

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique
Spécialité microélectronique

présenté par

Bouamama Ferial

&

Sefiaoui Fatima

Étude et simulation d'un micro-réchauffeur pour capteur de gaz

Proposé par : Mr Bounemri.A

Année Universitaire 2019-2020

Remerciement

Nos premiers remerciements vont à ALLAH le Tout Puissant.

C'est avec grand plaisir que nous réservons cette page, en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés à la réalisation de ce travail.

Le travail présenté dans ce manuscrit est réalisé au sein du

Département de Microélectronique de l'Université Saad Dahlab de Blida

*Nous remercions Mr **BOUNEMRI** notre promoteur pour son grande disponibilité, son rigueur et professionnalisme qui n'a eu de cesse de nous inspirer et aussi pour la confiance qu'il nous a accordée en proposant ce travail.*

*De même, nous exprimons notre profonde gratitude au chef spécialisé Mr **NACER** pour sa confiance, son soutien et ses précieux conseils.*

Nous remercions vivement les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner notre travail.

Nous n'oublions pas non plus de remercier l'université de nous avoir donné cette opportunité de mettre en œuvre nos connaissances acquises durant notre parcours éducatif. Nous sommes reconnaissants aussi à tous nos amis pour leur dévouement et leur amitié sans faille, ils nous ont beaucoup soutenus moralement.

Nous voudrions exprimer à nos proches toute notre gratitude : nos chers grands parents, nos très chers parents, nos frères et nos sœurs, nos oncles et nos tantes. Sans leur amour, leur soutien, leur confiance et leurs encouragements.

Merci à toutes les personnes ayant suivi de près ou de loin notre travail.

Dédicace

J'ai le plaisir de dédier le fruit de notre étude à :

Mes parents, qui ont œuvré pour ma réussite, de par leurs amours, leurs soutiens, leurs sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour toute leur assistance et leur présence dans notre vie, reçoivent à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de nos sentiments et de gratitude.

A mes adorables sœurs Imene et Yasmine et mon frère Billel

Pour vos encouragements continus, j'espère que j'étais un bon exemple pour vous et que vous aurez fait plus que moi. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, santé et de réussite.

A mon adorable binôme ; Fatima

Avec qui j'ai passé de bonnes années d'études et qui a enduré avec moi toutes les difficultés de ce travail ainsi qu'à toute sa famille.

A tous les membres de ma famille ;

Que je ne pourrais nommer de peur d'oublier. Mon affection et ma tendresse les plus sincères.

A ma chère cousine Loujaine avec qui j'ai partagé de belles années de complicité.

Ames chères Lina Amira et Seif El Dine.

Ames chères amies Damia; Ferial; Salima, pour les sympathiques moments qu'on a passés ensemble.

A ma promotion et tous les étudiants de micro-électronique.

Feriel Bouamama

Dédicace

Cela me fait grand plaisir et avec un cœur ouvert de dédier cet humble travail à:

- Dans la mémoire de ma grand-mère, les mots ne pourront pas exprimer ma grande tristesse en votre absence, votre visage souriant, votre gentillesse, votre amour incomparable, resteront gravés à jamais dans mon cœur, je vous dédie mon travail, ma grand-mère, que votre âme repose en paix.

À ceux qui m'ont donné la vie, source de mon amour et de ma tendresse, à ma chère mère, qui m'a toujours rempli de sa douceur et de son affection, m'a aidé et m'a soutenu.

- Pour ma chronique, mon père bien-aimé, dans lequel je suis et je serai toujours reconnaissant d'avoir toujours cru en moi et de nous avoir donné la force et les moyens d'aller loin et d'y arriver.

Ce travail est le fruit de vos prières, de vos efforts pour ma réussite, les mots ne parviennent pas à vous exprimer ma gratitude sans fin. Je demande à Dieu tout-puissant de vous aider avec sa sainte miséricorde, sa santé et sa longue vie, afin que je puisse vous combler. je vous aime beaucoup.

- A mes frères, ma sœur et son mari, vos conseils et vos encouragements m'ont donné la force de continuer jusqu'au bout.

