



**HAL**  
open science

# Modélisation et optimisation de la structure géométrique d'un microgénérateur thermoélectrique planaire

Ibrahim Bel-Hadj, Z. Bougrioua, Katir Ziouche

## ► To cite this version:

Ibrahim Bel-Hadj, Z. Bougrioua, Katir Ziouche. Modélisation et optimisation de la structure géométrique d'un microgénérateur thermoélectrique planaire. TELECOM'2019 & 11èmes JFMMA, Jun 2019, Saidia, Maroc. hal-02414487

**HAL Id: hal-02414487**

**<https://hal.science/hal-02414487v1>**

Submitted on 9 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MODELISATION ET OPTIMISATION DE LA STRUCTURE GEOMETRIQUE D'UN MICROGENERATEUR THERMOELECTRIQUE PLANAIRE

I. Bel-hadj, Z. Bougrioua, K. Ziouche

Université de Lille, CNRS, UMR 8520 Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, F-59000 Lille, France

Email: [ibrahim.bel-hadj@univ-lille.fr](mailto:ibrahim.bel-hadj@univ-lille.fr)

## Résumé:

Dans le cadre de cette communication, nous présentons une modélisation de microgénérateurs thermoélectriques ( $\mu$ TEG) planaires réalisés en technologie Silicium compatible CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), et destinés à la récupération de toute forme d'énergie thermique (surface  $\sim 1/3 \text{ cm}^2$ ). Ces  $\mu$ TEGs sont constitués d'une thermopile, suspendue périodiquement sur un réseau de membranes diélectriques, qui utilise l'association de longs thermocouples (TCs) planaires en poly-Silicium/or (pSi/Au). Un concentrateur à piliers y est superposé pour canaliser le flux thermique incident sur les membranes. Les résultats obtenus à l'aide de la modélisation thermique sous COMSOL<sup>®</sup> de la structure semi 3D de tels  $\mu$ TEGs, montrent que 1/ la différence de température générée aux bornes des TCs de la thermopile admet un maximum en fonction du nombre de membranes et que 2/ les configurations de  $\mu$ TEG à 4 et 5 membranes sont celles qui généreront le maximum de puissance électrique pour une largeur des piliers de concentrateur optimale.

**Mots clés:** Microgénérateur, Thermoélectrique, Planaire, Silicium, Modélisation.

## 1. INTRODUCTION

Dans le domaine des microtechnologies, la récupération d'énergie (Energy Scavenging/ Harvesting) est une thématique de recherche d'actualité qui vise, par exemple, à utiliser l'énergie présente dans l'environnement pour alimenter de petits systèmes électroniques tels que des capteurs, des microsystèmes ou même des dispositifs médicaux implantés [1]–[3]. Parmi les micro-dispositifs qui exploitent ces énergies, on trouve les microgénérateurs thermoélectriques ( $\mu$ TEGs) qui permettent de collecter l'énergie thermique perdue dans l'environnement et de la convertir en électricité. La partie active de ces  $\mu$ TEGs est principalement constituée par l'association d'un ensemble de thermocouples (TCs) connectés généralement en série électriquement et en parallèle thermiquement. Leur principe de fonctionnement repose sur l'effet thermoélectrique (TE) de Seebeck correspondant à la conversion des gradients de température en différence de potentiel.

De manière générale, les performances des  $\mu$ TEGs sont liées à leurs structures géométriques qui peuvent être classées en deux grandes familles (configurations verticale et planaire), mais aussi aux performances des matériaux TE utilisés [4]. Les configurations verticales qui permettent de fournir plus de puissance sont les plus répandues. Elles

utilisent souvent des matériaux TE plus performants, tels que les alliages de Bismuth et d'Antimoine [5]. Cependant, ces matériaux sont coûteux à élaborer, peu compatibles avec les technologies Silicium et sont très polluants pour l'environnement. Les structures planaires, exploitant des thermoéléments en couches minces, présentent l'avantage de permettre l'adaptation thermique des  $\mu$ TEGs à leur environnement du fait de leurs valeurs de résistance thermique assez élevées et ajustables [6], [7].

