, 'Thermoelectric Effects : (electronic) heat flow', 2011, FALL
- [7] – Likharev, Konstantin K, 'Thermoelectric effects', Stony Brook University, disponible en version numérique :
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Essential_Graduate_Physics_-_Statistical_Mechanics_%28Likharev%29/06:_Elements_of_Kinetics/6.05:_Thermoelectric_effects]
- [8] – Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, 'Peltier effect', Mars. 2024, disponible en version numérique : [<https://www.britannica.com/science/Peltier-effect>]
- [9] – Likharev, Konstantin K, 'Thermoelectric effects', Stony Brook University, disponible en version numérique :
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Essential_Graduate_Physics_-_Statistical_Mechanics_%28Likharev%29/06:_Elements_of_Kinetics/6.05:_Thermoelectric_effects]
- [10] – Kumar, Ranjan, 'Thermoelectricity and Advanced Thermoelectric Materials', 2021

- [11] – Goldsmid, H. Julian, ‘Introduction to Thermoelectricity’, 2009
- [12] – Iris Nandhakumar, Neil M White, Stephen Beeby, Laurie Peter, Susan M Kauzlarich, Anthony Powell, Robert Freer, Douglas Paul, Alex Cuenat, Gao Min, Richard Stobart, Kevin Simpson, Andy Naylor, ‘Thermoelectric Materials and Devices’, 2017
- [13] – Ali Shakouri, Kazuaki Yazawa, Je-Hyeong Bahk, ‘Thermoelectric Energy Conversion Devices and Systems’, 2021
- [14] – IBTISSEM SIFI, ‘Étude et Modélisation d’un Générateur Thermoélectrique’, 2013
- [15] – Bell, L, ‘Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems’, 2008
- [16] – Romain Bude, ‘Synthèses et caractérisations de matériaux thermoélectriques nanostructurés’, 2018, disponible en version numérique : [<https://theses.hal.science/tel-01816180v1/document>]
- [17] – GOLDSMID, H. J, ‘Electronic Refrigeration’, 1986, Pion

Chapitre III

MODELE MATHEMATIQUE ET SIMULATION D'UN GENERATEUR THERMOELECTRIQUE

Chapitre III : MODELE MATHEMATIQUE ET SIMULATION D'UN GENERATEUR THERMOELECTRIQUE

III.1 Introduction

La discrétisation des équations aux dérivées partielles a pour objectif de transformer le problème continu en une forme discrète, facilitant ainsi son traitement à l'aide de techniques numériques telles que les méthodes des éléments finis, des différences finies et des volumes finis. Parmi ces techniques, la méthode des éléments finis est largement privilégiée pour la simulation numérique des problèmes solides, tels que la thermoélectricité.

III.2 Méthodes numériques

Pour accomplir la démarche des études de la thermoélectricité, nous avons retenu l'ensemble des outils du modèle thermal-Electric ANSYS 2023R2 pour cette tâche. Le choix a été fait sur la base des solutions que ANSYS Mechanical thermal-Electric fournit.

Vu l'importance croissante de la thermoélectricité dans la recherche et le développement, l'analyse thermoélectrique a été améliorée dans ANSYS 9.0 pour intégrer les effets thermoélectriques (effet Seebeck, Peltier et Thomson).

III.3 La méthode des éléments finis

La technique des éléments finis discrétise l'espace à l'aide d'éléments géométriques simples (triangles ou quadrangles en général). Comme elle permet de modéliser des géométries très complexes, elle est totalement préférée à la méthode des volumes finis et différences finis dans les problèmes solides. Ensuite, la forme forte des équations est remplacée par la forme faible dans laquelle les inconnues sont approximées par une combinaison linéaire de fonctions de base dont le support est un élément.

Dans la méthode des éléments finis. Les variables inconnues sont calculées par une combinaison linéaire de fonction. L'approche éléments finis se décompose en deux étapes :

- Approximation nodale des fonctions inconnues par sous-domaines (fonctions D'interpolation).
- Utilisation de la méthode des résidus pondérés qui permet de construire une formulation Intégrale à partir des équations aux dérivées partielles (la méthode de Galerkin est la plus fréquemment utilisée). C'est une méthode conservative sur un domaine.

III.4 Equations gouvernant la thermoélectricité

Dans une analyse thermoélectrique, l'équation du flux de chaleur s'écrit :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = \dot{q} \quad (III-1)$$

et la continuité de la charge électrique s'exprime :

$$\nabla \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) = 0 \quad (III-2)$$

sont couplées par l'ensemble des équations constitutives thermoélectriques :

$$q = [\Pi] J - [\lambda] \nabla T \quad (III-3)$$

$$J = [\sigma] (E - [\alpha] \nabla T) \quad (III-4)$$

et l'équation constitutive d'un milieu diélectrique :

$$D = [\epsilon] E \quad (III-5)$$

ou :

- T est la température absolue [K]
- \dot{q} est la densité de flux de chaleur [Wm^{-3}]
- q est vecteur de flux de chaleur [Wm^{-2}]
- J est vecteur de densité de courant électrique [Am^{-2}]
- E est vecteur de champs d'intensité électrique [Vm^{-1}]
- D est vecteur de densité de flux électrique [Cm^{-2}]
- $[\lambda]$ est la matrice de conductivité thermique [$Wm^{-1} K^{-1}$]
- $[\sigma]$ est la matrice de conductivité électrique [Sm^{-1}]
- $[\alpha]$ est la matrice de coefficient de Seebeck [VK^{-1}]
- $[\Pi] = T[\alpha]$ est la matrice de coefficient de Peltier [V]
- $[\epsilon]$ est la matrice de permittivité diélectrique [Fm^{-1}]

En l'absence de champs magnétiques variant dans le temps, le champ électrique E est irrotationnel ($\nabla E = 0$), et peut être dérivé d'un potentiel scalaire électrique ϕ :

$$E = -\nabla \Phi \quad (III-6)$$

La substitution des équations (3)-(6) dans les équations (1)-(2) produit un système d'équations couplées de la thermoélectricité :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla([\Pi]J) - \nabla([\lambda]\nabla T) = \dot{q} \quad (III-7)$$

$$\nabla([\epsilon]\nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t}) + \nabla([\sigma][\alpha]\nabla T) + \nabla([\sigma]\nabla \Phi) = 0 \quad (III-8)$$

où la densité de flux de chaleur \dot{q} dans l' (Eq III. 7) comprend la puissance électrique JE dépensée par le chauffage par effet de Joule et le travail contre le champ Seebeck $[\alpha]\nabla T$.

Il convient de noter que le courant de déplacement $\frac{\partial D}{\partial t}$ associé aux effets capacitifs a été inclus dans le système d'équations par souci d'exhaustivité, même s'il ne joue pas un rôle significatif dans les applications thermoélectriques, à moins que des processus transitoires rapides ne soient pris en compte.

III.5 Formulation par élément finis

Le système d'équations thermoélectriques à éléments finis peut être obtenu en appliquant la procédure Galerkin FEM aux équations couplées dérivées dans la section précédente. Cette technique consiste à approximer la température T et le potentiel scalaire électrique ϕ sur un élément fini comme suit :

$$T = NT_e \quad (III-9)$$

$$\Phi = N\Phi_e \quad (III-10)$$

ou :

- N est le vecteur de forme
- T_e est de la température nodale
- Φ_e est le vecteur de potentiel électriques nodaux

En écrivant le système d'équations (7) et (8) sous une forme projective faible, en intégrant les équations projectives par parties et en tenant compte des conditions aux limites de Neumann. Sans autre précision, le système d'équations thermoélectriques par éléments finis qui en résulte est le suivant :

$$\begin{bmatrix} C^{TT} & 0 \\ 0 & C^{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{T}_e \\ \dot{\Phi}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{TT} & 0 \\ K^{\Phi T} & K^{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_e \\ \Phi_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q + Q^p + Q^e \\ I \end{Bmatrix}$$

(III-11)

où les matrices des éléments et les vecteurs de charge sont obtenus par intégration numérique (à l'aide des quadratures de Gauss) sur le volume de l'élément V :

$$K^{TT} = \int_V \nabla N[\lambda] \nabla N dV : \text{matrice de rigidité thermique}$$

$$K^{\Phi\Phi} = \int_V \nabla N[\sigma] \nabla N dV : \text{matrice de rigidité électrique}$$

$$K^{\Phi T} = \int_V \nabla N[\sigma][\alpha] \nabla N dV : \text{matrice de rigidité de Seebeck}$$

$$C^{TT} = \rho \int_V C N N dV : \text{matrice d'amortissement thermique}$$

$$C^{\Phi\Phi} = \int_V \nabla N[\epsilon] \nabla N dV : \text{matrice d'amortissement diélectrique}$$

Q : vecteur des charges de production combinée de chaleur

$$Q^p = \int_V \nabla N[\Pi] J dV : \text{Vecteur de charge thermique Peltier}$$

$$Q^e = \int_V N E J dV : \text{vecteur de charge électrique}$$

I : vecteur de charge de courant électrique

Les charges thermiques (Q) peuvent prendre la forme de température imposée, de débit calorifique ponctuel, de flux de chaleur surfacique, de convection ou de rayonnement, ainsi que de taux de génération de chaleur dans le volume pour des causes autres que la dissipation de puissance électrique (prise en compte dans Q_e).

Les charges électriques (I) peuvent prendre la forme de potentiel électrique imposé et de courant électrique ponctuel. Les composants linéaires de circuits électriques (résistances, condensateurs et sources de tension ou de courant) peuvent être connectés au modèle d'éléments finis pour simuler des charges électriques passives et actives.

La matrice globale est assemblée à partir des équations individuelles des éléments finis, et est non symétrique comme l'Eq III. 11. Étant donné que le vecteur de charge thermique dépend de la solution électrique, l'analyse est non linéaire (à l'état stationnaire ou transitoire) et nécessite au

moins deux itérations pour converger. L'écart de température de zéro à zéro absolu doit être spécifié si la température est en unités autres que les kelvins. La solution fournit les températures (T_e) et les potentiels électriques (ϕ_e) aux nœuds non contraints, ou les réactions sous forme de débit de chaleur et de courant électrique aux nœuds avec température imposée et potentiel électrique respectivement. Le gradient de température et le champ électrique sont calculés comme suit :

$$\nabla T = \nabla N * T_e \quad (III-12)$$

$$E = -\nabla N * \Phi_e \quad (III-13)$$

et ensuite, ces valeurs ont été substituées dans les équations (III. 3) – (III. 5) pour obtenir les valeurs des champs J, q, D et de la densité de génération de chaleur de Joule pour chaque élément.

En résumant le développement mathématique par un tableau qui récapitule toutes les principales équations gouvernant la simulation par éléments finis [1] :

Table III-1 : Les équation gouvernant le modèle mathématique

Equations constitutives thermoélectriques	$q = [\Pi] * J - [\lambda] * \nabla T$
	$J = [\sigma] * (E - [\alpha] * \nabla T)$
Equation constitutive du milieu diélectrique	$D = [\epsilon] * E$
Système d'équations couplées de la thermoélectricité	$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla([\Pi] * J) - \nabla([\lambda] \nabla T) = \dot{q}$
	$\nabla([\epsilon] \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t}) + \nabla([\sigma][\alpha] \nabla T) + \nabla([\sigma] \nabla \phi) = 0$
Système d'équations thermoélectriques par élément finis	$\begin{bmatrix} C^{TT} & 0 \\ 0 & C^{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{T}_e \\ \dot{\phi}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{TT} & 0 \\ K^{\phi T} & K^{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_e \\ \phi_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ I \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q^p \\ Q^e \end{Bmatrix}$
Equations complétant le système de solution	$\nabla T = \nabla N * T_e$
	$E = -\nabla N * \phi_e$

III.6 Processus de la simulation numérique

Une simulation numérique en générale suit trois étapes principales, à savoir : la préparation, la résolution et le traitement des résultats.

III.6.1 Pré-traitement (Pre-Processing) :

Préparation des données du problème (géométrie du domaine de calcul, génération du maillage de discrétisation, définition des phénomènes physiques et chimiques du processus, détermination des propriétés du fluide, spécification des conditions aux limites...etc.).

III.6.2 La résolution :

La résolution du problème par méthode numérique (dans notre cas la méthode indiquée ci-dessus).

III.6.3 Post-traitement (Post-Processing) :

Visualisation du domaine de calcul et du maillage, Extraction des valeurs du voltage, ampérage, effet de joule, et le développement de température...etc.

III.7 Présentation du solveur ANSYS Thermal-Electric :

Le solveur ANSYS Thermal-Electric est un outil puissant pour simuler et analyser le comportement thermique et électrique de systèmes complexes. Cette présentation fournira un aperçu détaillé du solveur, mettant en avant ses caractéristiques clés, ses applications et ses avantages.

Le solveur intègre l'analyse thermique et électrique, permettant la simulation de problèmes multiphysiques complexes. Cela inclut l'analyse du transfert de chaleur, de l'écoulement des fluides et des champs électromagnétiques, il est considéré comme un sous-solveur de ANSYS Mechanical pour l'analyse structurelle, fournissant une analyse détaillée des contraintes et des déformations pour l'intégrité structurelle.

Le solveur est utilisé pour concevoir et analyser des machines électriques, y compris des moteurs, des générateurs et des transformateurs. Il aide à optimiser leurs performances, leur efficacité et leur gestion thermique.

Il est aussi utilisé pour simuler le transfert de chaleur, l'écoulement des fluides et le rayonnement dans des systèmes complexes, permettant aux ingénieurs d'optimiser la gestion thermique et de réduire les risques de surchauffe.

Parlant de ces avantages, Le solveur ANSYS Thermal-Electric permet aux ingénieurs d'optimiser les conceptions pour les performances thermiques et électriques, réduisant le besoin de prototypes physiques et améliorant l'efficacité de la conception.

La réduction du temps de développement en simulant des systèmes complexes, les ingénieurs peuvent rapidement identifier et résoudre les problèmes thermiques et électriques, réduisant ainsi le temps et les coûts de développement.

Le solveur peut faire simulations thermiques de machines électriques dans la solution ANSYS, mettant l'accent sur la simulation des champs électromagnétiques et des pertes de chaleur qui y sont associées, et l'intégration de l'analyse thermique avec l'analyse de l'intégrité structurelle.

Une présentation sur la simulation de générateurs thermiques-électriques, mettant en avant l'intégration de l'analyse thermique et électrique pour une évaluation complète des performances, ce qui est notre problématique [2][3].

III.8 Pré-traitement

III.8.1 Géométrie

A l'aide du logiciel de conception assisté par ordinateur « SolidWorks » on a conçu la géométrie du module générateur thermoélectrique.

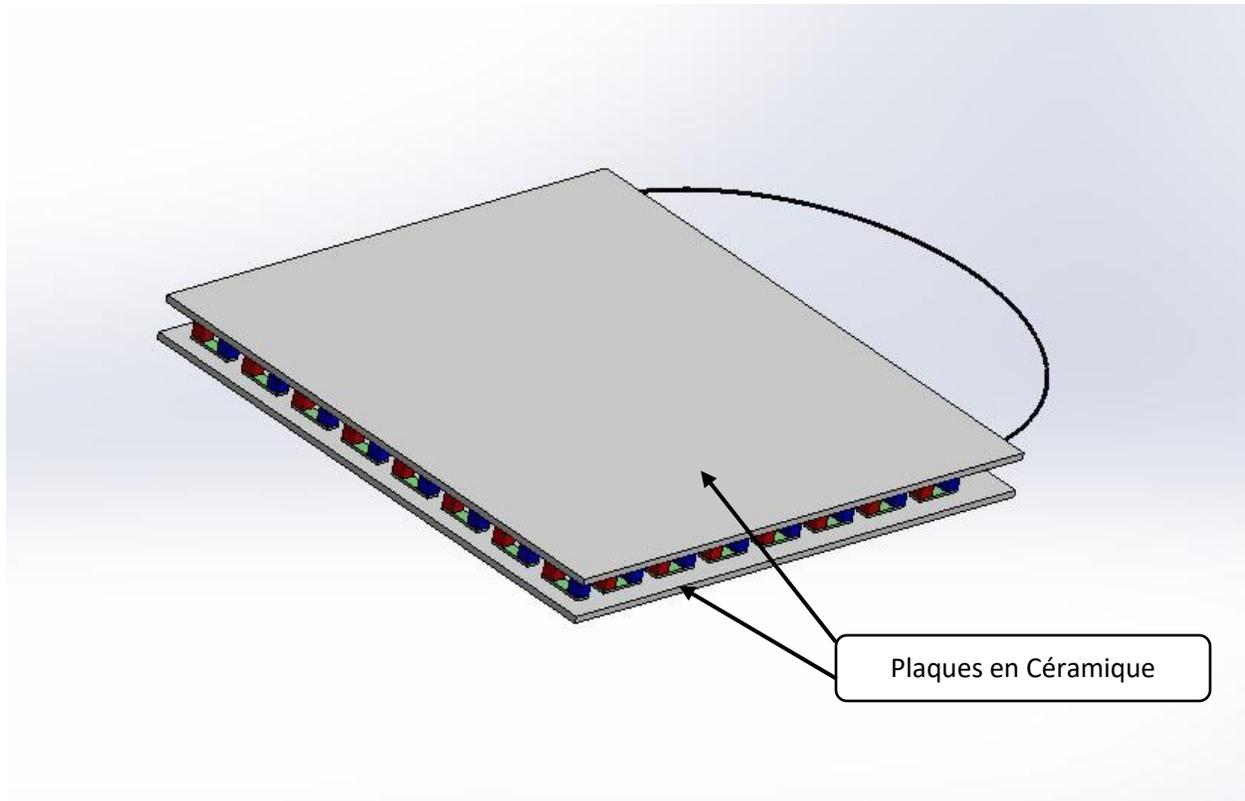


Figure III-1 : Géométrie du module à étudier par le logiciel SolidWorks

L'utilisation de ce logiciel est due à la facilité d'utilisation des outils de conception, en plus, sa capacité de manipuler facilement avec les géométries complexes.

Les composants constitutifs du générateur thermoélectrique sont :

- Les pastilles semi-conductrices : sont les éléments maîtres et les composants essentiels du module, ils se décomposent en deux éléments, les pastilles semi-conductrices négatives, qui sont fabriquées de matériau de base, généralement en Tellure de Bismuth (Bi_2Te_3), et les pastilles semi-conductrices positives qui sont aussi en Tellure de Bismuth en ajoutant un autre matériau par dopage comme le Plomb (Pb) pour créer la différence de coefficient de Seebeck, la conductivité thermique et la résistivité électrique et à l'aide d'un gradient de température on obtient une différence de potentiel électrique.
- Plaques en céramique : Les pastilles semi-conductrices sont prises en sandwich entre des plaques en céramique, qui assurent un support mécanique et une isolation électrique. Les plaques en céramique sont généralement faites de matériaux comme l'alumine ou le carbure de silicium.

- Motif conducteur : Un motif conducteur en métal est plaqué sur la surface intérieure de chaque plaque en céramique, permettant aux pastilles semi-conductrices d'être connectées électriquement en série.

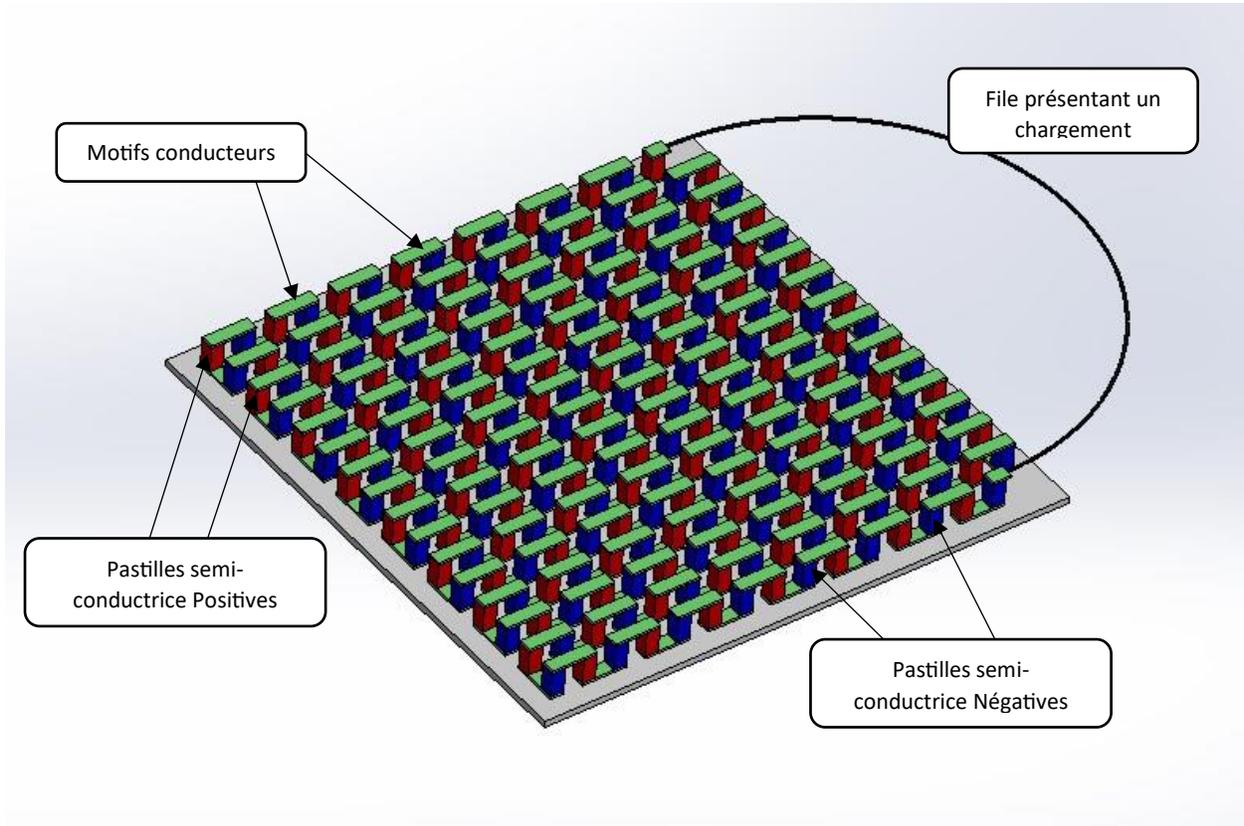


Figure III-2 : Structure interne du module de thermo-générateur

La désignation d'un module thermo-générateur qui peut être sous le nom module « Peltier » est :

en prend un exemple : TEC1-12710

TEC : Thermo-Electric Cooler (Refroidisseur thermoélectrique)

1 : un stage de pastilles semi-conductrices

127 : le nombre de couple de pastilles semi-conductrices

10 : le courant électrique en Ampère du module

Un couple de pastilles semi-conductrices est une composition d'une pastille positive, une pastille négative et deux motifs connecteurs en dessus et en dessous.

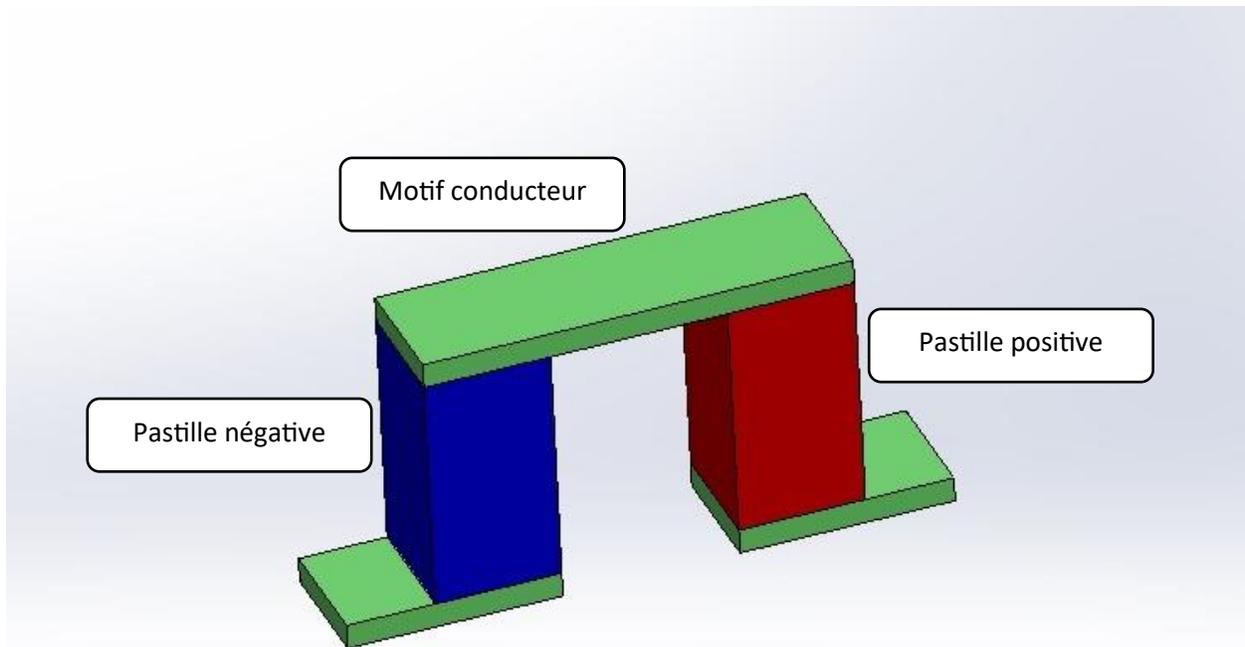


Figure III-3 : représente un couple de pastilles semi-conductrices

III.8.2 ANSYS Thermal-Electric

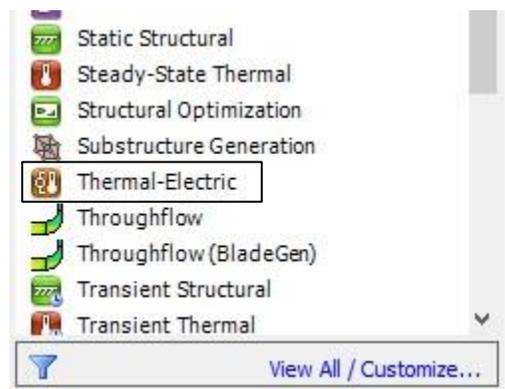


Figure III-4 : Le solveur ANSYS Thermal-Electric

Préparant le solveur par en le glissant dans l'espace de travail.

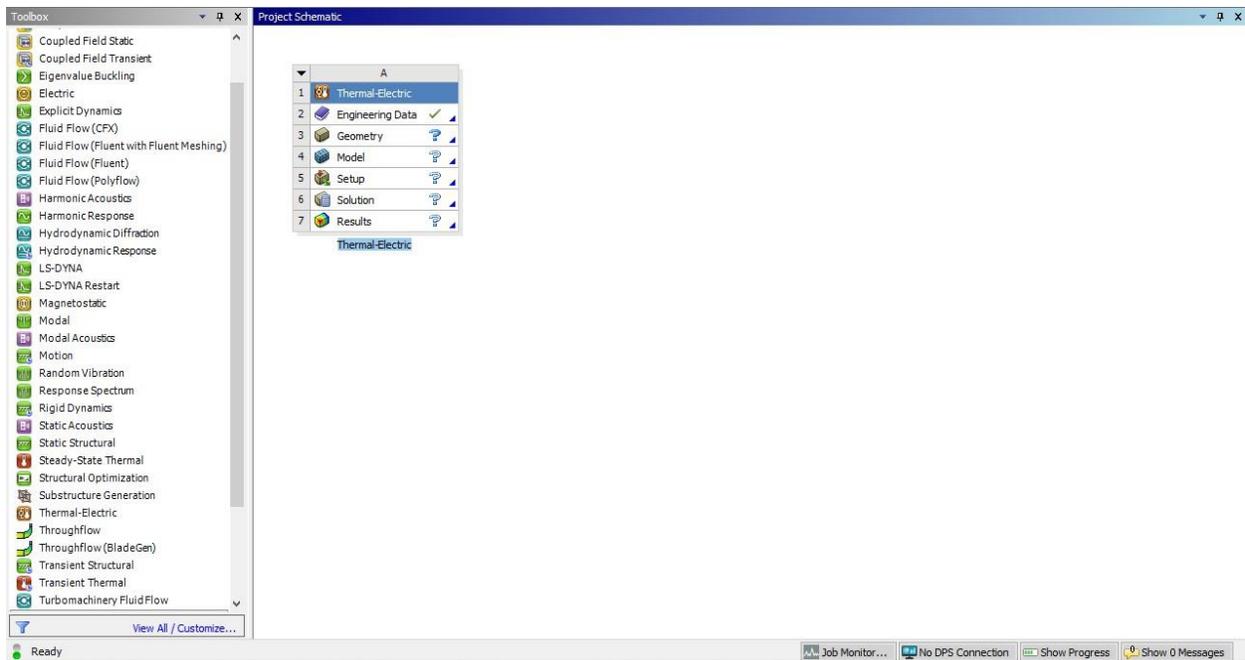


Figure III-5 : composition du solveur ANSYS Thermal-Electric

On importe la géométrie du module du software SolidWorks après l'avoir mis en format de transformation «.iges ».

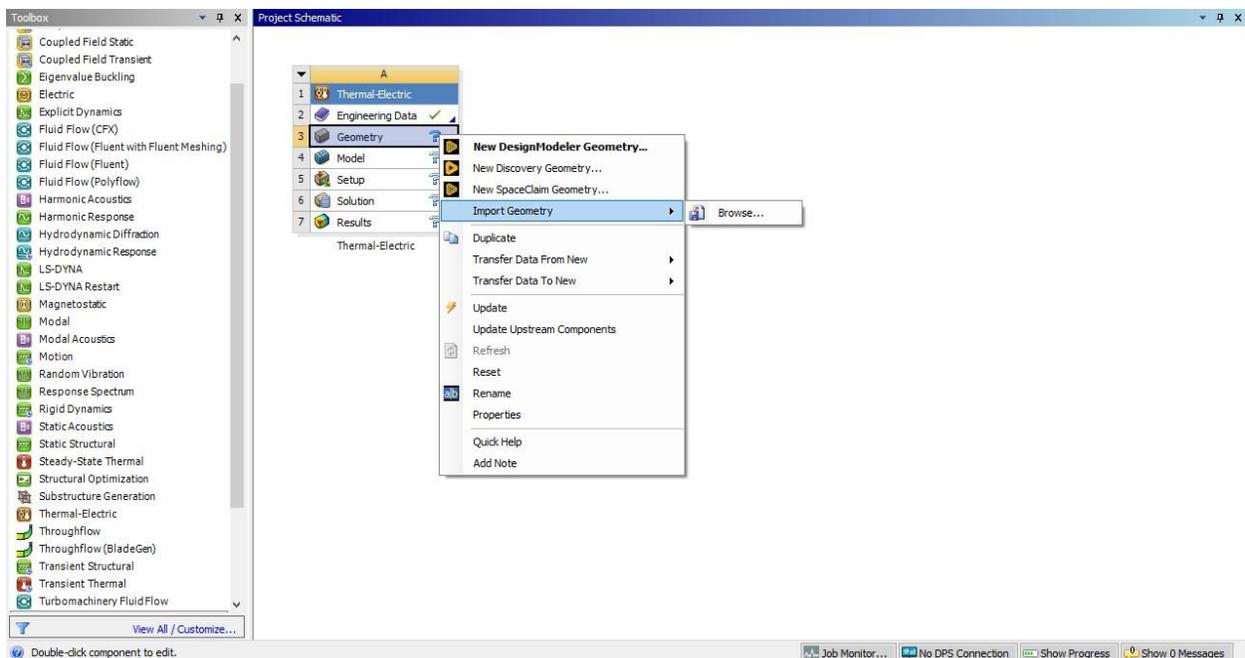


Figure III-6 : Importation de la géométrie

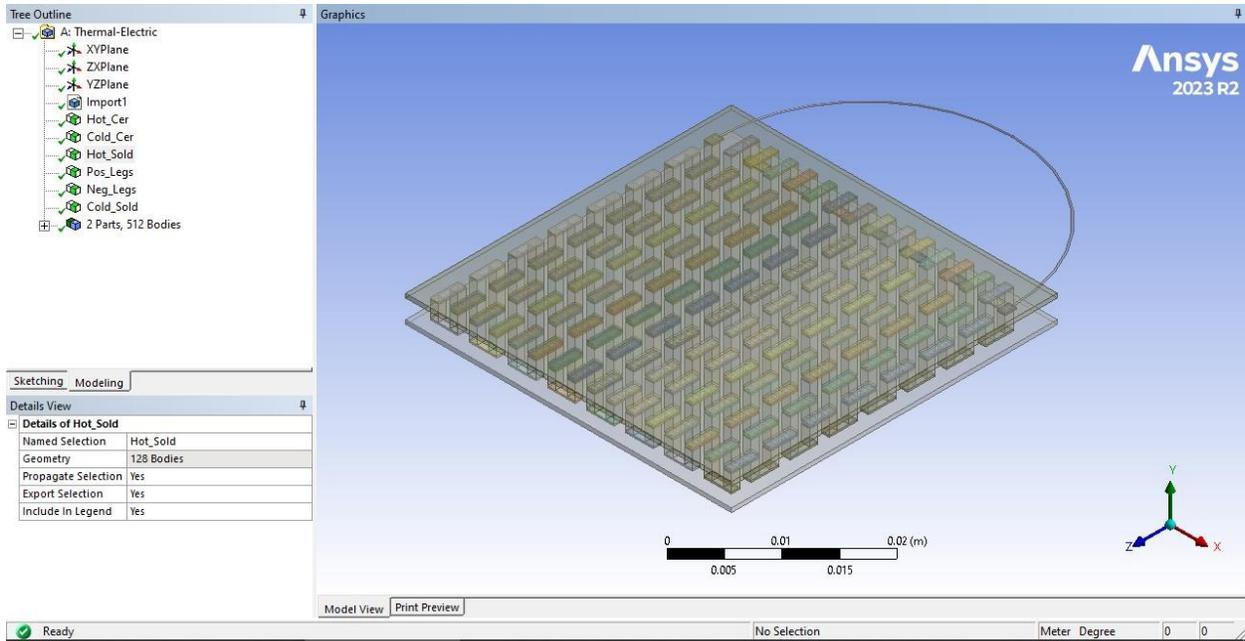


Figure III-7 : Géométrie du module dans le programme Design Modeler

Afin de préparer le module pour la simulation et la résolution numérique, il faut faire une discrétisation du domaine à étudier ce qu'on appelle le maillage.

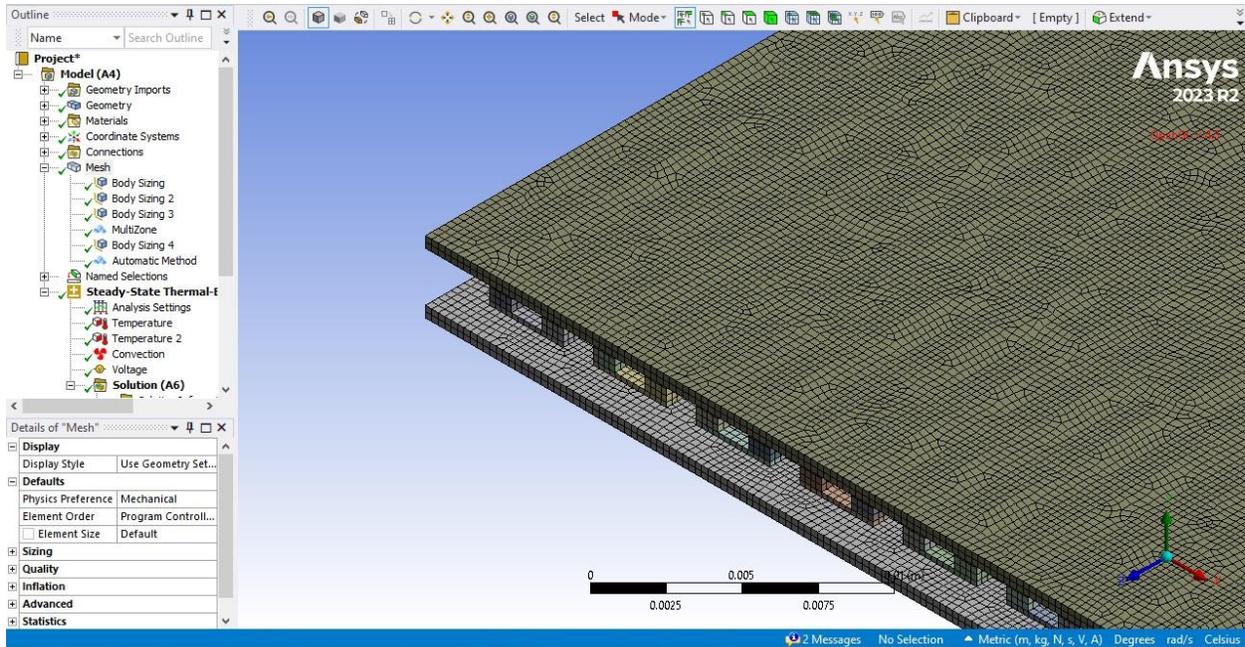


Figure III-8 : Discrétisation du domaine à étudier

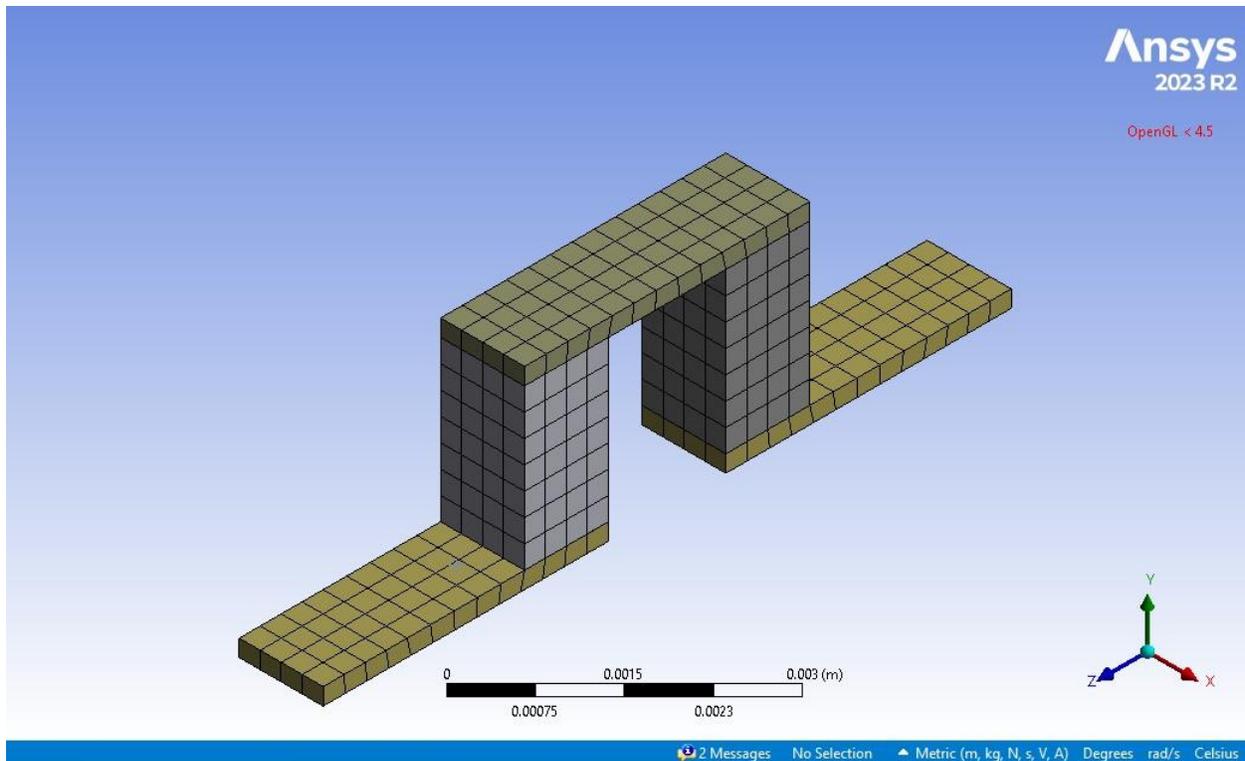


Figure III-9 : Discrétisation d'un couple de pastilles

Ce qui concerne la qualité de maillage, on va comparer et discuter dans le prochain chapitre (Sensibilité de Maillage).

Pour finir la préparation du problème pour la résolution numérique il faut terminer par la déclaration des conditions aux limites, propriété des matériaux utilisés (on va les distinguer dans le chapitre prochain).

Température imposée des deux surfaces de Céramique :

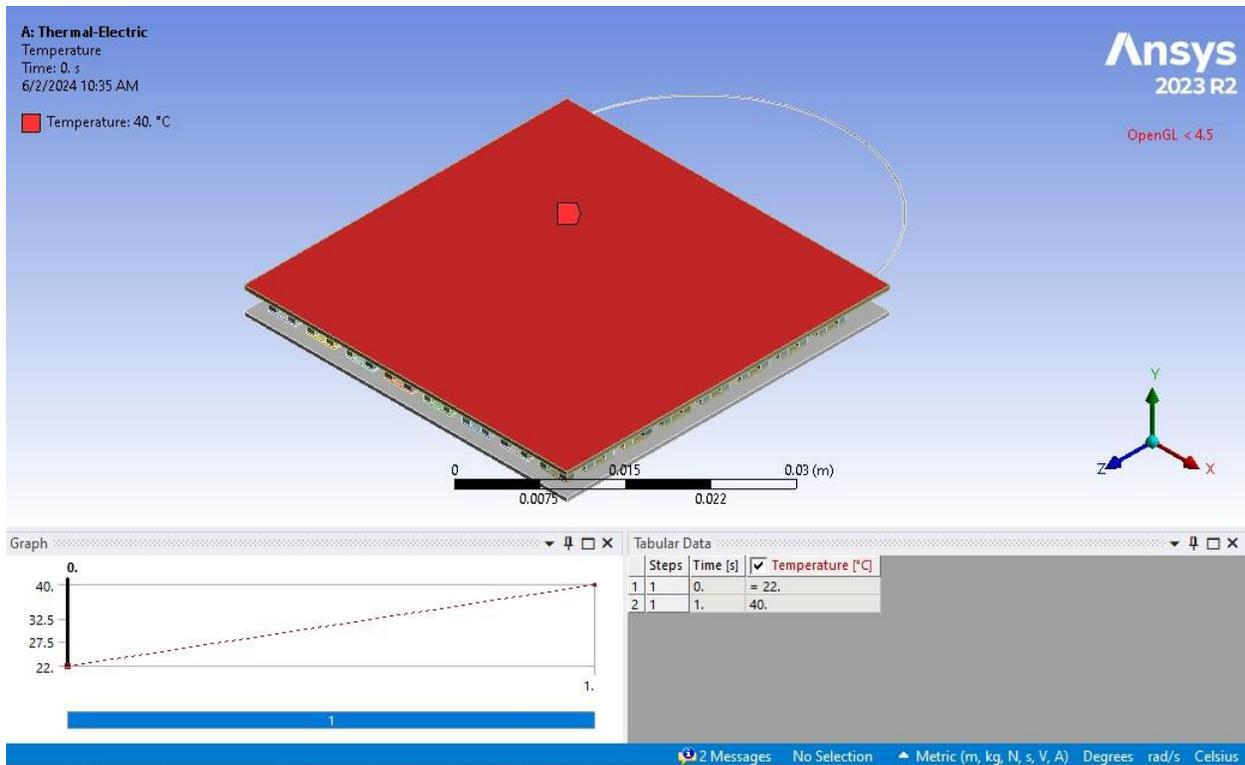


Figure III-10 : Température imposée pour la face chaude

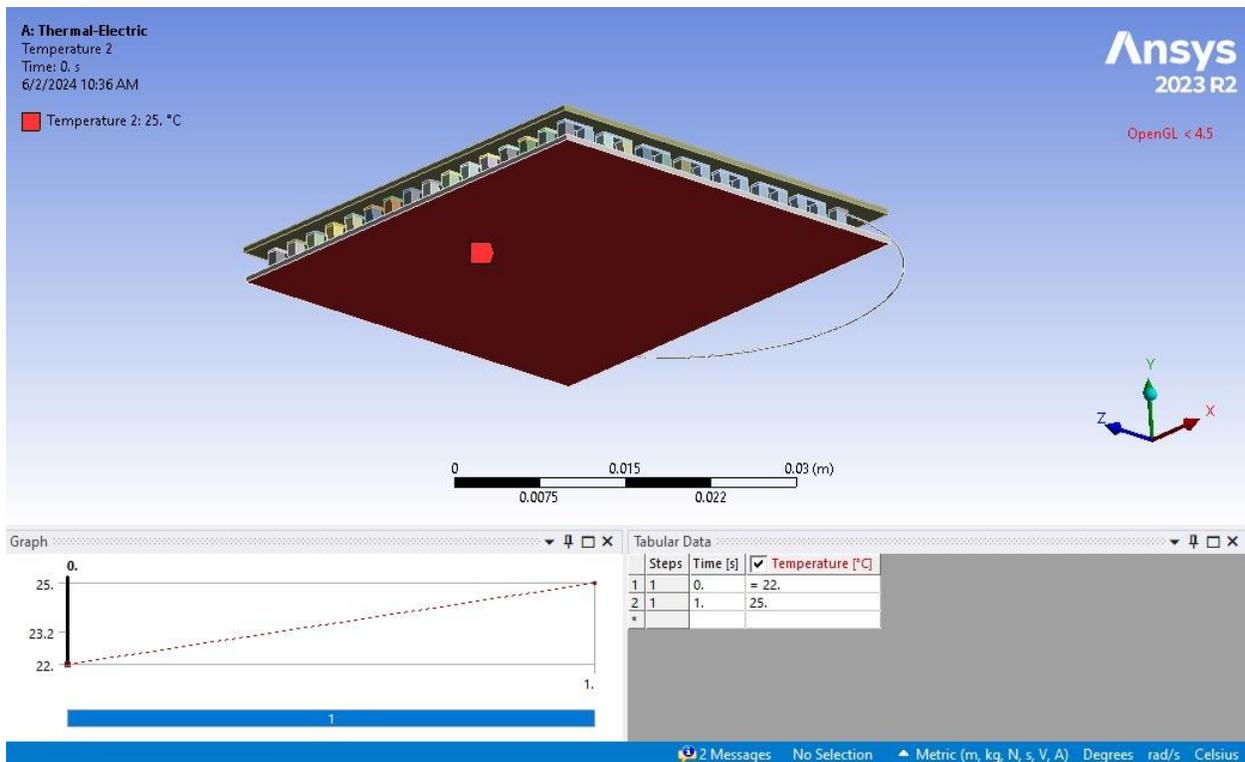


Figure III-11 : Température imposée pour la face froide

Pour que la résolution converge, on a utilisé un fil comme un dispositif pour consommer l'énergie électrique produite de la part du module, avec une résistivité électrique légèrement importante, à ne pas oublier d'ajouter une convection avec le milieu extérieur pour que la résolution ne diverge pas.