L'objectif de ce travail est de présenter des résultats de modélisation de tels  $\mu$ TEGs planaires qui utilisent de longs TCs en poly-Silicium/or (pSi/Au), fabriqués par des technologies low-cost et eco-friendly. L'optimisation de la structure géométrique des  $\mu$ TEGs, à l'aide du logiciel COMSOL<sup>®</sup> consiste à maximiser le gradient de température générée entre les jonctions des TCs qui constituent la thermopile afin de maximiser la puissance électrique délivrée par les modules.

## 2. DESCRIPTION DES $\mu$ TEGS

Les deux grandes familles de convertisseurs TE évoqués plus tôt, se distinguent principalement par la disposition des TCs: configurations verticale et planaire comme illustré sur la Figure 1. Dans la configuration verticale, les thermoéléments sont disposés perpendiculairement aux surfaces planes de

deux substrats en contact avec les sources de températures (Figure 1.a). De manière générale, les deux thermoéléments constituant chaque TC (appelés A et B sur la figure) sont constitués avec le même matériau semi-conducteur TE mais alternativement dopés N et P [5]. La configuration planaire utilise une thermopile plane, ensemble de TCs en série (Figure 1.b), généralement sous forme de serpentín, qui exploite les gradients de température dans le plan d'une structure suspendue très fine. Ceci permet d'obtenir des résistances thermiques élevées et ajustables en fonction de la longueur des membranes et des TCs [7]. L'originalité du module TE que nous fabriquons et que nous modélisons ici, repose sur une structuration semi 3D qui utilise un concentrateur de chaleur pour la canaliser vers la moitié des jonctions (chaudes) et un dissipateur pour évacuer la chaleur par l'autre moitié des jonctions (froides) de la thermopile (Figure 1.b).

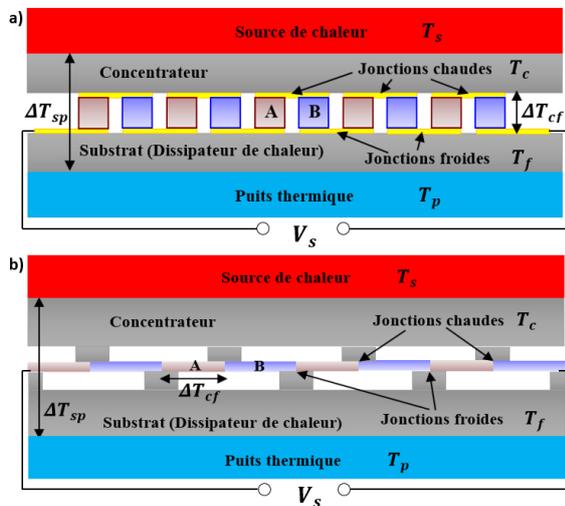


Figure 1. Topologies des  $\mu$ TEGs: a) verticale; b) planaire.

Lorsque le concentrateur est en contact avec une source de chaleur et le dissipateur avec un puits thermique respectivement aux températures  $T_s$  et  $T_p$ , une différence de température  $\Delta T_{cf}$  est créée entre les jonctions successives de chaque TC constituant la thermopile. Ce déséquilibre thermique entre les jonctions des matériaux TE entraîne une diffusion des porteurs de charge libres (électrons ou trous) et génère une tension électrique, proportionnelle à la différence de température, définie par l'effet Seebeck. La tension globale aux bornes de la thermopile est:

$$V_s = N\alpha_{AB}(T_c - T_f) \quad (1)$$

où  $N$  désigne le nombre de TCs,  $\alpha_{AB}$  le coefficient de Seebeck de chaque TC (ou pouvoir TE) relatif aux deux thermoéléments A et B,  $T_c$  et  $T_f$  sont les températures respectivement des jonctions chaudes et froides (Figure 1).

### 3. STRUCTURE DU $\mu$ TEG

La configuration de  $\mu$ TEG planaire que nous réalisons à l'IEMN (surface totale  $\sim 5,7 \times 6 \text{ mm}^2$ )

modélisée dans ce travail est composée de deux partie (cf. Figure 2):

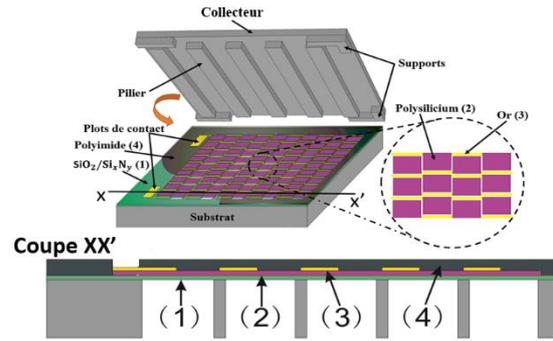


Figure 2. Structure d'un  $\mu$ TEG à 5 membranes.