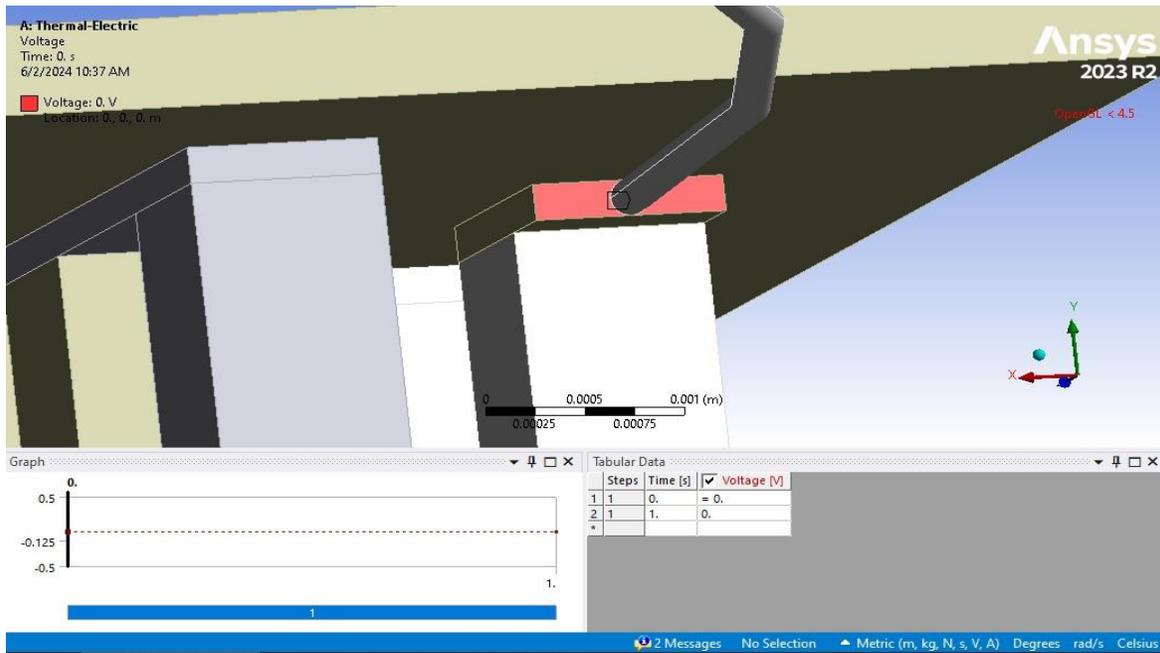


Figure III-12 : potentiel électrique nul d'un côté pour créer la différence

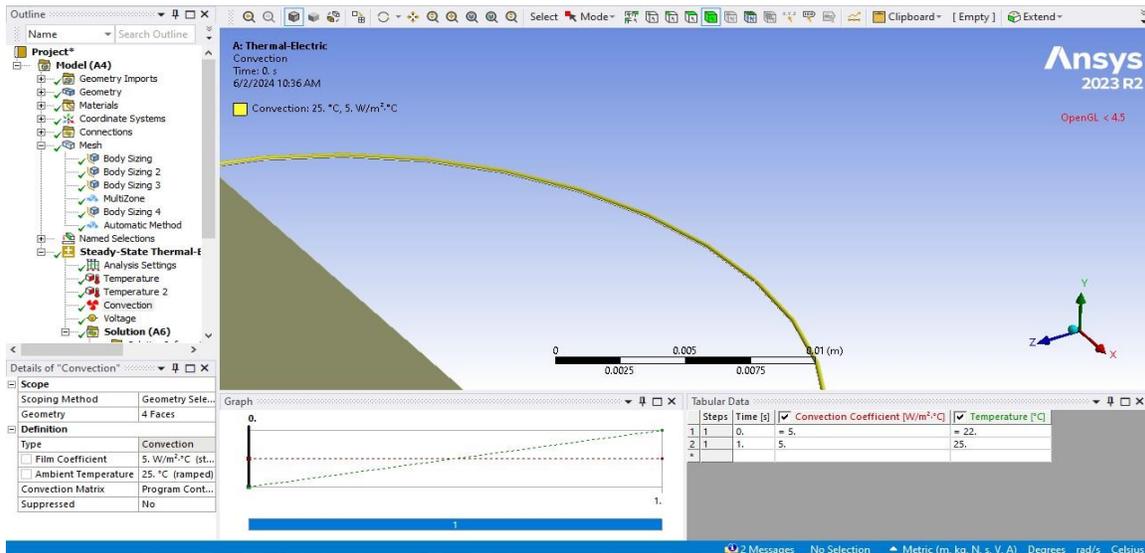


Figure III-13 : Convection du fil avec le milieu extérieur

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté le code de calcul utilisé dans ANSYS Thermal-Electric, la méthode des éléments finis, les étapes suivies pour résoudre les équations algébriques posées par le problème, ainsi que les systèmes ajoutés pour la résolution du système. Nous avons également examiné les différents types de conditions aux limites proposés par ce code de calcul.

Les résultats de la résolution effectuée par le logiciel ANSYS Thermal-Electric sont présentés dans le chapitre suivant.

Références

[1] – Elena E. Antonova and David C. Looman, ‘Finite Elements for Thermoelectric Device Analysis in ANSYS’, ANSYS Inc.

[2] – ELEATON (linkedin), ‘Thermal Analysis using ANSYS : Industrial Use Cases and Examples’, Juin. 2023, URL : [<https://www.linkedin.com/pulse/thermal-analysis-using-ansys-industrial-use-cases-examples-eleation/>]

[3] – ANSYS Release 9.0 Documentation (2004)

Chapitre IV

RESULTAT NUMERIQUE ET DISCUSSION

Chapitre IV : RESULTAT NUMERIQUE ET DISCUSSION

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons discuter des résultats obtenus lors de notre simulation du module thermoélectrique. Notre objectif est d'explorer plusieurs paramètres clés, tels que la température, le gradient thermique et les propriétés matérielles qui influencent les performances du module. Nous terminerons par une comparaison entre les différents matériaux et les variations de température.

IV.2 Sensibilité de maillage et validation de résultats

La sensibilité du maillage est un aspect crucial des simulations utilisant la méthode des éléments finis (MEF), car elle a un impact direct sur la précision et la fiabilité des résultats.

L'étude de sensibilité du maillage est essentielle dans les simulations par MEF, car elle permet d'évaluer l'effet du raffinement du maillage sur la précision de la solution. L'objectif est de déterminer si les résultats sont indépendants du maillage, ce qui signifie qu'un raffinement supplémentaire n'affecte pas de manière significative la solution. Cela est crucial, car cela garantit que les résultats sont fiables et peuvent être validés.

Pour étudier la sensibilité du maillage, une variable est sélectionnée, telle que la différence de potentiel, et sa variation est étudiée pour différents nombres d'éléments.

Voici un tableau résumant les résultats :

Table IV-1 : Résultat de potentiel électrique à différente nombre d'élément

T (°C)	Diff de Potentiel (V)			
	78000 éléments	143000 éléments	220000 éléments	335000 éléments
40	0.357226819	0.356873274	0.356711149	0.35648188
45	0.478574574	0.478104264	0.477886468	0.477577358
50	0.600985348	0.600395262	0.600118876	0.599732101
55	0.724722505	0.723998547	0.72367382	0.723202586
60	0.850424588	0.849596202	0.849211554	0.848668635
65	0.9770661	0.97610265	0.975658476	0.975028038
70	1.104190111	1.103041172	1.102550626	1.101826072
75	1.232522964	1.231326461	1.230709672	1.229957342

Table IV-2 : Comparaison avec 0.335mil en %

T (°C)	Erreur relative avec 335000 en%		
	78000 éléments	143000 éléments	22000 éléments
40	0.208969626	0.109793491	0.064314424
45	0.208807116	0.110328735	0.064724527
50	0.208967847	0.110576252	0.064491219
55	0.210164962	0.110060506	0.06515938
60	0.206906767	0.109296779	0.063973082
65	0.20902595	0.11021346	0.064658482
70	0.214556497	0.11028059	0.065759386
75	0.208594416	0.111314323	0.061167148

En nous basant sur les résultats obtenus, nous avons comparé le maillage le plus fin, composé de 335 000 éléments, et nous avons constaté une différence négligeable en termes de tension. Cette observation peut s'expliquer par deux raisons :

1. La puissance et la précision de la méthode des éléments finis, ainsi qu'une bonne prise en compte des conditions aux limites.
2. La simplicité de la géométrie du modèle (la majorité des pièces étant des parallélogrammes rectangles), permettant ainsi d'optimiser l'exactitude des résultats.

Pour poursuivre la simulation, nous avons choisi un maillage avec un nombre d'éléments (143000 éléments) en prenant en compte le temps de calcul et la qualité des résultats.

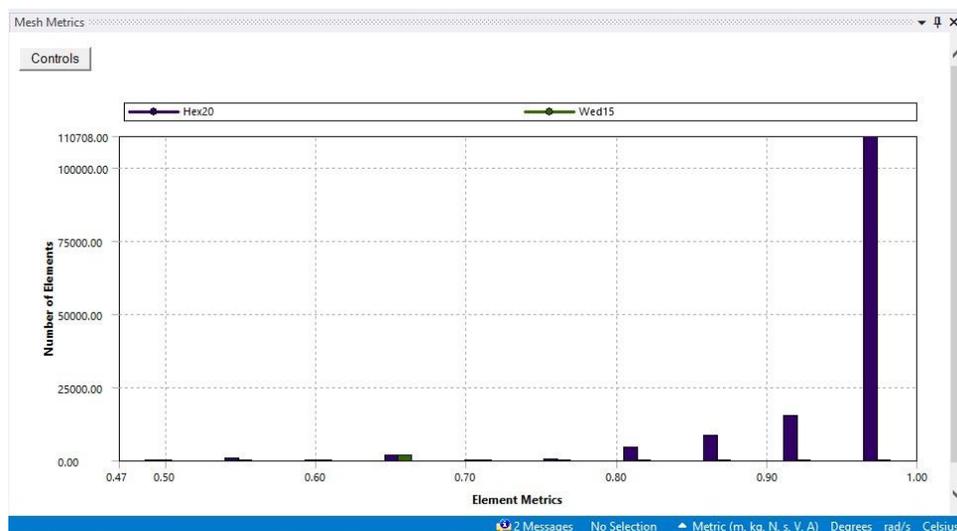


Figure IV-1 : Qualité des éléments

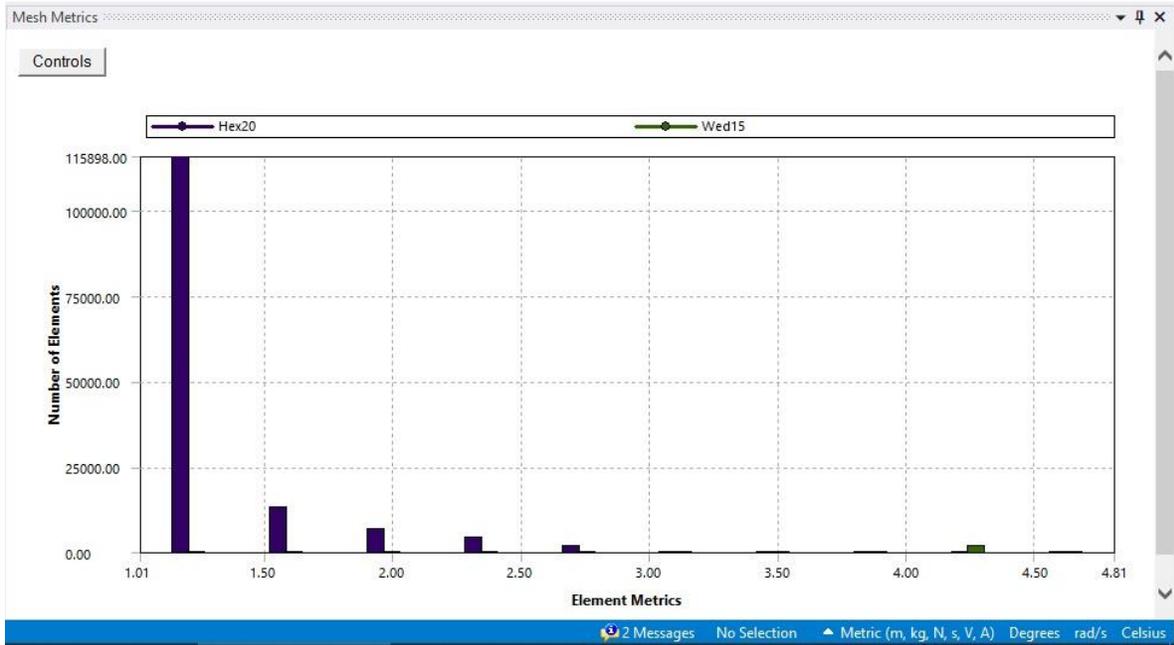


Figure IV-2 : Aspect Ratio

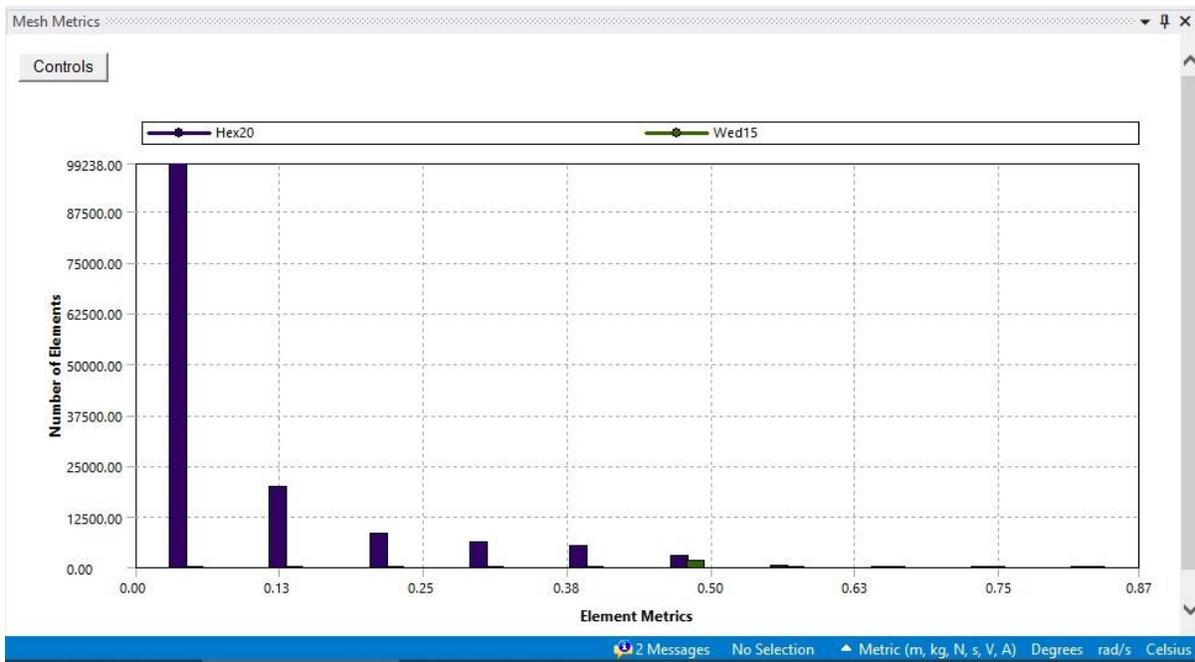


Figure IV-3 : Skewness

IV.3 Evaluation des résultats

IV.3.1 Discussion générale sur le phénomène

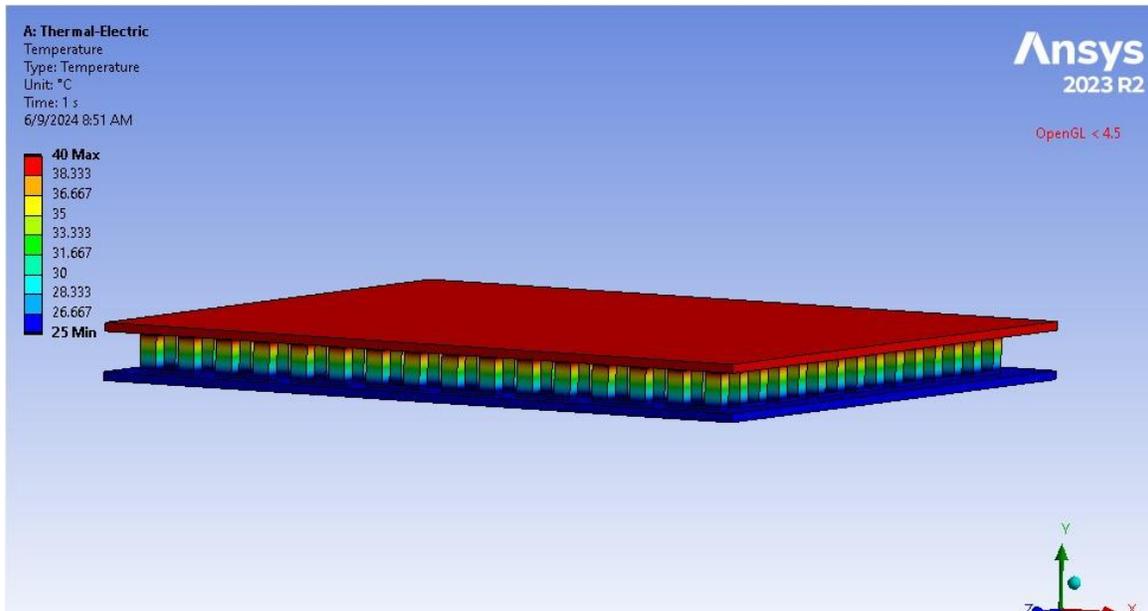


Figure IV-4 : Champs de température sur le module ($T_c = 40^\circ\text{C}$, $T_f = 25^\circ\text{C}$, N° d'éléments = 143000)

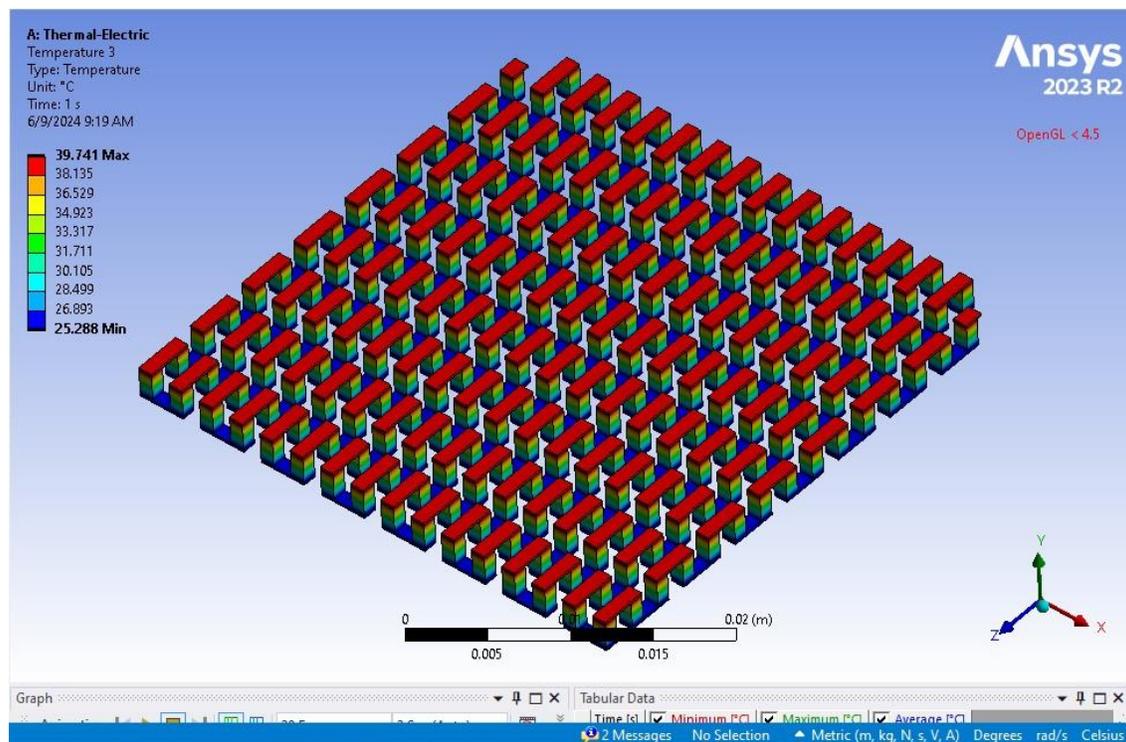


Figure IV-5 : Champs de température sur la structure interne ($T_c = 40^\circ\text{C}$, $T_f = 25^\circ\text{C}$, N° d'éléments = 143000)

On observe que la température varie de manière linéaire dans le module, même pour la structure interne. En raison de cette linéarité, le champ de température se propage également de manière linéaire dans le module. Pour maximiser la propagation du champ de température de la face chaude vers la face froide, la face froide est maintenue à une température constante.

Le profil du champ de température linéaire est obtenu grâce à la distribution homogène dans la plaque chaude en céramique. De plus, les motifs conducteurs (soudure) n'ont pas d'impact sur la distribution de la température en raison de leur bonne conductivité thermique et de leur épaisseur pratiquement négligeable.

Le gain thermique (différence de potentiel et puissance) obtenu est utilisé par une application externe. Dans notre cas, nous avons utilisé un fil résistif. La multiplication de la tension et du courant électrique donne la puissance électrique.

La distribution du champ de potentiel électrique varie de manière linéaire, comme le montre la figure ci-dessous. Ce potentiel est dû à l'effet du coefficient de Seebeck. Ainsi, les motifs conducteurs n'ont pas d'impact sur la variation de la tension et du courant électrique en raison de leur résistivité électrique pratiquement négligeable.

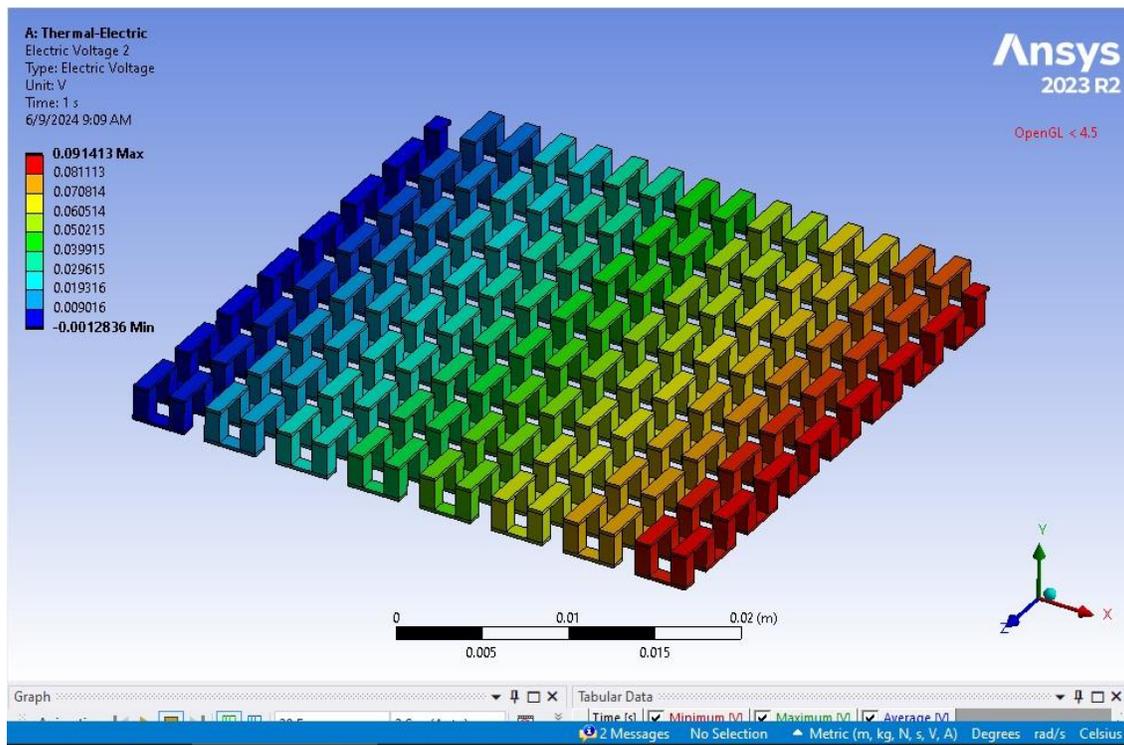


Figure IV-6 : potentiel électrique le long de module ($T_c = 40^\circ\text{C}$, $T_f = 25^\circ\text{C}$, N° d'éléments = 143000)

IV.4 Influence de matériau et de température

Afin de mieux comprendre le phénomène thermoélectrique et le fonctionnement des générateurs thermoélectriques, une comparaison a été réalisée entre trois matériaux de base identiques (Tellure de Bismuth), mais avec des niveaux de dopage croissants.

IV.4.1 Le Tellure de Bismuth dopé par le Sn et Se

IV.4.1.1 Paramètres utilisés

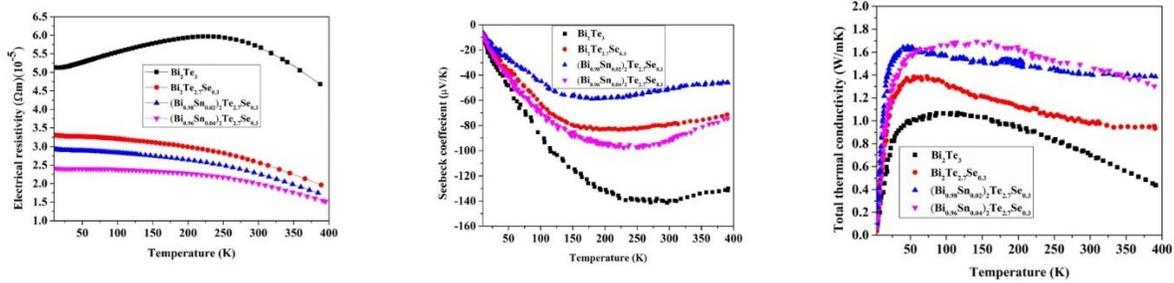


Figure IV-7 : Paramètres du Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se

IV.4.1.2 Résultats obtenus

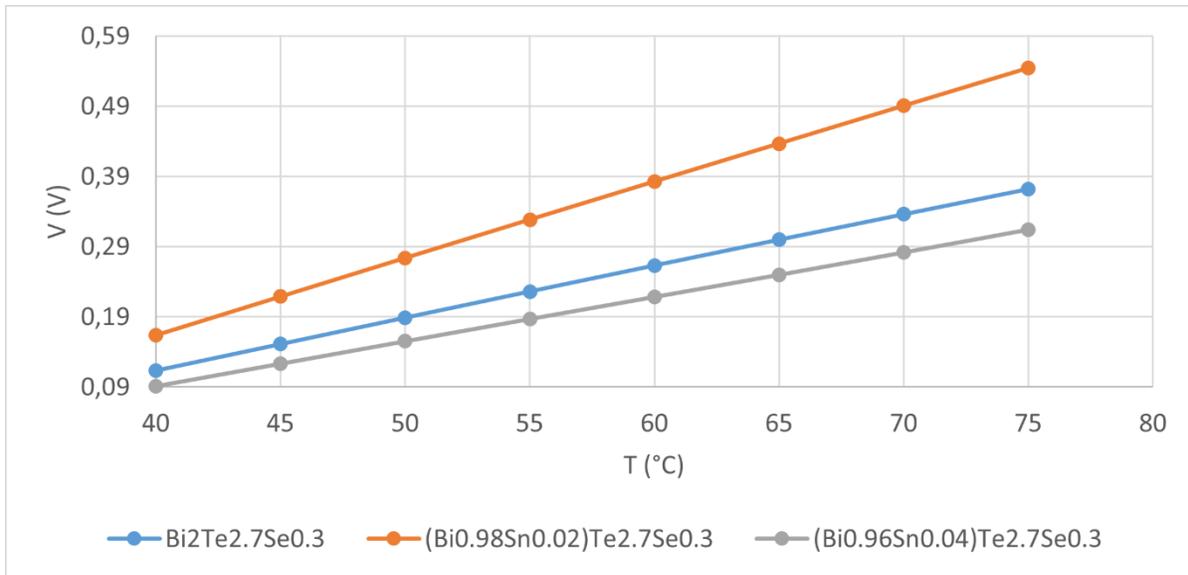


Figure IV-8 : Potentiel électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se pour différentes quantités

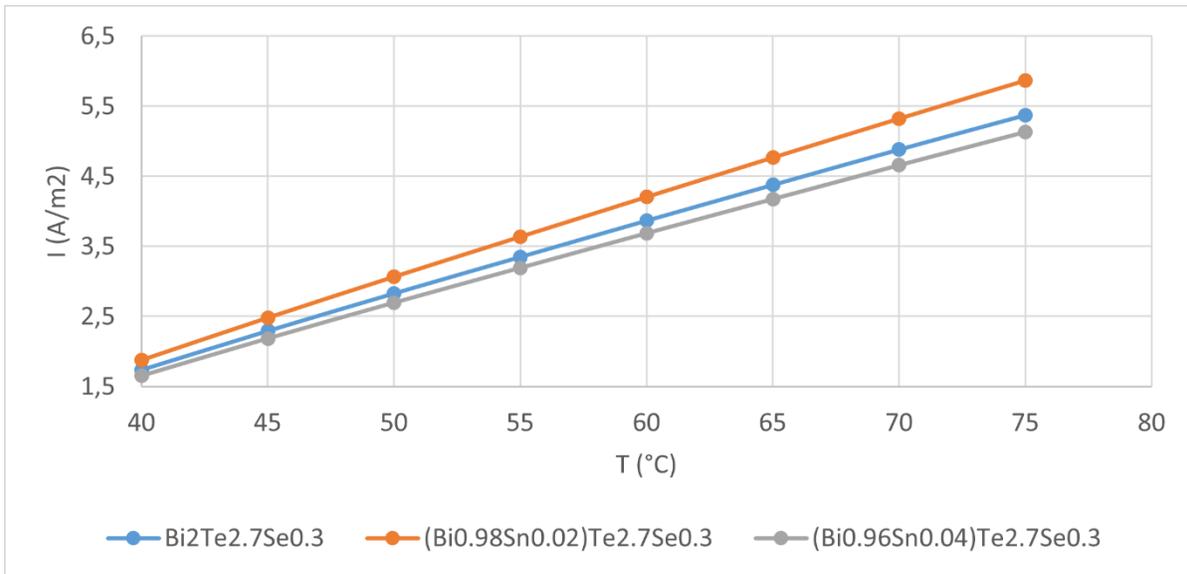


Figure IV-9 : Courant électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se pour différentes quantités

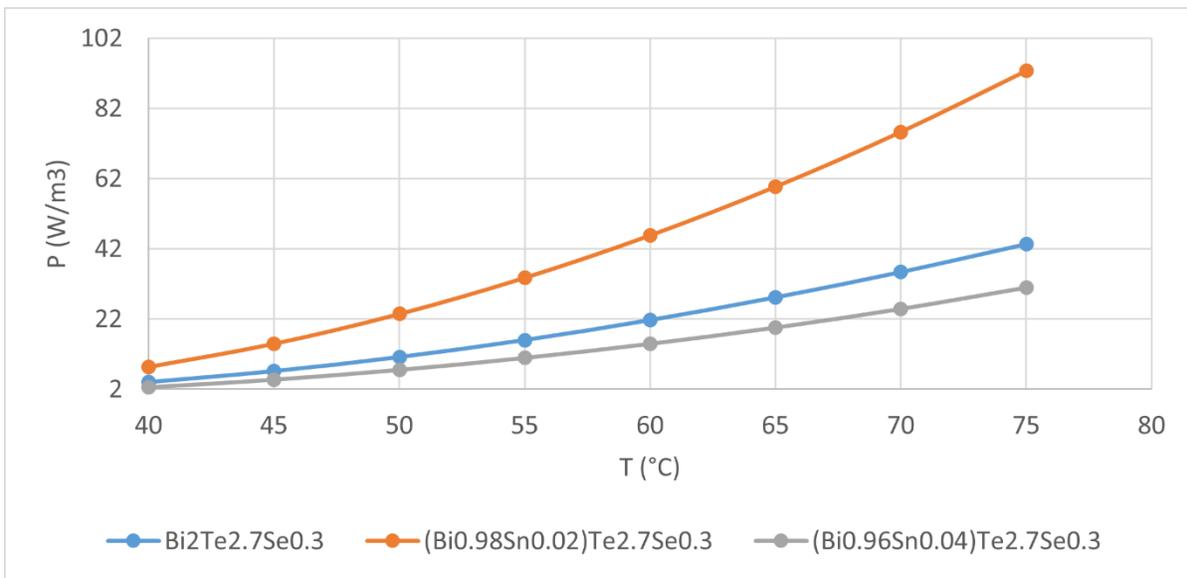


Figure IV-10 : Puissance électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Sn et Se pour différentes quantités

D'après les résultats obtenus, il est évident que les variables Voltage, Courant et Puissance électrique sont toutes dépendantes de la température.

Il est intéressant de noter qu'il existe une relation proportionnelle entre la variation de température et ces trois variables. En effet, lorsque la température augmente, on observe une croissance dans les valeurs de ces trois propriétés.

De plus, il est important de souligner que l'amélioration des performances ne dépend pas de la quantité de dopage. Prenons par exemple le dopage de Sn et Se, où nous constatons que le dopage le plus élevé conduit à de moins bons résultats.

IV.4.2 Le Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT

IV.4.2.1 Paramètres utilisés

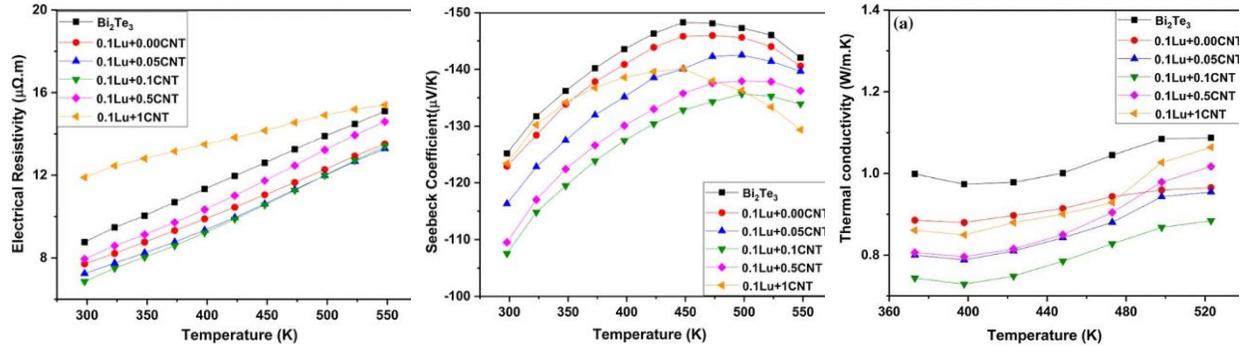


Figure IV-11 : Paramètres de Tellure de Bismuth dopé par le Lu et le CNT

IV.4.2.2 Résultats obtenus

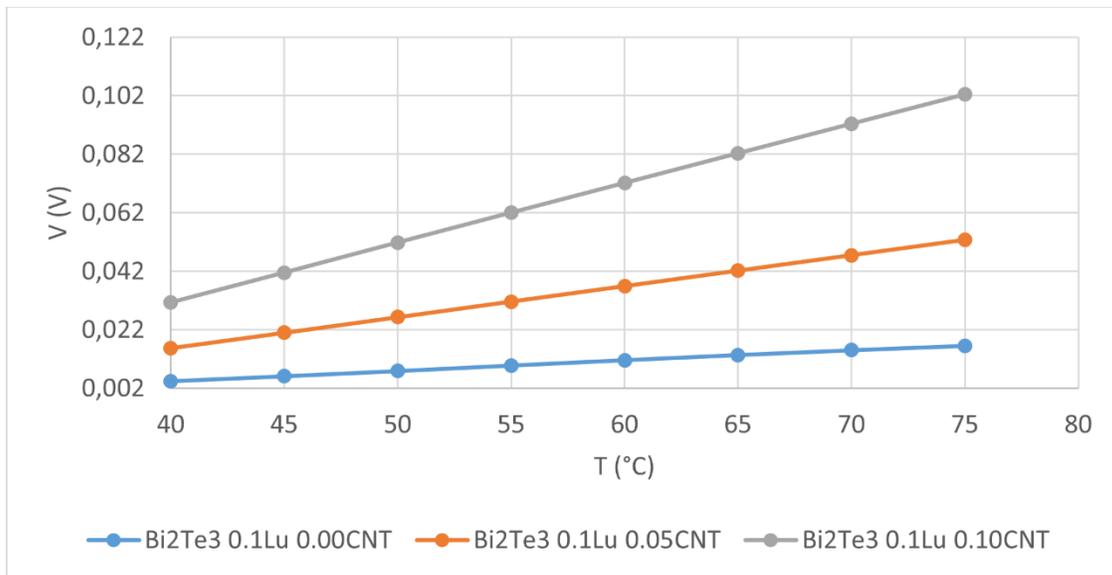


Figure IV-12 : Potentiel électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT pour différente quantités

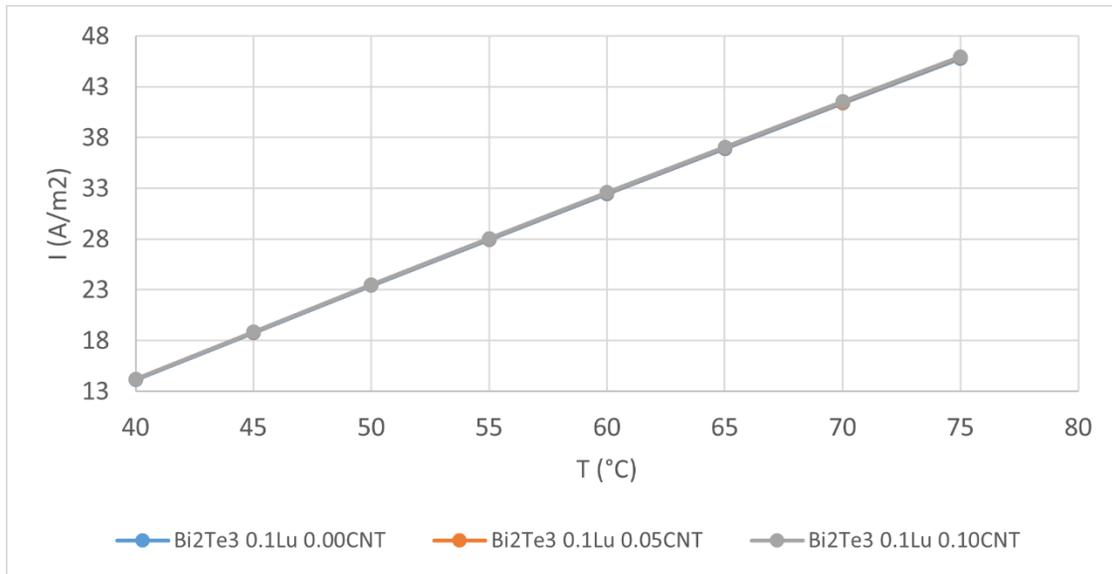


Figure IV-13 : Courant électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT pour différentes quantités

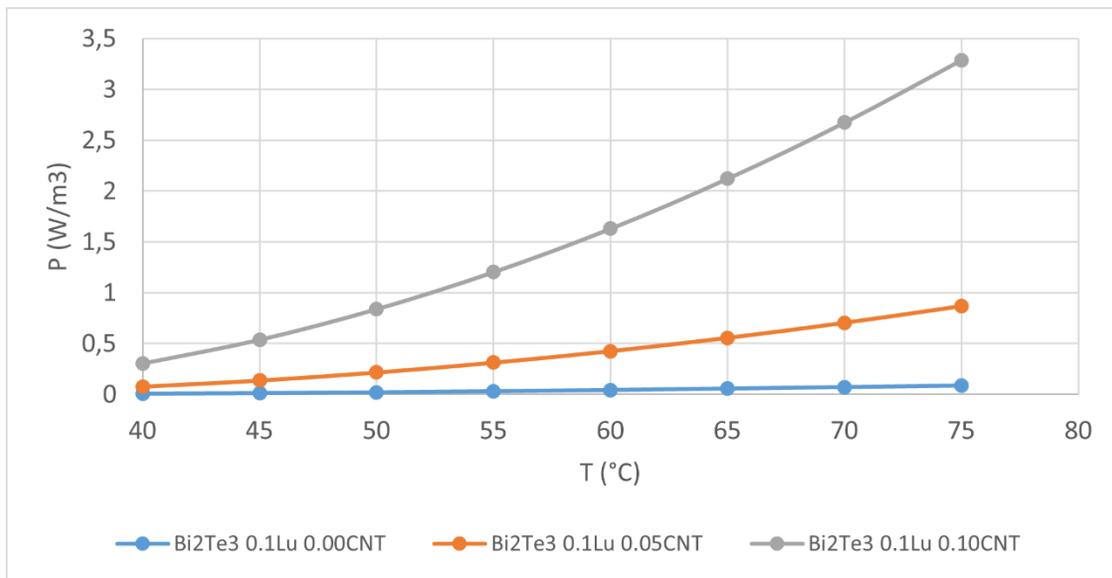


Figure IV-14 : Puissance électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par Lu et CNT pour différentes quantités

Les figures IV.12, IV.13 et IV.14 représentent respectivement la variation du potentiel électrique, du courant et de la puissance de sortie pour trois types de matériaux du TEG (le $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{0.1Lu0.00CNT}$, le $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{0.1Lu0.05CNT}$ et le $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{0.1Lu0.10CNT}$). On remarque que plus la température augmente, la variable considérée augmente. D'autre part, on remarque que le ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{0.1Lu0.10CNT}$) donne les meilleurs résultats de sortie en termes de puissance, de courant ou de potentiel électrique, et cela grâce au pourcentage important du CNT dans ce type de matériaux.