- Sa partie inférieure constituée d'un ensemble de  $N_m$  membranes creusées et libérées dans un substrat de Silicium (Si orienté (100) et d'épaisseur  $380 \mu\text{m}$ ). Ces  $N_m$  membranes gravées périodiquement sont réalisées à l'aide d'une bicouche  $\text{SiO}_2/\text{Si}_x\text{N}_y$  à faible contrainte (obtenue par compensation de contrainte des deux couches de  $800$  et  $600 \text{ nm}$ ) qui assure la tenue mécanique de l'ensemble de la structure. Une thermopile constituée d'une piste réalisée en poly-Silicium ( $\sim 550 \text{ nm}$ ) est déposée sous forme de serpentín. Le second thermoélément en or (épaisseur  $200 \text{ nm}$ ) est plaqué périodiquement sur les pistes de pSi [8]. Enfin une couche de polyimide (épaisseur  $15 \mu\text{m}$ ) est utilisée pour la passivation et l'isolation électrique de la thermopile. Pour une largeur de piste pSi donnée de  $50 \mu\text{m}$  (exemple typique), on dénombre une quantité de TCs proportionnelle au nombre de membranes  $N = 144 \times N_m$  (compte tenu de la surface occupée par la thermopile). Le coefficient de Seebeck  $\alpha_{AB}$  et de l'ordre de  $100$  à  $300 \mu\text{V/K}$  (fonction du niveau de dopage de pSi).

- La seconde partie du module TE correspond au concentrateur (surface  $\sim 5,2 \times 5,7 \text{ mm}^2$ , épaisseur  $380 \mu\text{m}$ ) en Silicium est constitué par un ensemble de  $N_m$  piliers (épaisseur  $200 \mu\text{m}$ , longueur  $\sim 5,1 \text{ mm}$ , et largeur optimisée en fonction de  $N_m$  dans ce travail). Ceux-ci permettent de canaliser le flux thermique capté, à la surface du concentrateur, vers le puits thermique à travers les membranes (leur contact avec la membrane est situé au niveau des jonctions chaudes de la thermopile).

Quatre supports de maintien mécanique (bossages) situés aux 4 coins du concentrateur sont utilisés pour assurer un appui rigide de concentrateur sur le substrat et éviter la rupture des membranes. La fraction du flux thermique incident qui est perdue via les 4 bossages (c.à.d. sans passer par les membranes) est directement proportionnelle à la surface de contact totale entre ces bossages et le wafer dissipateur. Cette surface de contact doit être la plus petite possible pour minimiser ces pertes latérales mais un compromis doit être fait pour ne pas trop fragiliser le  $\mu$ TEG (surface trop petite), expérimentalement, cette surface a été fixée à  $1,2 \text{ mm}^2$  [7], [8].

Dans ce qui suit, pour la modélisation, le contact thermique entre les deux parties (le concentrateur et

la partie inférieure aux 4 bossages et aux  $N_m$  piliers) est assimilé à une lame d'air d'épaisseur  $10 \mu\text{m}$  et d'une conductivité thermique de  $0.031 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Par ailleurs, la membrane, dont la constitution est complexe, est assimilée dans le modèle à 2 couches continues: 1) la couche de polyimide et 2) une couche continue uniforme «équivalente thermique» des pistes pSi/Au et de la couche  $\text{SiO}_2/\text{Si}_x\text{N}_y$ , d'une épaisseur  $e_{eq}$  et d'une conductivité thermique équivalente  $\lambda_{eq}$ . Dans ce cas, on peut montrer que le produit  $\lambda_{eq}e_{eq}$  est donné par la relation:

$$\lambda_{eq}e_{eq} = \lambda_{\text{SiO}_2}e_{\text{SiO}_2} + \lambda_{\text{Si}_x\text{N}_y}e_{\text{Si}_x\text{N}_y} + \lambda_{\text{polysil}}e_{\text{polysil}} \frac{l_{\text{polysil}}+l_{\text{Au}}}{l_{\text{polysil}}+l_{\text{Au}}+2i} + \lambda_{\text{Au}}e_{\text{Au}} \frac{l_{\text{Au}}}{l_{\text{polysil}}+l_{\text{Au}}+2i} \quad (2)$$

où  $\lambda_{\text{SiO}_2}e_{\text{SiO}_2}$ ,  $\lambda_{\text{Si}_x\text{N}_y}e_{\text{Si}_x\text{N}_y}$ ,  $\lambda_{\text{polysil}}e_{\text{polysil}}$ ,  $\lambda_{\text{Au}}e_{\text{Au}}$  représentent le produit des conductivités thermiques et les épaisseurs des couches  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_x\text{N}_y$ , pSi et l'or respectivement.  $l_{\text{polysil}}$ ,  $l_{\text{Au}}$  et  $i$  sont les largeurs des pistes pSi/Au et d'interpiste respectivement.

Le tableau suivant résume les valeurs numériques typiques des paramètres des couches constituant la membrane.

$\lambda_{\text{SiO}_2}$	$1.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\lambda_{\text{polyimide}}$	$0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{Si}_x\text{N}_y}$	$13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$l_{\text{polysil}}$	$50 \mu\text{m}$
$\lambda_{\text{polysil}}$	$31.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$l_{\text{Au}}$	$10 \mu\text{m}$
$\lambda_{\text{Au}}$	$180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$i$	$5 \mu\text{m}$

**Tableau.** Paramètres des couches constituant la membrane [8].

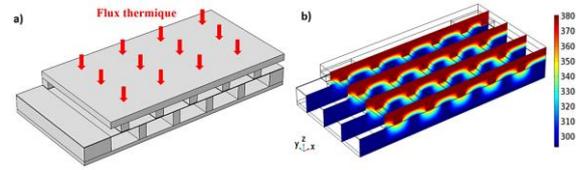
Considérer une couche équivalente permet de s'affranchir des difficultés de maillage et de convergence du calcul inhérentes à la prise en compte des couches trop fines (cas de pSi/Au et  $\text{SiO}_2/\text{Si}_x\text{N}_y$ ).

#### 4. RESULTATS DE SIMULATION 3D

L'optimisation des performances de ces  $\mu\text{TEGs}$  nécessite de trouver les dimensions structurales optimales en fonction des matériaux utilisés et du nombre de membranes  $N_m$  de la configuration. Pour ce faire, la structure 3D de chaque  $\mu\text{TEG}$  est optimisée à l'aide de simulations thermiques sous le logiciel de modélisation par éléments finis COMSOL<sup>®</sup>. Celui-ci permet d'étudier la distribution de température au sein du  $\mu\text{TEG}$ . La symétrie de la structure permet de ne modéliser que la moitié du  $\mu\text{TEG}$  (cf. Figure 3.a), afin d'optimiser le temps et la précision des calculs.

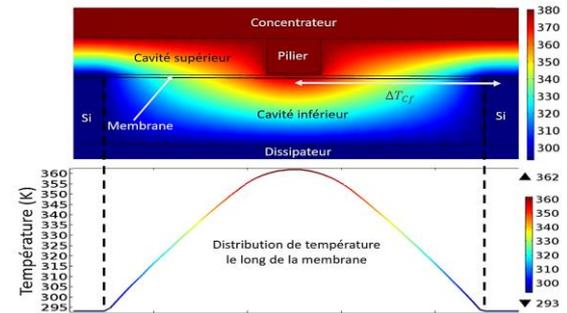
La Figure 3.b montre une illustration de distribution de la température sur le demi structure d'un  $\mu\text{TEG}$  à  $N_m = 5$  membranes. Un flux thermique de  $3.3 \text{ W}/\text{cm}^2$  est appliqué sur la surface du concentrateur (surface  $\sim 0.3 \text{ cm}^2$ ), correspondant à une puissance thermique injectée de  $1 \text{ W}$ . Une partie de flux incident est perdu par convection naturelle entre la surface de concentrateur et le milieu ambiant. Une autre partie l'est au travers des bossages. La température de surface inférieure de dissipateur est fixée à  $20 \text{ °C}$  (égale à la température ambiante).