IV.4.3 Le Tellure de Bismuth dopé par le Plomb

IV.4.3.1 Paramètres utilisés

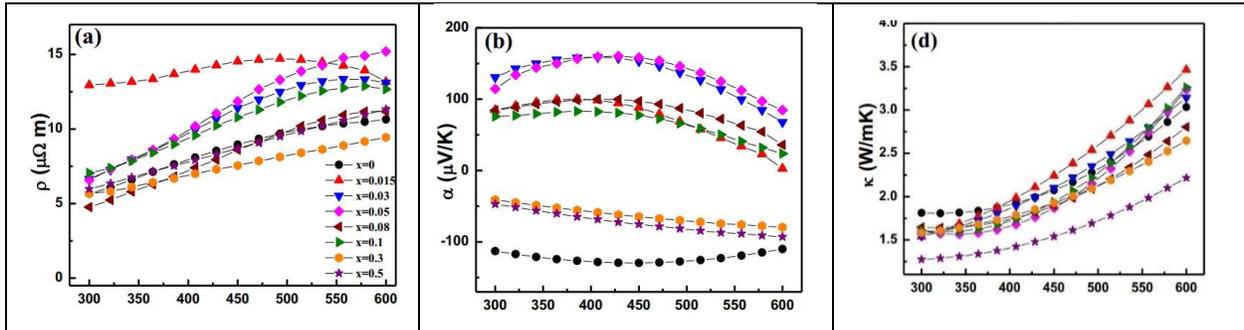


Figure IV-15 : Paramètre de Tellure de Bismuth dopé par le Plomb

IV.4.3.2 Résultats obtenus

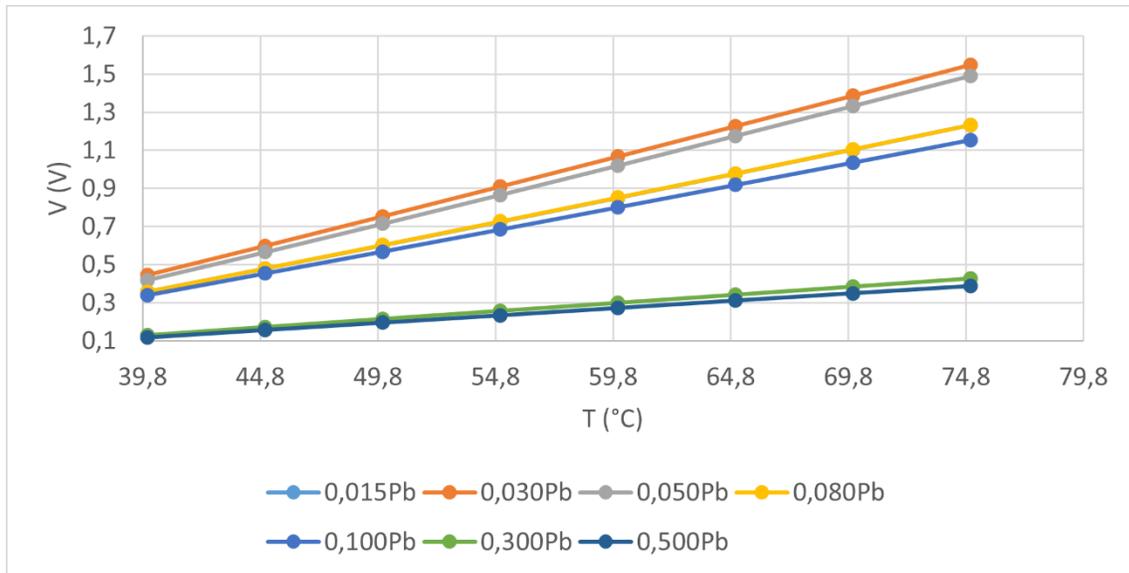


Figure IV-16 : Potentiel électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par le Plomb pour différente quantités

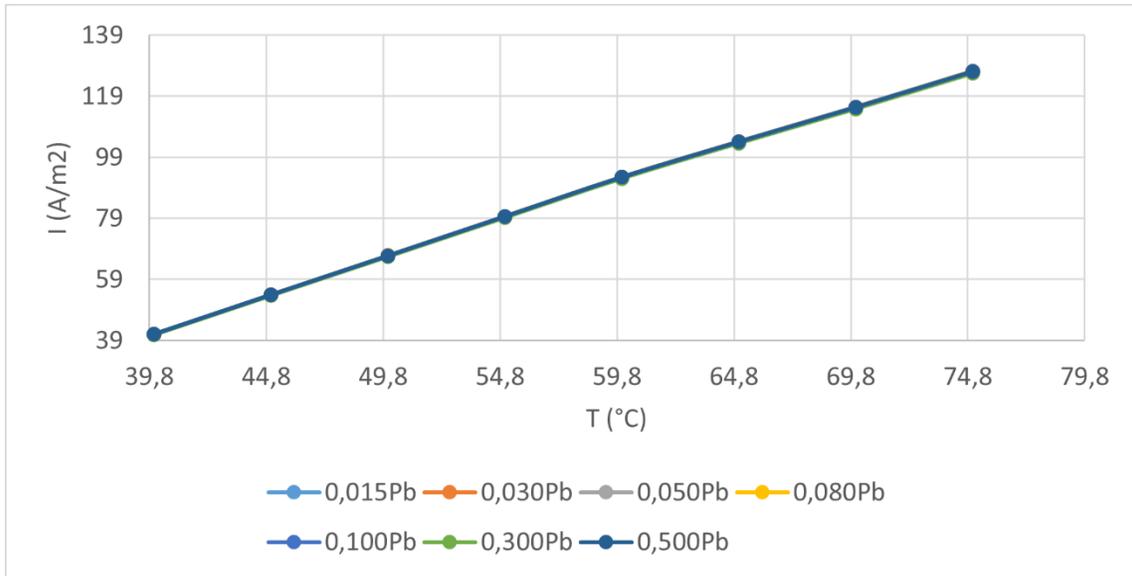


Figure IV-17 : Courant électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par le Plomb pour différentes quantités

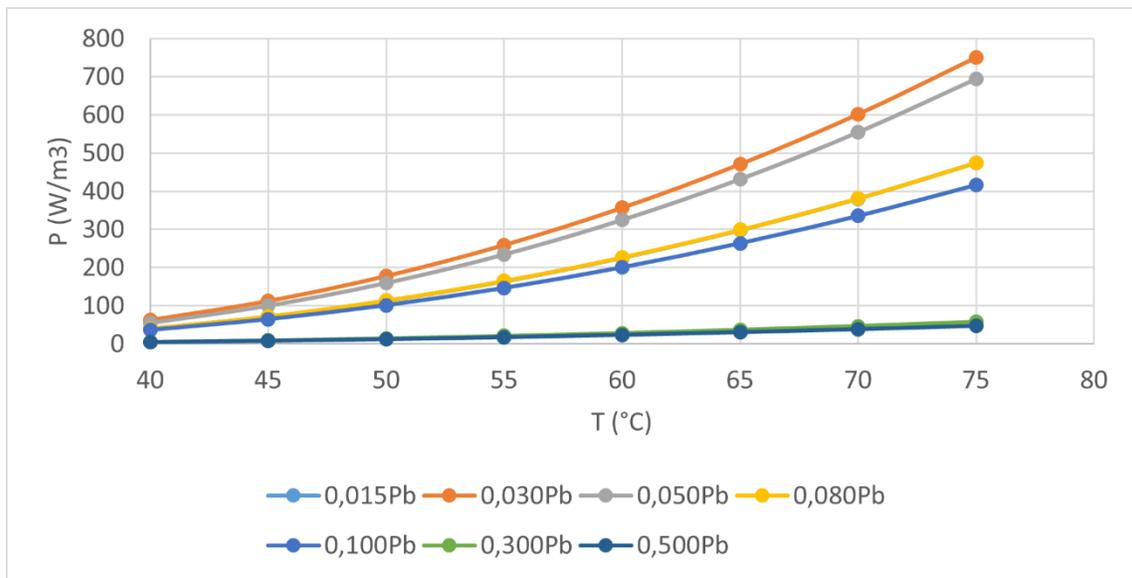


Figure IV-18 : Puissance électrique de cas de matériau Tellure de Bismuth dopé par le Plomb pour différentes quantités

Pour les trois matériaux, (figures IV.16, IV.17 et IV.18) on remarque que le voltage et le courant électrique varient de manière linéaire. En revanche, la puissance électrique varie de manière exponentielle en raison du produit du voltage et du courant électrique.

Le courant électrique ne varie pas suffisamment lorsque le dopage est modifié pour les trois matériaux.

Du point de vue quantitatif, à une température maximale de 75°C, on note que le Tellure de Bismuth dopé à 0,03Pb donne des résultats de potentiel électrique (V) maximal de 1,55V avec un courant électrique de 127 Am^{-2} . En revanche, le Tellure de Bismuth dopé à 0,1Lu 0,00CNT donne les résultats les plus faibles avec un V de 0,02V et un courant électrique de 45,78 Am^{-2} .

En ce qui concerne le Plomb, si l'on compare le dopage de 0,5 Pb qui est le moins performant avec le dopage de 0,03 Pb, on constate une augmentation moyenne du courant électrique de 74%. Si l'on compare les trois matériaux, on observe une augmentation de 99% entre le Tellure de Bismuth dopé à 0,03Pb et le Tellure de Bismuth dopé à 0,1Lu 0,00CNT en termes de potentiel électrique.

D'après cette étude, si l'on compare les trois matériaux, on constate que le plomb donne des bons résultats par rapport aux deux autres matériaux. On peut donc dire qu'il est recommandé pour la thermoélectricité. Le dopage 'Sn et Se' se classe en deuxième position, tandis que le Lu et le CNT donnent des résultats peu convaincants, et nécessitent donc les développer.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous démontrons numériquement le principe de fonctionnement de la thermoélectricité à l'aide d'un générateur thermoélectrique. Nous avons étudié cette démonstration numériquement en utilisant le logiciel ANSYS Thermal-Electric 2023R2. Les courbes de performances des matériaux sont présentées, et nous concluons par une discussion et une comparaison entre les différents matériaux disponibles.

D'après les résultats obtenus, on remarque que les trois variables Voltage, Courant et puissance électrique sont dépendantes de la température.

Il y a une relation proportionnelle entre la variation de température et les trois variables, on remarque qu'on a toujours une croissance des trois propriétés lorsque la température augmente.

L'amélioration des performances ne dépend pas de la quantité dopée, prenant l'exemple le dopage de Sn et Se dont on constate que le plus grand dopage donne des mauvais résultats.

Pour les trois matériaux, on remarque que le voltage et le courant électrique varie avec une manière linéaire, par contre la puissance électrique varie d'une manière exponentielle et c'est dû au produit voltage courant électrique.

Pour les trois matériaux, le courant électrique ne varie pas assez largement lorsque on varie le dopage.

Selon les résultats, Si on compare les trois matériaux, on constate que le Plomb donne des bons résultats par rapport aux autres deux matériaux alors on peut dire qu'il est recommandé pour la thermoélectricité, le dopage 'Sn et Se' se classe en deuxième place, et le Lu et CNT donne des résultats non convaincants donc reste à développer.

Chapitre V

ETUDE EXPERIMENTALE D'UN MODULE THERMOELECTRIQUE

Chapitre V : ETUDE EXPERIMENTALE D'UN MODULE THERMOELECTRIQUE

V.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons introduit le phénomène de la thermoélectricité de manière théorique et numérique. En utilisant la méthode des éléments finis et des outils numériques, nous avons réalisé une simulation d'un module thermoélectrique afin de mieux comprendre son principe de fonctionnement. Dans ce chapitre, nous allons mener une étude expérimentale sur le module thermoélectrique TEC1-12706, qui est un générateur thermoélectrique. Nous allons varier les conditions susceptibles d'influer sur les performances du générateur.

V.2 But de l'expérience

Nous avons étudié les paramètres qui peuvent influencer les performances du générateur thermoélectrique. Dans cette expérience, nous allons examiner d'autres paramètres (externes) qui peuvent également avoir un impact sur les performances du générateur. Nous utiliserons une source alternative d'énergie sous forme de chaleur afin de déterminer les meilleures conditions pour le stockage et l'exploitation de l'énergie électrique, dans le but d'applications telles que les stations spatiales et la production d'hydrogène.

V.3 Schéma explicatif de l'expérience

La figure V-1 montre le principe de fonctionnement de l'expérience.

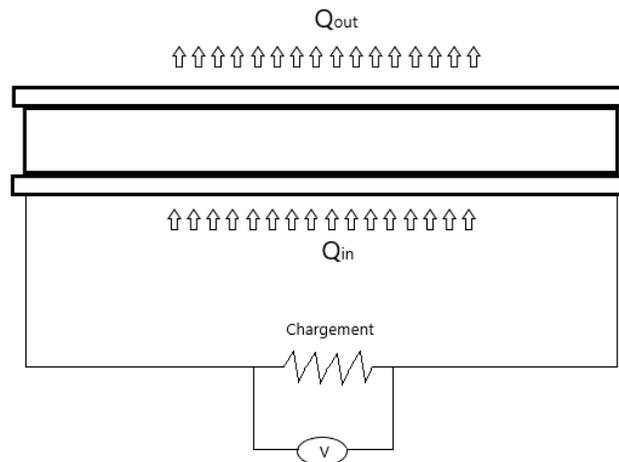


Figure V-1 : Schéma explicatif de l'expérience

Les expériences étaient réalisées au sein de laboratoire de la photoélasticité au niveau de l'Institut d'Aéronautique Et des Etudes Spatiales à l'université de Blida -1-.

V.4 Matériel utilisé

Pour le protocole expérimental, nous avons utilisé les équipements suivants :

- Un générateur thermoélectrique, le TEC1-12706, utilisé pour générer de l'énergie électrique.
- Une plaque en aluminium permettant la conduction de chaleur et la répartition de la température à la surface du module.
- Une pâte thermique pour la protection.
- Une bougie servant de source d'énergie thermique.
- Une sonde de mesure de température de type K pour la surface chaude et froide.
- Un afficheur de température pour la surface chaude.
- Un afficheur de température pour la surface froide.
- Un multimètre pour afficher la différence de potentiel.
- Une charge, représentée par une résistance, pour exploiter l'électricité produite par le module.

V.5 Expériences

V.5.1 Expérience N°1 – Convection naturelle

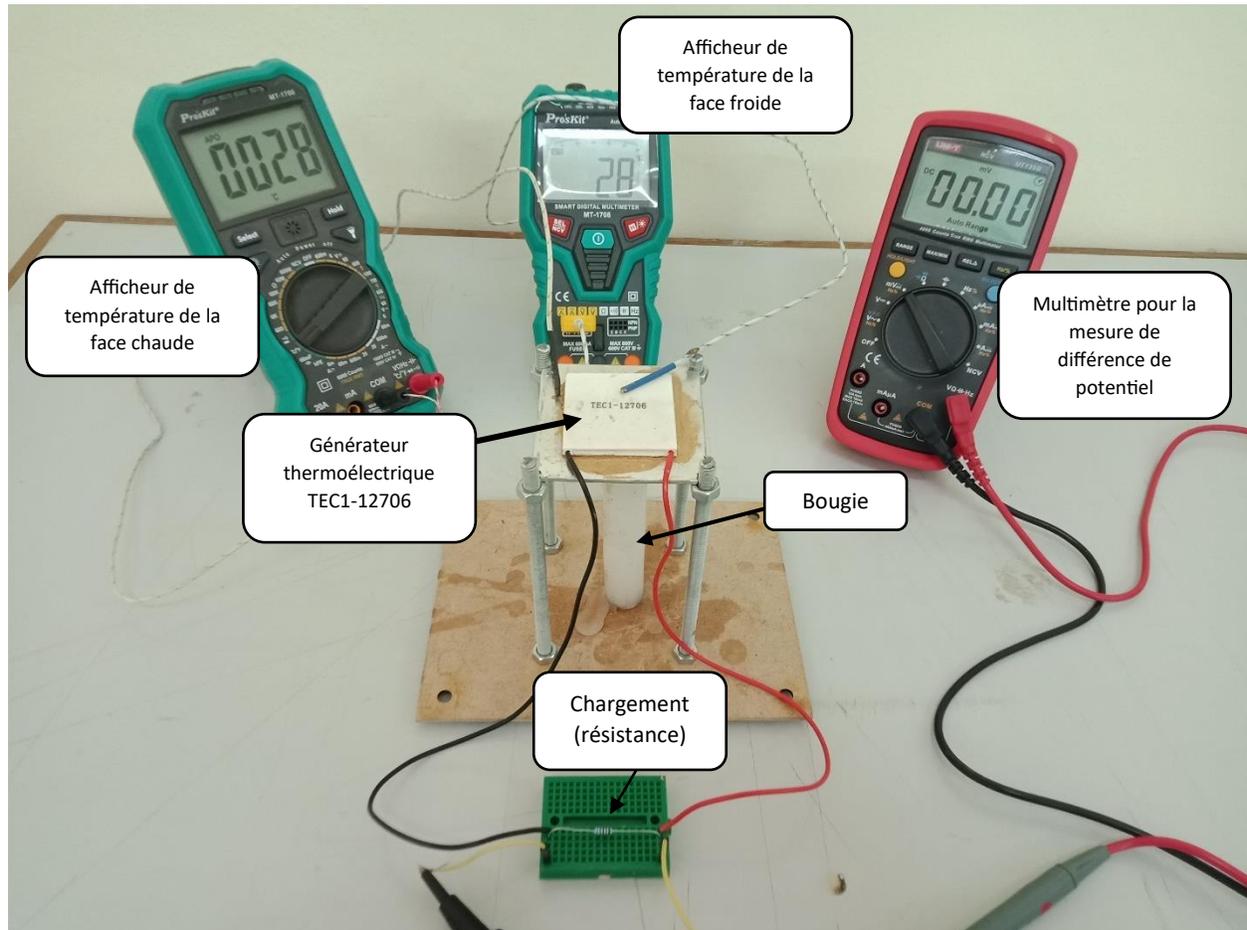


Figure V-2 : Dispositif pour la 1^{ère} expérience

V.5.1.1 Protocole expérimentale

A l'aide d'une bougie, on génère, nous avons utilisé une bougie pour générer de la chaleur et chauffer une plaque d'aluminium. Cette plaque transfère ensuite le flux de chaleur vers le générateur thermoélectrique.

En plaçant la plaque un peu plus loin de la bougie, nous répartissons la chaleur sur toute la surface en contact avec le générateur thermoélectrique. En appliquant de la pâte thermique, nous protégeons également le module.

Le générateur thermoélectrique commence alors à produire de l'énergie électrique. Nous utilisons une sonde thermique pour mesurer la température de la face chaude du module et un multimètre pour enregistrer les variations de la différence de potentiel.

V.5.1.2 Résultats expérimentaux

Voici le tableau ci-dessous contient les résultats obtenus de la 1ere expérience.

Table V-1 : Résultats obtenus d'après la 1ère expérience

T_c	T_f	ΔT	ΔV	η en %
33	29	4	0,282	12,12121212
38	29	9	0,359	23,68421053
44	31	13	0,444	29,54545455
48	33	15	0,504	31,25
51	34	17	0,528	33,33333333
54	36	18	0,542	33,33333333
56	37	19	0,591	33,92857143
60	39	21	0,603	35
62	39	23	0,619	37,09677419
65	41	24	0,616	36,92307692
71	46	25	0,648	35,21126761
74	48	26	0,668	35,13513514
77	49	28	0,678	36,36363636

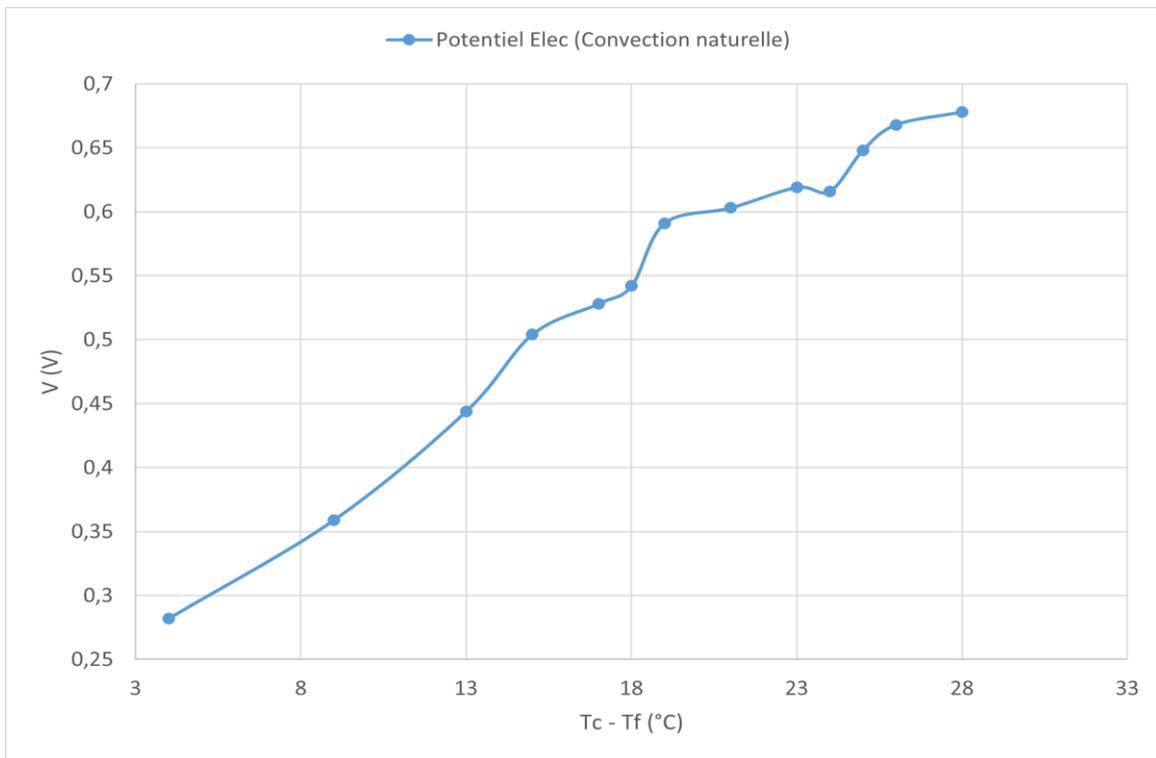


Figure V-3 : Evolution du Potentiel électrique en fonction de la température (Convection naturelle)

Pour évaluer l'efficacité du générateur thermoélectrique, on va utiliser le rendement de Carnot qui est exprimé sous l'équation [1] :

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

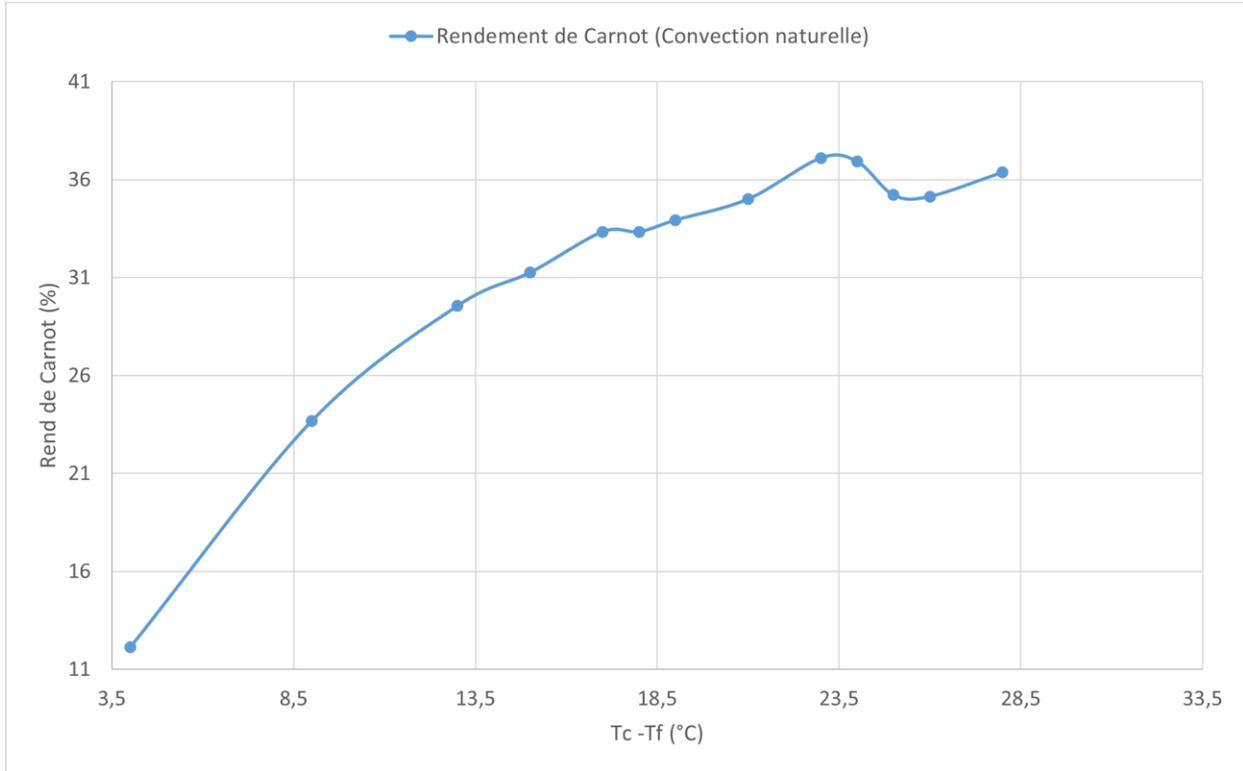


Figure V-4 : Evolution de rendement de Carnot en fonction de la température (Convection naturelle)

Nous avons observé dans la figure V-3 une relation proportionnelle entre la variation de différence de potentiel et la température. Nous avons constaté une augmentation de potentiel lorsque la température augmente.