Le flux thermique qui traverse les  $N_m$  piliers du concentrateur, vers les membranes, crée des gradients de température périodique entre les jonctions de chaque TC constituant la thermopile, comme le montre la Figure 3.b. A titre d'exemple, les résultats de simulation correspondant à ce  $\mu\text{TEG}$  et ces conditions de flux permettent de calculer que la différence de température générée entre les jonctions chaudes et froides  $\Delta T_{cf}$  est de l'ordre de  $68 \text{ K}$ , tandis que celle entre la surface du concentrateur et dissipateur elle est de près de  $87 \text{ K}$ . Ainsi, au vu de l'équilibre thermique obtenu, cette simulation montre qu'une grande partie de la chaleur incidente a transité au travers des 5 membranes et va être profitable à la thermogénération. Dans ce cas de figure, la tension de Seebeck générée (relation (1)) serait  $V_S = 9.8 \text{ V}$  (cas  $\alpha_{AB} = 200 \mu\text{V}/\text{K}$  et sachant que  $N = 144 \times N_m$ ).



**Figure 3.** a) Structure de simulation d'un demi  $\mu\text{TEG}$  à 5 membranes; b) Distribution de la température pour un flux thermique incident de  $3.3 \text{ W}/\text{cm}^2$ .

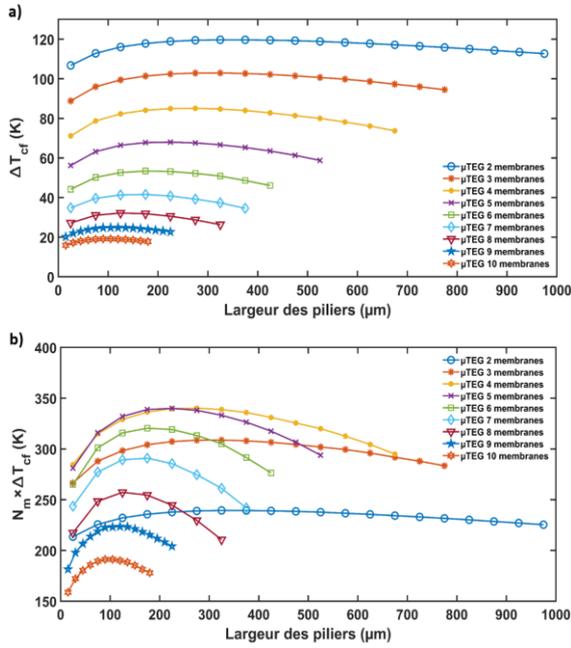
Le profil transversal de distribution de la température, vue entre deux jonctions chaude-froide consécutive de thermopile, est présenté sur la Figure 4. On constate une cartographie homogène de la température au niveau du concentrateur et du substrat due à la forte conductivité thermique de Silicium ( $140 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Par ailleurs, la cartographie souligne bien l'efficacité des cavités d'air situées de part et d'autre de chaque membrane: elles permettent d'isoler thermiquement les jonctions chaudes et froides (claire variation de température le long de membrane).



**Figure 4.** Coupe 2D symétrique vue entre deux jonctions consécutives de thermopile et distribution de la température le long de la membrane.

Nous présentons dans les Figures 5.a et 5.b les résultats de simulations obtenus sous COMSOL<sup>®</sup> de l'évolution du gradient de température aux bornes de chaque TC,  $\Delta T_{cf}$ , et du produit  $N_m \times \Delta T_{cf}$  en fonction de la largeur des piliers pour différentes configurations de  $\mu\text{TEGs}$ , constitués de  $N_m = 2$  jusqu'à  $N_m = 10$  membranes, avec des largeurs des membranes variant de  $2300$  à  $300 \mu\text{m}$

(respectivement 2 à 10 membranes). La quantité  $N_m \times \Delta T_{cf}$  est intéressante à calculer et à analyser car elle est directement proportionnelle à  $V_S$  la tension Seebeck mesurée aux bornes de la thermopile, et donc elle permet de déduire la puissance maximale générée par le module:  $P_{max} = V_S^2/4R_{int}$  (à largeur de piste pSi constante, la résistance électrique interne du module  $R_{int}$  est identique quel que soit  $N_m$ ).



**Figure 5.** a) Gradient de température  $\Delta T_{cf}$  et b)  $N_m \times \Delta T_{cf}$  en fonction de largeur des piliers pour un  $\mu$ TEG à 2 jusqu'à 10 membranes.

La Figure 5.a montre que le gradient thermique  $\Delta T_{cf}$  diminue lorsque le nombre de membranes  $N_m$  augmentent. Pour le module TE à 2 membranes le maximum est de l'ordre de 120 K tandis qu'il est de 20 K pour un module à 10 membranes. En effet, lorsque  $N_m$  augmente, les longueurs des TCs diminue, et cela résulte en une résistance thermique de  $\mu$ TEG qui diminue, ce qui explique la diminution de  $\Delta T_{cf}$  à flux thermique incident constant. Pour les deux figures 5.a et 5.b la simulation numérique montre que cette évolution de  $\Delta T_{cf}$  admet un optimum qui est fonction de la largeur des piliers du concentrateur. Ceci s'explique par le fait que lorsque l'on augmente la largeur des piliers, leur surface de contact avec les membranes augmente; augmentant de ce fait la fraction de flux incident qui traverse les membranes (au détriment des bossages). Ce flux thermique canalisé dans les membranes augmentés résulte en un accroissement de  $\Delta T_{cf}$ . Cependant, au-delà d'une certaine largeur, la résistance thermique de la membrane (liée à la dimension des cavités) diminue fortement ce qui entraîne ensuite la diminution de  $\Delta T_{cf}$ .

Toutes choses étant égale par ailleurs, avec ce travail nous montrons via la Figure 5.b que les meilleures configurations  $\mu$ TEGs sont obtenues avec des modules constitués de 4 ou 5 membranes

( $N_m \times \Delta T_{cf}$  maximum) et une largeur des piliers de 225  $\mu$ m. Ceci sera pris en compte pour les réalisations technologiques à venir.

## CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté une partie des résultats de simulations thermique effectuées sous COMSOL<sup>®</sup> afin d'améliorer les performances de nos  $\mu$ TEGs en optimisant les transferts de chaleur dans la structure. Nous montrons que la différence de température générée aux bornes de la thermopile admet un maximum pour les configurations de  $\mu$ TEGs à 4 et 5 membranes avec une largeur optimale des piliers de 225  $\mu$ m. Ces premiers résultats numériques devraient être suivis d'autres études d'amélioration sous COMSOL<sup>®</sup> avec d'autres dimensionnements et confrontation avec les résultats expérimentaux.

## REFERENCES

- [1] M. Haras and T. Skotnicki, "Thermoelectricity for IoT – A review," *Nano Energy*, vol. 54, pp. 461–476, Dec. 2018.
- [2] O. H. Ando Junior, A. L. O. Maran, and N. C. Henao, "A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 376–393, Aug. 2018.
- [3] M. Zhou, M. S. H. Al-Furjan, J. Zou, and W. Liu, "A review on heat and mechanical energy harvesting from human – Principles, prototypes and perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 3582–3609, Feb. 2018.
- [4] K. V. Selvan, M. N. Hasan, and M. S. Mohamed Ali, "Methodological reviews and analyses on the emerging research trends and progresses of thermoelectric generators," *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 113–140, Jan. 2019.
- [5] J. Yan, X. Liao, D. Yan, and Y. Chen, "Review of Micro Thermoelectric Generator," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–18, Feb. 2018.
- [6] K. Ziouche, Z. Yuan, P. Lejeune, T. Lasri, D. Leclercq, and Z. Bougrioua, "Silicon-Based Monolithic Planar Micro Thermoelectric Generator Using Bonding Technology," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 45–47, Feb. 2017.
- [7] Z. Yuan, K. Ziouche, Z. Bougrioua, P. Lejeune, T. Lasri, and D. Leclercq, "A planar micro thermoelectric generator with high thermal resistance," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 221, pp. 67–76, Jan. 2015.
- [8] Z. Yuan, "Étude et réalisation de microgénérateurs thermoélectriques planaires en technologie silicium," Université de Lille, France, 2012.