De plus, nous avons remarqué que le rendement de Carnot continue d'augmenter jusqu'à atteindre un point de stabilisation, mais nous devons le comparer avec la prochaine expérience.

V.5.2 Expérience N°2 – Convection forcée

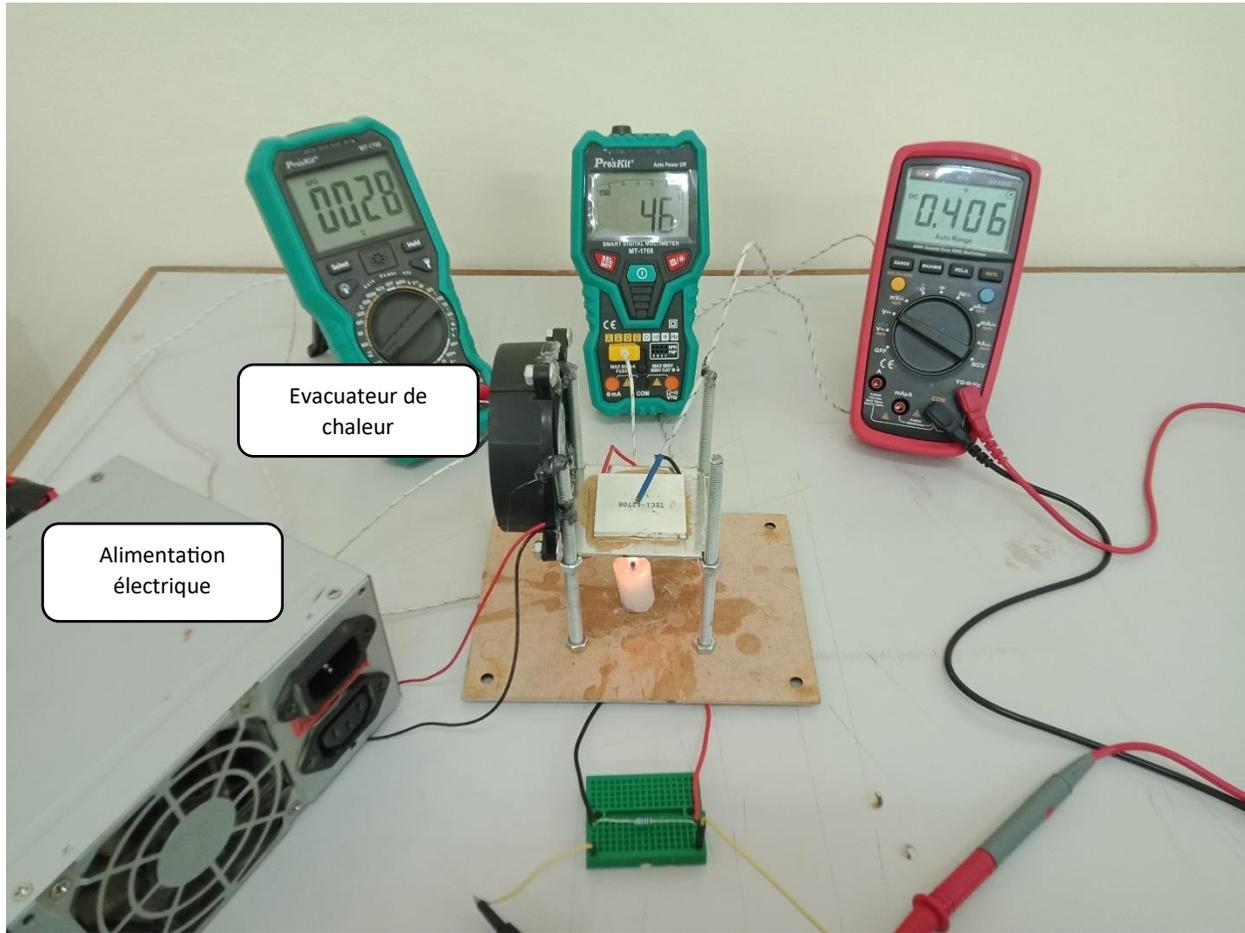


Figure V-5 : Dispositif de l'expérience (Convection forcée)

V.5.2.1 Protocole expérimentale

Nous avons utilisé le même dispositif pour étudier les performances du générateur. Dans la figure V-5, nous pouvons voir le dispositif avec l'ajout d'un évacuateur de chaleur sous forme d'un ventilateur et une source d'électricité pour le faire fonctionner.

V.5.2.2 Résultats expérimentaux

Voici le tableau ci-dessous contient les résultats obtenus de la 1ere expérience.

Table V-2 : Résultats obtenus de la 2ème expérience

T_c	T_f	ΔT	ΔV	η en %
31	27	4	0,289	12,90322581
35	28	7	0,316	20
39	29	10	0,392	25,64102564

44	31	13	0,495	29,54545455
48	32	16	0,522	33,33333333
50	32	18	0,51	36
58	35	23	0,556	39,65517241
64	36	28	0,569	43,75
67	36	31	0,574	46,26865672
70	38	32	0,622	45,71428571
73	38	35	0,675	47,94520548
80	43	37	0,786	46,25

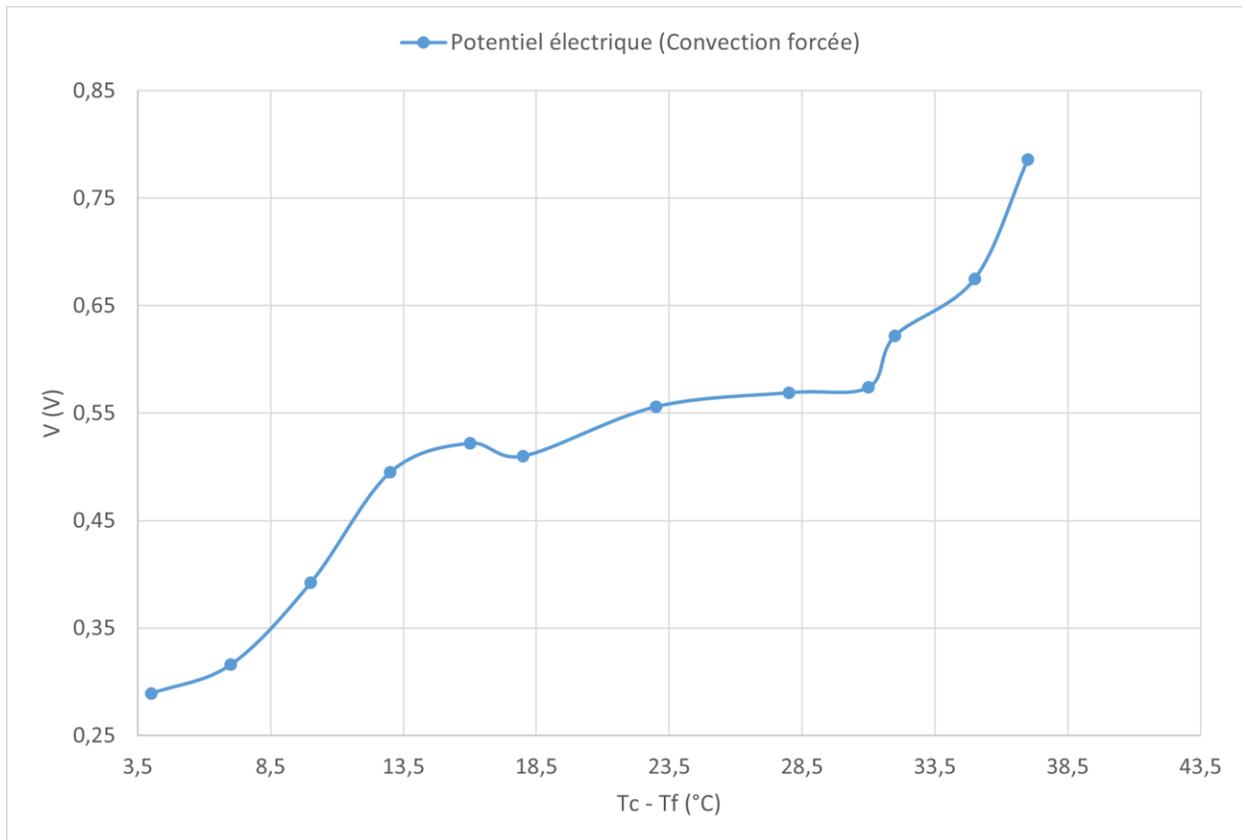


Figure V-6 : Evolution du Potentiel électrique en fonction de la température (Convection forcée)

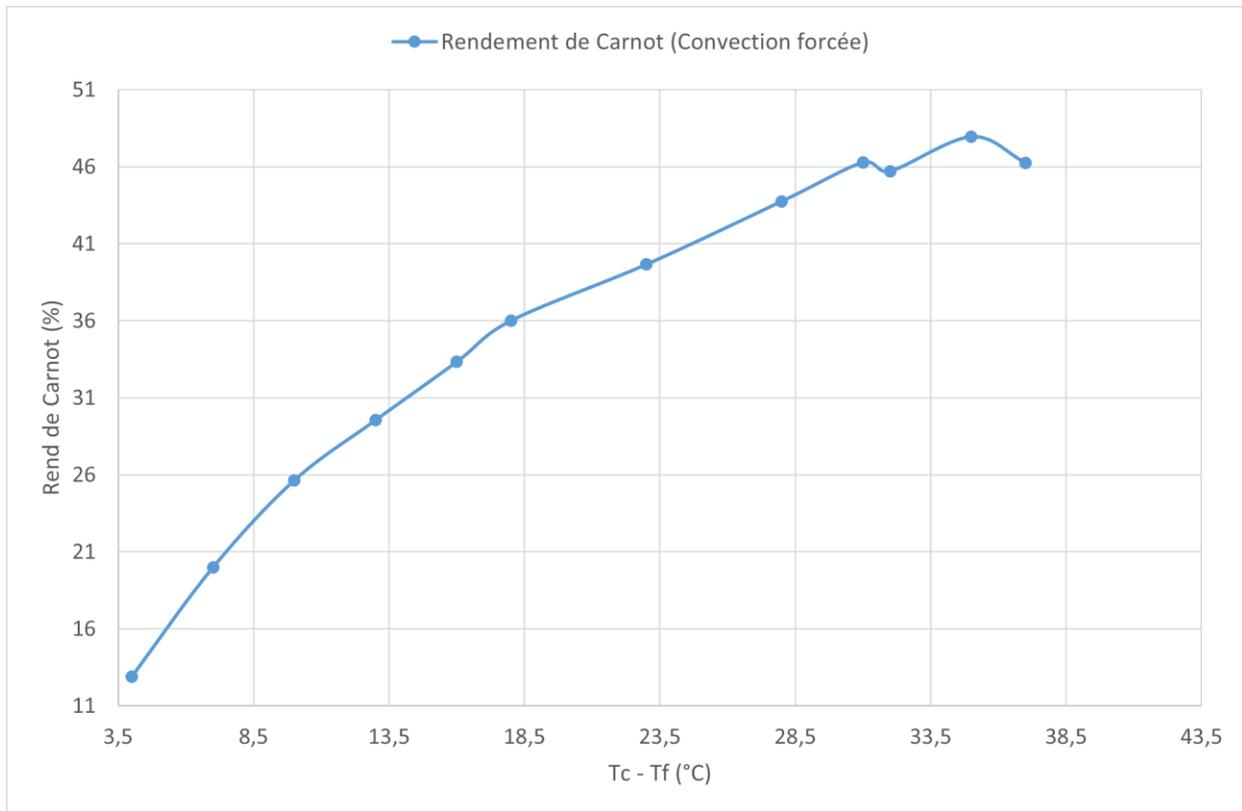


Figure V-7 : Evolution de rendement de Carnot en fonction de la température (Convection forcée)

Nous avons observé qu'avec la convection forcée, il y a une légère perturbation dans la variation du potentiel électrique, causée par l'effet du ventilateur.

Cependant, si nous comparons les rendements des deux expériences, nous constatons qu'à partir d'un certain point, il y a une différence significative entre les deux. Cela signifie que l'effet du ventilateur a une influence beaucoup plus grande sur le rendement, comme le montre la figure V-9.

Nous remarquons également que l'effet du ventilateur entraîne une plus grande différence de température entre la chaleur et le froid, ce qui prédit de meilleures performances.

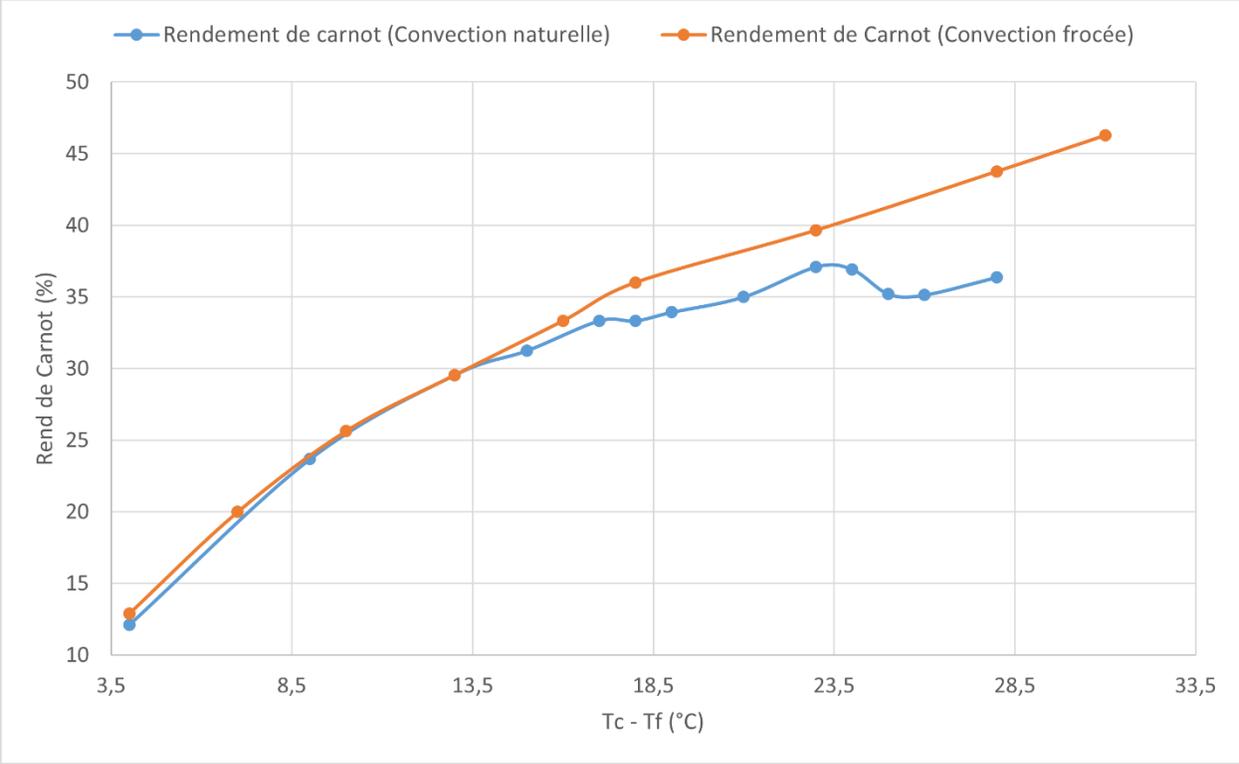


Figure V-8 : Comparaison de rendement de Carnot (convection naturelle et forcée)

V.5.3 Expérience N°3 – Refroidissement avec ailettes

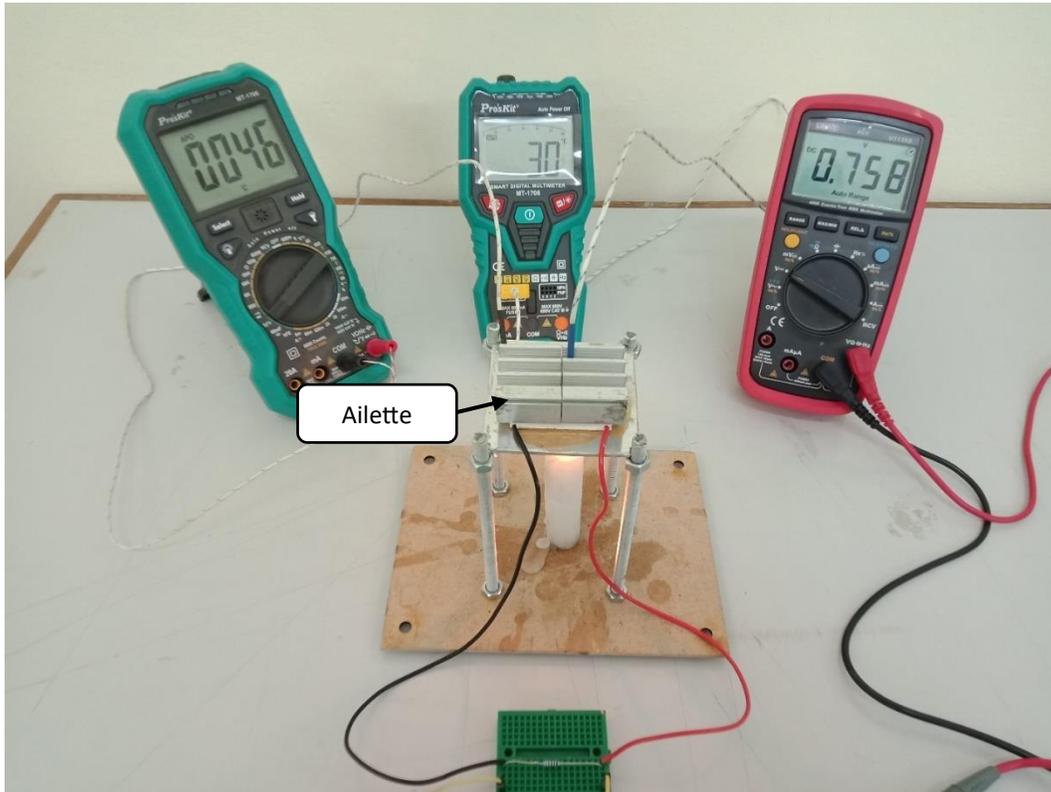


Figure V-9 : Refroidissement par ailette

V.5.3.1 Protocole expérimentale

En utilisant le même dispositif, en ajoutant un évacuateur de chaleur représenté en ailettes, la figure V-10 nous montre le dispositif.

V.5.3.2 Résultats expérimentaux

Voici le tableau ci-dessous contient les résultats obtenus de la 1ere expérience.

Table V-3 : Résultats obtenus de la 3ème expérience

T_c	T_f	ΔT	ΔV	η en %
40	34	6	0,319	15
44	34	10	0,429	22,72727273
48	35	13	0,565	27,08333333
51	35	16	0,641	31,37254902
53	35	18	0,705	33,96226415
56	35	21	0,808	37,5
60	36	24	0,905	40
62	36	26	0,966	41,93548387

64	37	27	1,014	42,1875
71	41	30	1,141	42,25352113
75	43	32	1,145	42,66666667
77	44	33	1,154	42,85714286
84	50	34	1,171	40,47619048
88	53	35	1,207	39,77272727

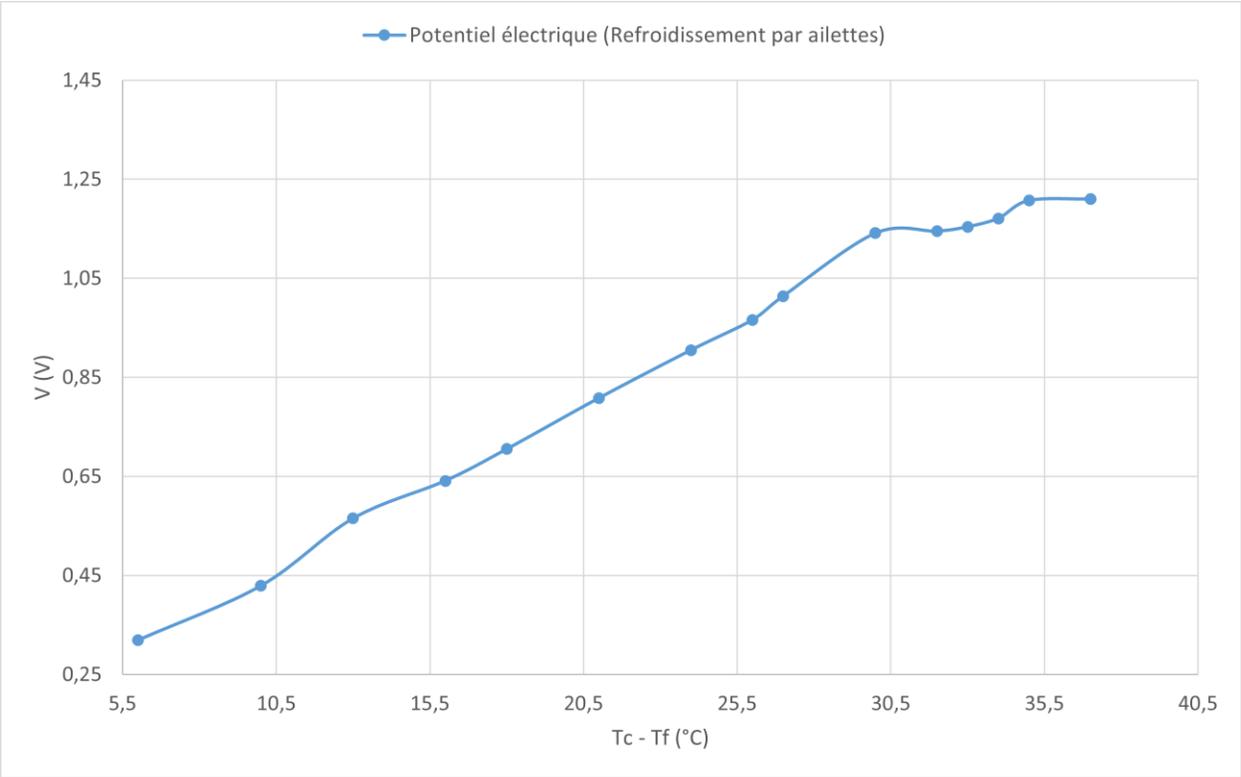


Figure V-10 : Evolution du Potentiel électrique en fonction de la température (Refroidissement par ailette)

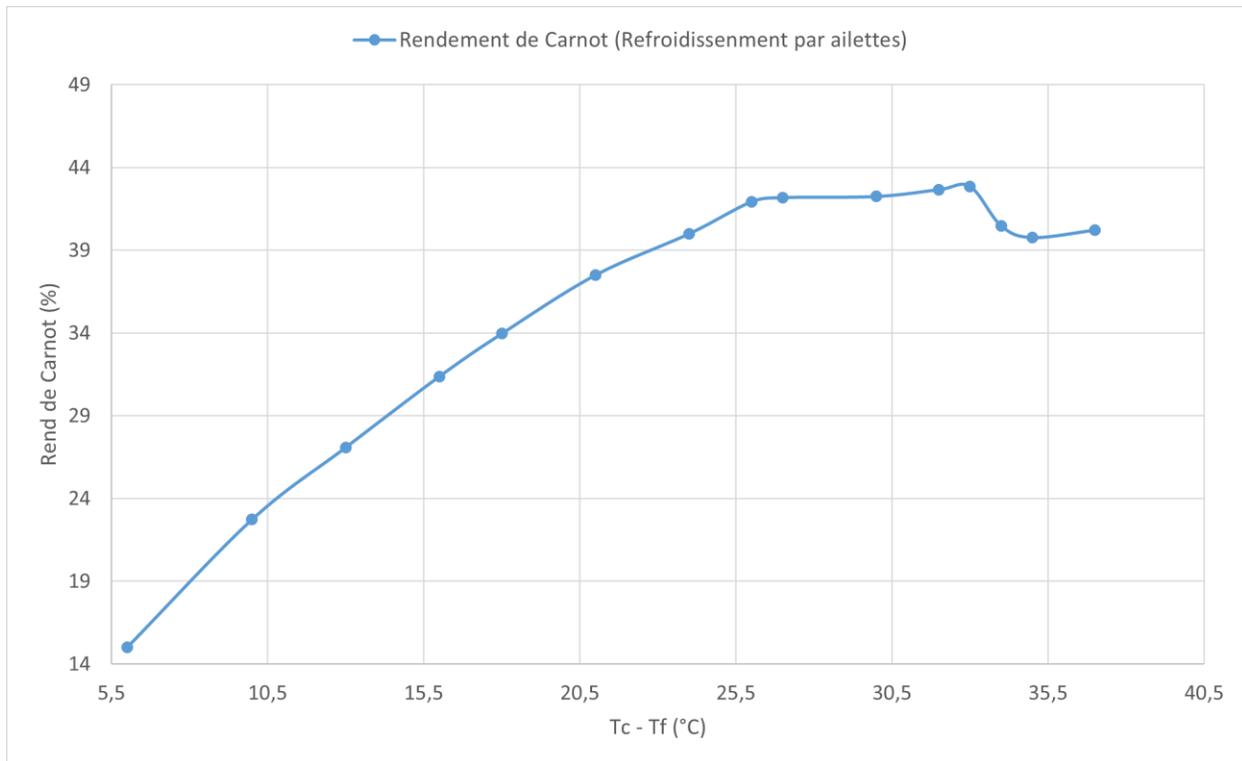


Figure V-11 : Evolution de rendement de Carnot en fonction de la température (Convection naturelle)

Nous avons discuté de l'utilisation de surfaces étendues pour favoriser le transfert de chaleur à partir d'une surface froide et générer des différences de température plus importantes. Dans le cadre de cette expérience, nous avons soumis le module thermoélectrique à des charges de chauffage du côté chaud et utilisé des ailettes du côté froid pour observer l'effet du transfert de chaleur par les ailettes, comme le montre la figure V-11.

Nous avons constaté que dans cette expérience, le potentiel électrique et le rendement ont atteint des valeurs plus élevées par rapport aux expériences précédentes.

V.5.4 Expérience N°4 – Refroidissement par l'eau

V.5.4.1 Protocole expérimentale

Nous avons procédé à une expérience en utilisant le même dispositif. Nous avons ajouté une casserole par-dessus le module thermoélectrique, utilisée comme un bac d'eau. Ces conditions peuvent avoir une influence sur les performances du générateur.

V.5.4.2 Résultats expérimentaux

Voici le tableau ci-dessous contient les résultats obtenus de la 1ere expérience.

Table V-4 : Résultats de la 4ème expérience

T_c	T_f	ΔT	ΔV	η en %
24	13	11	0,362	45,83333333
29	14	15	0,542	51,72413793
32	15	17	0,594	53,125
34	16	18	0,625	52,94117647
36	17	19	0,658	52,77777778
39	19	20	0,703	51,28205128
42	20	22	0,738	52,38095238
47	21	26	0,787	55,31914894
50	22	28	0,821	56
53	23	30	0,859	56,60377358
58	26	32	0,915	55,17241379
62	27	35	0,94	56,4516129
64	28	36	0,964	56,25
67	30	37	0,982	55,2238806
70	31	39	1,004	55,71428571
72	32	40	1,028	55,55555556
75	33	42	1,047	56
77	34	43	1,064	55,84415584
79	35	44	1,082	55,69620253
81	36	45	1,1	55,55555556
85	39	46	1,13	54,11764706
87	40	47	1,143	54,02298851

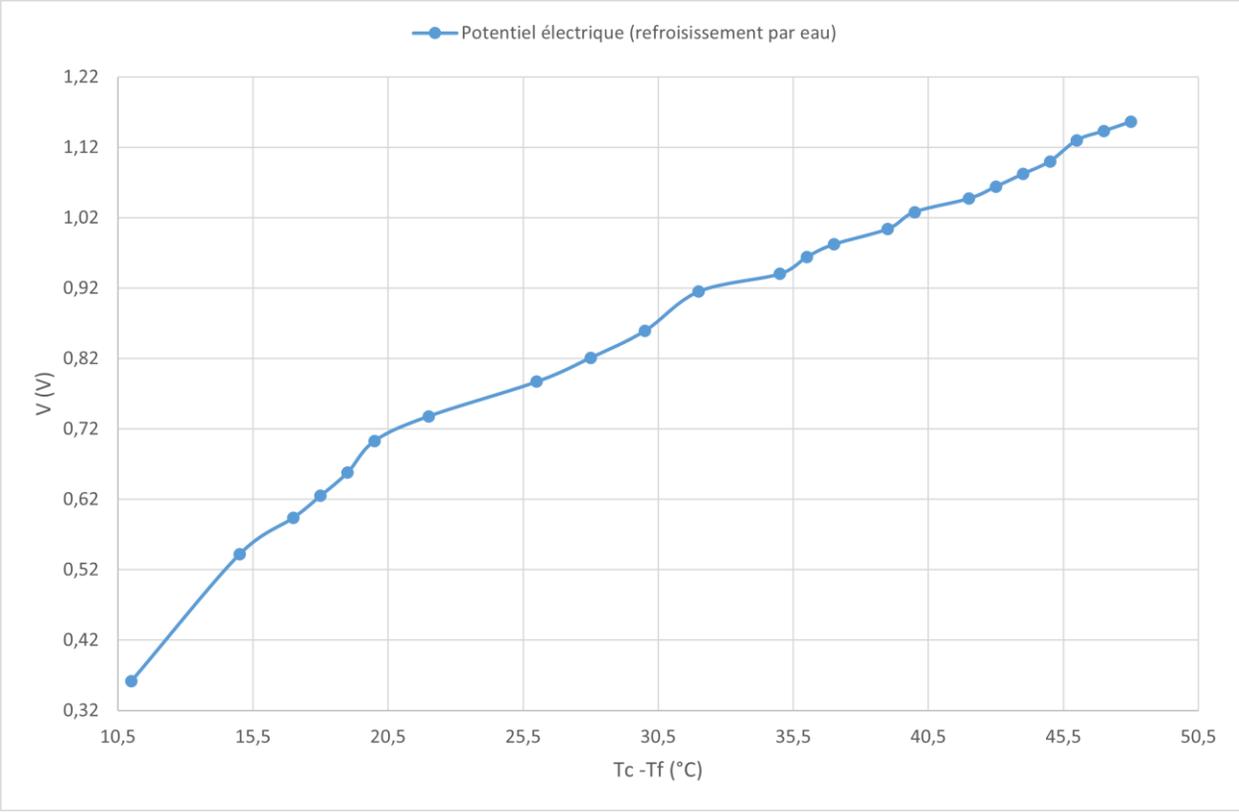


Figure V-12 : Evolution du Potentiel électrique en fonction de la température (Bac d'eau)

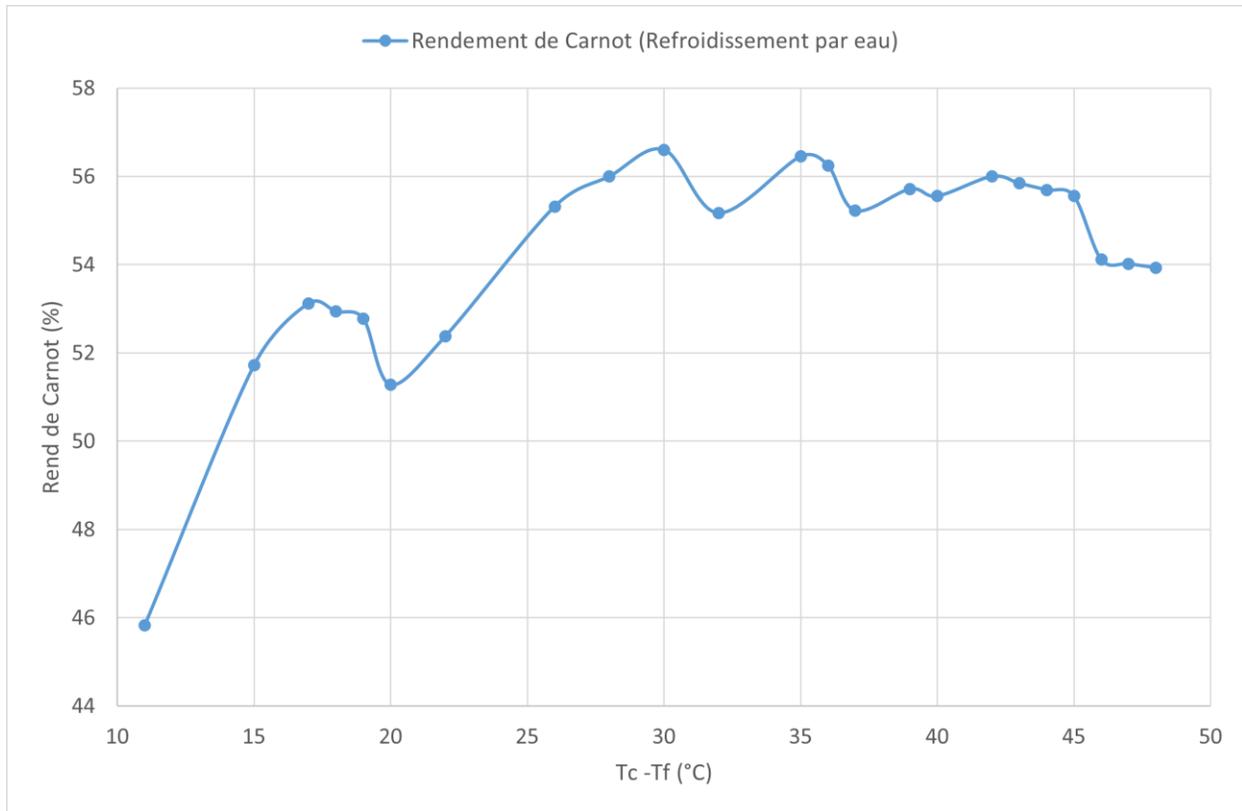


Figure V-13 : Evolution de rendement de Carnot en fonction de la température (Bac d'eau)

Dans cette expérience, nous pouvons dire que le refroidissement par eau donne de résultats meilleurs que les autres expériences même à ΔT petit.

Nous avons comparé les quatre expériences et constaté que le refroidissement par ailettes donne les meilleurs résultats, avec un potentiel électrique atteignant 1,21 V à ΔT max, Ensuite, le refroidissement par eau obtient un potentiel de 1,14 V. Les deux autres expériences se classent en dernier.

Lorsque nous comparons le refroidissement par ailettes au refroidissement par eau, nous observons que les ailettes augmentent le potentiel électrique d'environ 18 %. En revanche, en comparant la convection forcée à la convection naturelle, l'évacuateur de chaleur n'influence pas significativement le potentiel électrique, l'augmentant seulement d'environ 9 %. La figure V-15

illustre ces résultats.

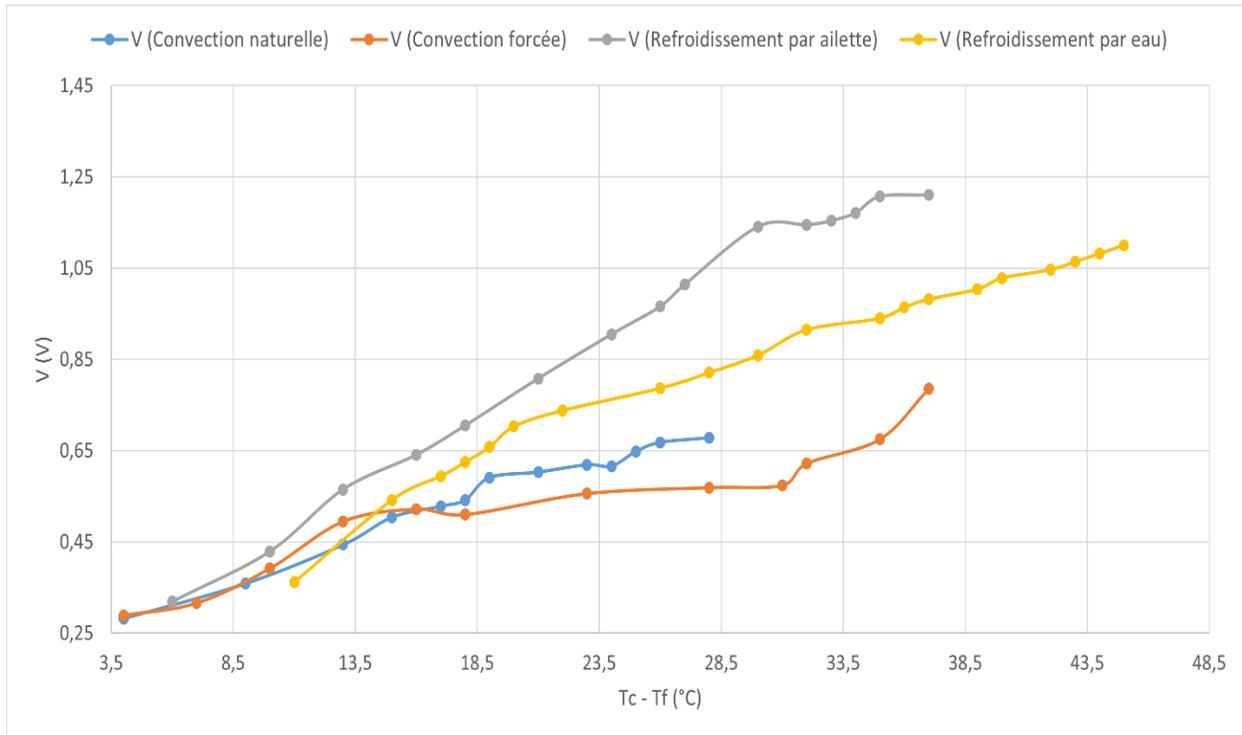


Figure V-14 : Comparaison du potentiel électrique entre les expériences (convection naturelle, forcée, refroidissement par ailette, par eau)

V.5.5 Comparaison

Nous avons déjà abordé les paramètres qui influencent les performances d'un générateur thermoélectrique. En comparant une étude réalisée avec le générateur thermoélectrique TEG1-12611 (qui prend en compte l'étude d'une convection naturelle) [1], nous avons constaté d'autres paramètres qui peuvent influencer les performances. Nous avons noté le nombre de couples et avons remarqué qu'il en manquait un par rapport à notre module. De plus, il y a une différence dans le courant fourni, sans oublier la différence entre la température de la face chaude et celle de la face froide. La figure V-16 illustre cette différence.

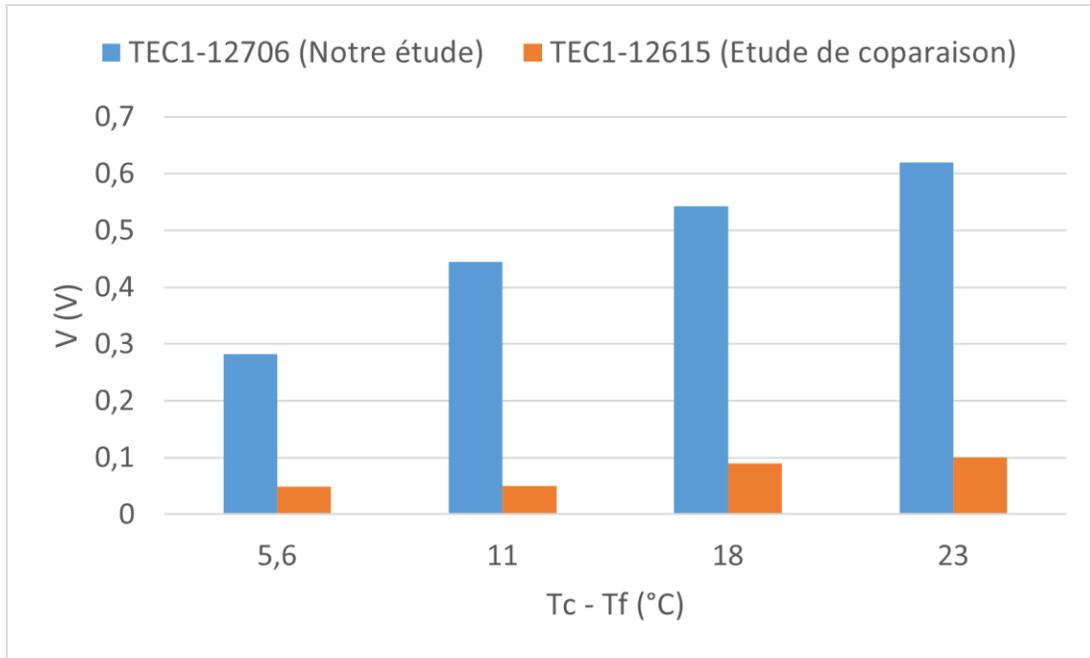


Figure V-15 : Comparaison entre TEC1-12706 (notre étude) et TEC1-12615 (étude de comparaison), cas de convection naturelle

V.6 Conclusion

Nous avons présenté une étude expérimentale visant à améliorer les performances d'un générateur thermoélectrique.

Nous avons mis en œuvre quatre scénarios différents pour prouver son efficacité. Le premier scénario a examiné le transfert de chaleur par convection libre, tandis que le deuxième scénario a utilisé la convection forcée avec un ventilateur pour observer la variation du potentiel électrique et le rendement de Carnot. Le troisième scénario a impliqué l'intégration d'ailettes afin d'étudier leur effet. Enfin, le dernier scénario a comparé les résultats avec un bac d'eau.

Cette recherche vise à trouver des stratégies et des méthodes pour améliorer les performances d'un générateur thermoélectrique. Elle peut servir de référence pour de futures recherches. Cette recherche a pour but chercher des stratégies et des méthodes d'améliorer les performances d'un générateur thermoélectrique, on peut la considérer comme une référence pour des future recherches.

Références

[1] – Ali Alahmer, Mohammad Bani Khalid, Nabil Beithou..., ‘An Experimental Investigation into Improving the Performance of Thermoelectric Generators’, 2022, Journal of Ecological Engineering, disponible en version numérique : [<http://www.jeeng.net/pdf-145457-72181?filename=An%20Experimental.pdf>]

Chapitre VI

***CONCEPTION ET
REALISATION D'UN
GENERATEUR
THERMOELECTRIQUE A
L'AIDE D'UN
CONCENTRATEUR
SOLAIRE***

Chapitre VI : CONCEPTION ET REALISATION D'UN GENERATEUR THERMOELECTRIQUE A L'AIDE D'UN CONCENTRATEUR SOLAIRE

VI.1 Introduction

Nous avons vu que la température est l'élément clé en thermoélectricité. En effet, plus la différence de température est importante, plus le potentiel électrique est élevé.

La situation géographique de l'Algérie lui confère divers avantages, notamment le Sahara algérien qui couvre environ 90% de sa superficie.

Lorsque l'on parle d'exploitation de la chaleur, la première solution qui vient à l'esprit est l'utilisation de panneaux photovoltaïques. Cependant, ces derniers rencontrent des problèmes avec les températures élevées, comme indiqué ci-dessous :

- Lorsque la température des cellules photovoltaïques augmente, leur tension diminue, ce qui réduit la puissance électrique produite. On estime une perte de 0,2 à 0,5% de puissance et de tension par degré au-dessus de 25 °C.

- Ainsi, un panneau atteignant 75 °C peut perdre jusqu'à 20,5% de sa puissance et 16% de sa tension à vide.

- Cette diminution de rendement est due au coefficient de température négatif des cellules photovoltaïques en silicium, qui est en moyenne de 0,2 à 0,5% par degré Celsius.

- De plus, la surchauffe peut accélérer certains mécanismes de dégradation des panneaux, comme la dégradation induite par la lumière et les hautes températures (LeTID), ce qui peut réduire leur production électrique jusqu'à 15% sur 10 à 20 ans.

La surchauffe des panneaux photovoltaïques, bien qu'elle ne les endommage pas, a un impact significatif sur leur rendement électrique.

Les générateurs thermoélectriques se positionnent donc en tant que substitut pour résoudre le problème des panneaux photovoltaïques.

Dans ce dernier chapitre, nous allons concevoir un générateur thermoélectrique à l'aide d'un concentrateur solaire.

VI.2 Le concentrateur solaire

Les concentrateurs solaires sont des dispositifs qui utilisent des miroirs, des lentilles ou des réflecteurs pour concentrer la lumière du soleil sur une petite zone. Cela permet de générer des températures élevées, qui peuvent ensuite être utilisées pour produire de l'électricité ou fournir de la chaleur pour les processus industriels. Voici les points clés à retenir :

- Les concentrateurs solaires augmentent l'intensité de la lumière solaire jusqu'à 1 000 fois en concentrant une grande surface de lumière sur un petit récepteur.

- La lumière solaire concentrée peut atteindre des températures élevées, souvent supérieures à 800°C.

- Les types courants de concentrateurs solaires comprennent les miroirs paraboliques, les lentilles Fresnel et les arrays de réflecteurs. Chaque conception a des facteurs de concentration et des capacités de température différents.

- Les concentrateurs solaires sont plus efficaces dans les endroits ensoleillés et sans nuages, car ils dépendent de la lumière solaire directe plutôt que de la radiation diffuse. Par conséquent, le Sahara algérien reste un excellent endroit pour leur utilisation.

La figure VI-1 montre le principe de fonctionnement d'un concentrateur parabolique qui sera utilisé dans notre conception.

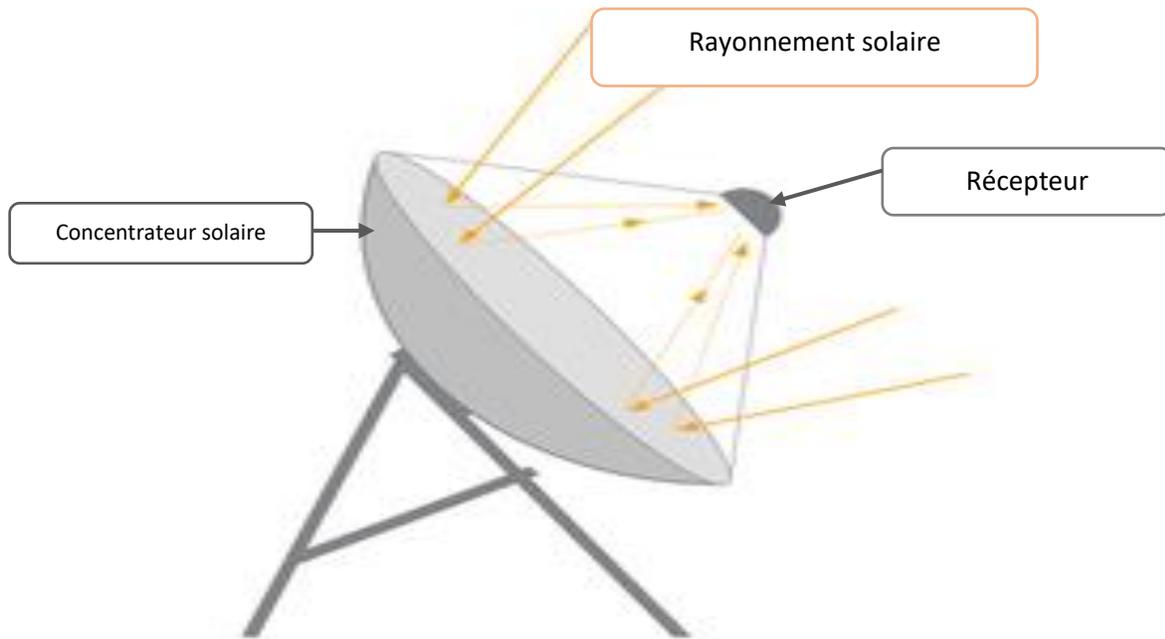


Figure VI-1 : Principe de fonctionnement d'un concentrateur solaire parabolique

VI.3 Conception du dispositif

VI.3.1 Le concentrateur solaire

Pour le concentrateur solaire, on a utilisé une parabole de diamètre $\sim 59\text{cm}$, et d'une profondeur de $\sim 4.5\text{cm}$, pour le rendre un réflecteur, on a utilisé un papier aluminium de cuisson avec un coefficient de réflexion de lumière $\sim 75\%$, la figure VI-2 montre le dispositif.



Figure VI-2 : Le réflecteur solaire

VI.3.2 Le récepteur

VI.3.2.1 Géométrie

Le récepteur a été conçu à l'aide du logiciel SolidWorks, la figure ci-dessous montrent le modèle.

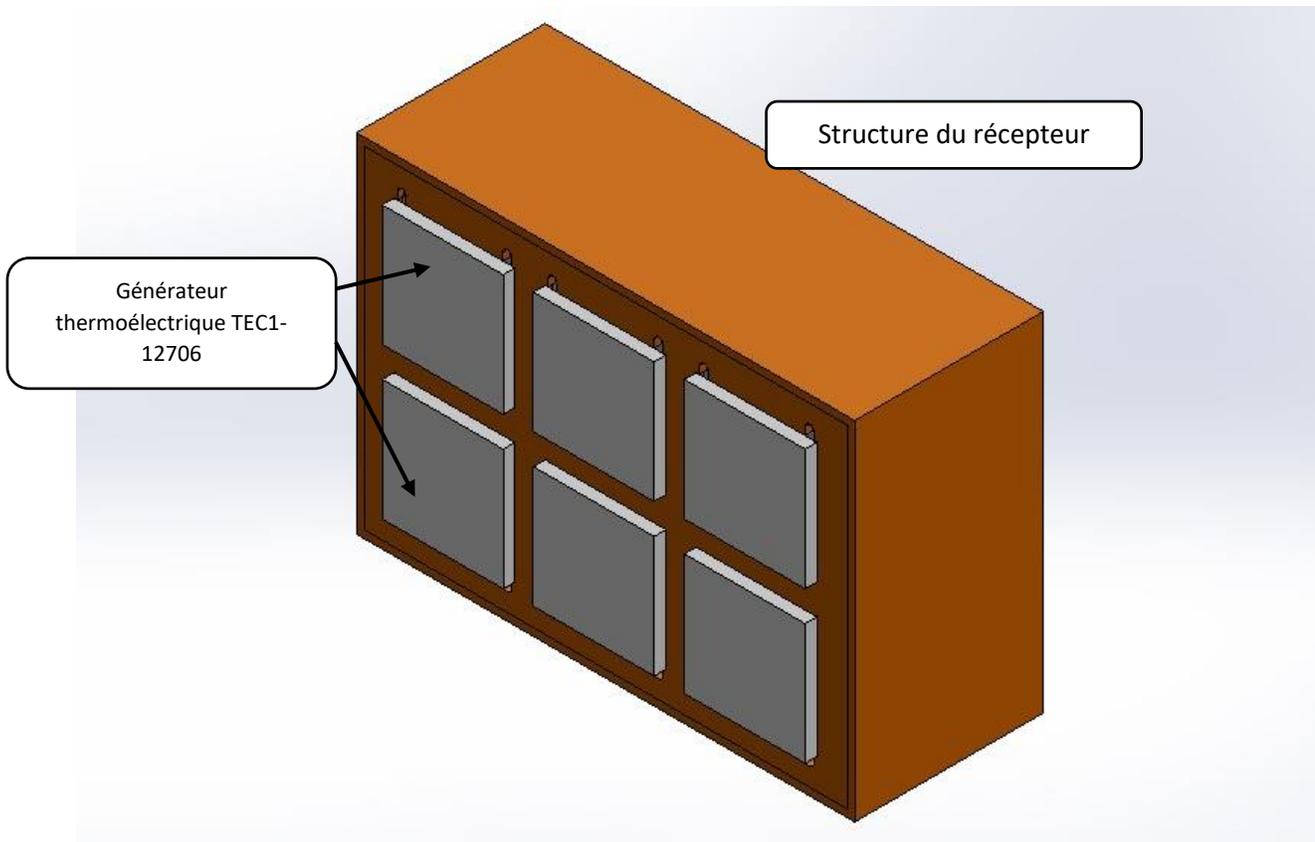


Figure VI-3 : Structure interne du modèle conçu

Le récepteur est construit de 6 générateurs thermoélectriques de modèle TEC1-12706, liés en série, ils sont en contact avec une plaque d'aluminium de 1mm d'épaisseur pour la conduction de chaleur (même principe des expériences faites), la figure VI-4 montre le modèle final.

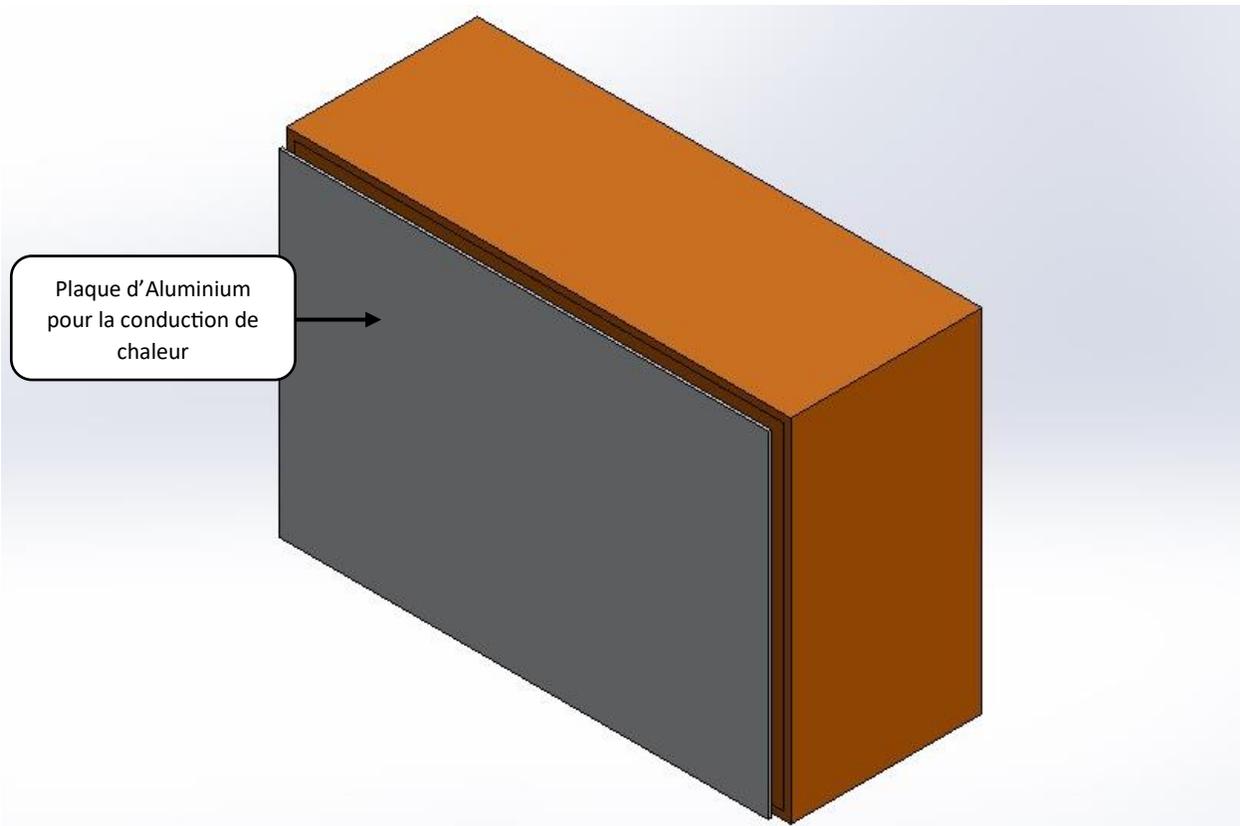


Figure VI-4 : Modèle complet du récepteur

Voici la figure VI-5 qui montre la structure interne du récepteur.

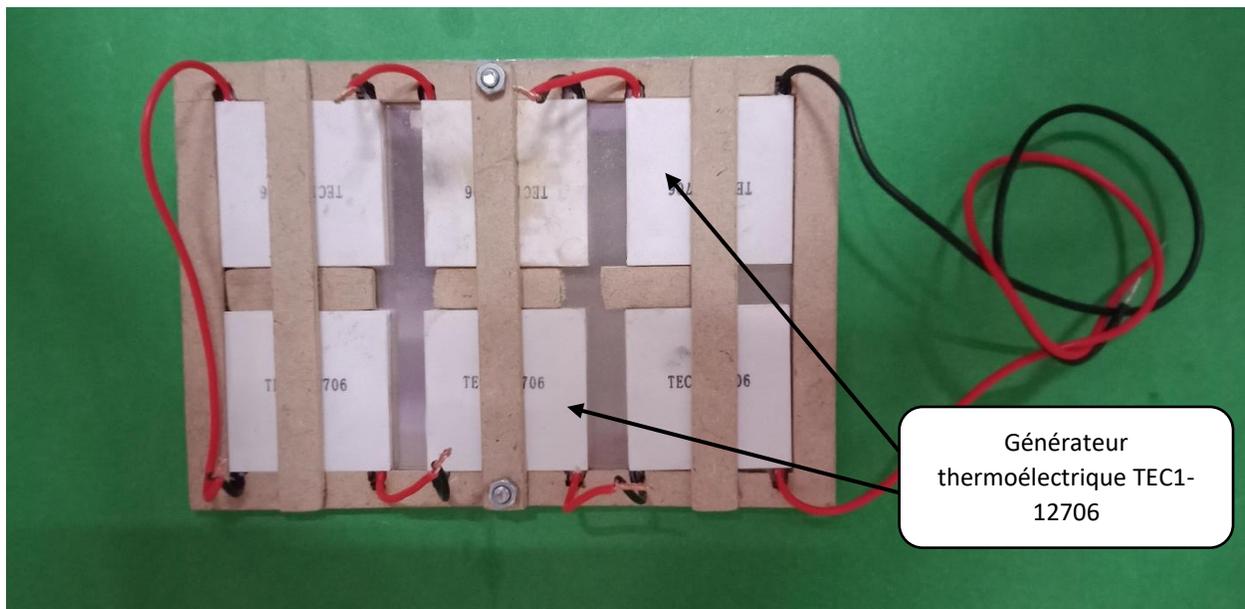


Figure VI-5 : Structure interne du récepteur

Le récepteur doit être orienté vers le rayonnement solaire afin de le maximiser. Pour minimiser les pertes de chaleur, nous avons utilisé une isolation en polystyrène d'une épaisseur de 2,5 cm. Ensuite, nous avons ajouté un revêtement en papier aluminium pour renforcer cette isolation. La figure VI-6 illustre l'appareil final.

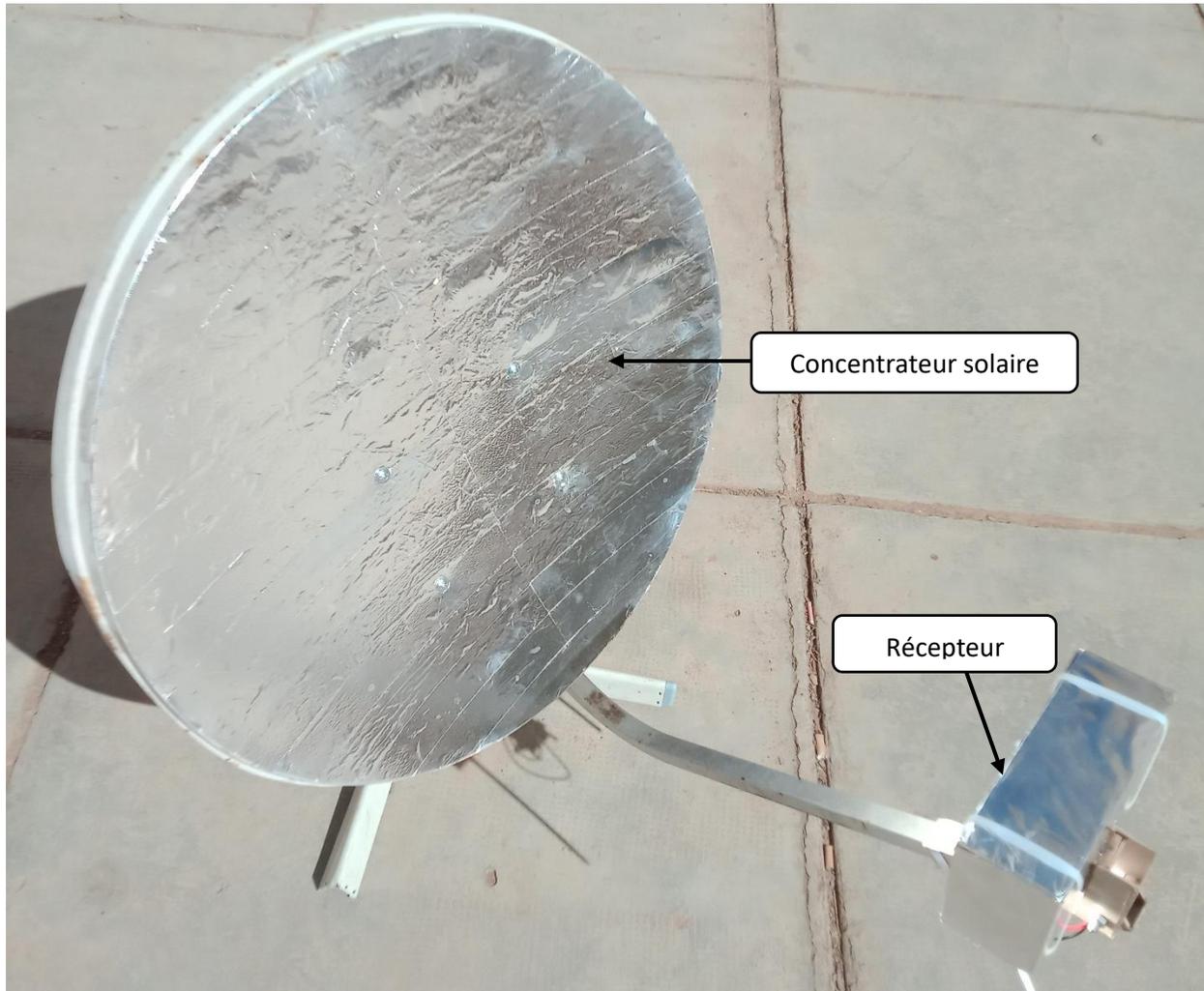


Figure VI-6 : Appareil du générateur thermoélectrique

Cette expérience a été faite à 14h30min, elle donne le résultat suivant :

Table VI-1 : Résultat obtenu lors de l'expérience de l'appareil (temp de l'expérience : 14h30min)

T_c	ΔV
75	2.4 V

VI.4 Conclusion

Les résultats obtenus dépendent fortement de l'efficacité du concentrateur solaire, qui joue un rôle crucial dans la conversion de l'énergie solaire en chaleur utilisable. De plus, ils sont également influencés par le dispositif choisi pour le refroidissement du côté froid, un facteur déterminant pour maintenir une différence de température optimale, comme discuté en détail dans le chapitre précédent. L'interaction entre ces deux éléments est essentielle pour maximiser la performance et l'efficacité globale du système thermoélectrique.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre recherche était de mener une étude numérique et expérimentale d'un générateur thermoélectrique en utilisant un concentrateur solaire, afin de démontrer la faisabilité et les avantages de la conversion thermoélectrique pour la production d'énergie renouvelable, dans le but de concevoir une application réelle et pratique pour la vie quotidienne.

Nous avons exploré les phénomènes thermoélectriques en détail, en nous concentrant sur les propriétés physiques et chimiques des matériaux thermoélectriques, ainsi que sur les mécanismes de conduction, de convection et de rayonnement. La modélisation numérique réalisée sous le logiciel ANSYS Thermal-Electric a permis d'analyser les performances de différents matériaux thermoélectriques à diverses températures imposées, réduisant ainsi les coûts et le temps par rapport à l'expérimentation traditionnelle.

L'étude expérimentale, quant à elle, a validé les résultats numériques et fourni des informations précieuses sur l'optimisation des performances du générateur thermoélectrique. Un dispositif expérimental a été réalisé pour examiner les notions théoriques en pratique et démontrer la production d'énergie renouvelable à faible coût.

Parmi les points forts de cette étude on peut citer :

-Approche intégrée : Combinaison d'études numériques et expérimentales pour une validation complète.

Utilisation de logiciels avancés : Application du logiciel ANSYS Thermal-Electric avec le module Thermal-Electric pour des simulations précises.

Analyse détaillée des matériaux : Évaluation des performances de divers matériaux thermoélectriques à savoir le $(\text{Bi}_{2-x}\text{Sn}_x)\text{Te}_{2-y}\text{Se}_y$, Bi_2Te_3 0.1Lu xCNT, ainsi le dopage du Plomb.

Optimisation des performances : Identification des paramètres clés pour améliorer le rendement du générateur à savoir le coefficient de Seebeck et le facteur de mérite

Production d'énergie renouvelable : Démonstration de la faisabilité de la production d'énergie à partir de la chaleur solaire par le dispositif expérimental.

Avantages écologiques : Promotion de l'utilisation de sources d'énergie propres et durables.

Enfin, et malgré les difficultés expérimentales, telles que le manque de matériel adéquat, la difficulté de mesurer précisément la température, et la précision limitée des sondes thermiques, ainsi que des problèmes de réalisation, notamment l'absence d'outils spéciaux, l'utilisation de substituts matériels, et des délais serrés, qui ont influencé la fiabilité des résultats expérimentaux,

Ce travail a montré que la technologie thermoélectrique, bien que complexe, offre un potentiel considérable pour la production d'énergie renouvelable. Les résultats obtenus, tant numériques qu'expérimentaux, confirment que l'utilisation de matériaux thermoélectriques avancés et l'optimisation des paramètres de fonctionnement peuvent significativement améliorer l'efficacité des générateurs thermoélectriques.

Les perspectives futures pour les matériaux thermoélectriques incluent deux principaux axes de développement :

- Nouveaux matériaux thermoélectriques :

Les recherches se concentrent sur le développement de nouveaux matériaux organiques et polymères conducteurs qui offrent l'avantage d'être plus flexibles, légers, moins toxiques et moins coûteux que les matériaux inorganiques traditionnels.

La modification de la structure moléculaire de ces matériaux permet de moduler leurs propriétés physiques et chimiques pour les adapter à différentes applications.

Des chimistes ont récemment synthétisé un nouveau matériau sulfure d'origine minérale présentant des performances thermoélectriques remarquables.

- Amélioration des techniques de fabrication :

Le défi est de développer des procédés de fabrication adaptés à ces nouveaux matériaux, comme l'impression en phase liquide qui permet d'utiliser des substrats flexibles et de fabriquer des dispositifs sur de grandes surfaces.

Il faut optimiser les paramètres de dépôt comme la distance buse-substrat, le débit d'encre, la vitesse de balayage et la température du substrat pour éviter les défauts de dépôt.

L'objectif est de concevoir des modules thermoélectriques dont la conception est adaptée aux performances des matériaux, par exemple en optimisant la géométrie des éléments pour compenser leurs faiblesses.

En combinant ces avancées sur les matériaux et les procédés de fabrication, les perspectives futures visent à rendre la technologie thermoélectrique encore plus performante, viable et accessible pour des applications industrielles et domestiques de récupération d'énergie.