- À mon partenaire bien-aimé, Ferial, au nom de notre belle amitié, pour tous les souvenirs qui nous unissent, toutes nos joies et nos peines, je vous dédie ce travail qui est le fruit de nos efforts.

À ma chère amie, Marwa, avec qui j'ai partagé de nombreuses années de liaison

À mon cher ami yakoub.

- À toute ma famille, mes sœurs et mon frère Aziz Oussama.

À mes amis qui ont toujours été là pour moi.

A tous ceux qui m'est cher et que j'ai oublié de mentionner

Fatima Safiaoui

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I. Notion de base sur les micro-réchauffeurs

I.1 Introduction.....	3
I.2 La nécessité physique du micro-réchauffeur dans la structure d'un.....	4
capteur de gaz à oxyde métallique	
I.2.1 Matériaux pour la réalisation d'un micro-réchauffeur.....	5
I.3 Caractéristique principales d'un micro-réchauffeur.....	5
I.3.1 Le chauffage uniforme.....	6
I.3.2 La faible consommation d'énergie.....	6
I.3.3 La stabilité mécanique.....	6
I.4 Equations électriques du micro-réchauffeur.....	6
I.4.1 Puissance électrique (P).....	7
I.4.2 Densité de courant (J).....	7
I.4.3 Conductivité électrique (σ).....	8
Conclusion.....	9

Chapitre II. Etapes de modalisation du micro-réchauffeur sous logiciel COMSOL

II.1 Introduction au logiciel de simulation comsol multiphysics.....	10
II.2 Etapes de modélisation du micro-réchauffeur.....	11
II.2.1 Géométrie du modèle.....	11
II.2.2 Matériaux constituant le modèle.....	12
II.2.3 Etats physiques intervenant dans le modèle.....	13
II.2.4 Maillage.....	16
II.2.5 Etude.....	17
Conclusion.....	18

Chapitre III. Résultats et analyses des modèles simulés

III.1 Simulation et analyse du modèle 1.....	18
III.1.1 Ruban d'épaisseur $e_p = 0.01$ mm.....	18
III.1.2 Ruban d'épaisseur 0.05 mm.....	20

III.1.3 Ruban d'épaisseur 0.1 mm.....	21
III.1.4 Ruban d'épaisseur 0.01 mm et de largeur 0.2 mm.....	22
III.2 Simulation et analyse du modèle 2.....	23
III.3 Simulation et analyse du modèle 3.....	25
III.4 Simulation et analyse de certains modèles.....	27
III.5 Simulation du micro-réchauffeur en polysilicium sur la plaque en oxyde.....	30
de zinc	
Conclusion.....	33

Conclusion générale

Liste des figures

Figure I.1 : Emplacement du micro-réchauffeur dans la structure d'un capteur de gaz à oxyde métallique.....	3
Figure I.2 : Caractéristiques des matériaux utilisés dans la conception des micro-réchauffeurs.....	5
Figure I.3 : Forme géométrique de micro-réchauffeur.....	6
Figure II.1 : Bureau Comsol.....	9
Figure II.2 : Structure d'un modèle de micro-réchauffeur étudié en simulation.....	11
Figure II.3 : Choix des matériaux constituant le modèle simulé.....	11
Figure II.4 : Encastrement de la plaque chauffante simulé grâce au module mécanique du solide.....	12
Figure II.5 : Connexion d'un générateur courant continu aux bornes du micro-réchauffeur.....	13
Figure II.6 : Application de la physique de transfert de chaleur dans les solides sur le modèle.....	14
Figure II.7 : Application d'un maillage « Normal » sur une structure.....	14
Figure II.8 : Etudes proposées par Comsol.....	15
Figure II.9 : Choix d'une étude stationnaire avec analyse paramétrique.....	15
Figure III.1 : Micro-réchauffeur sous forme de ruban linéaire.....	18
Figure III.2 : Diffusion en surface de la chaleur exprimée en Kelvin.....	19
Figure III.3 : Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique V_p ($ep = 0.01$ mm).....	19
Figure III.4 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique V_p ($ep = 0.01$ mm).....	19
Figure III.5: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique V_p ($ep = 0.05$ mm).....	20
Figure III.6 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique V_p ($ep = 0.05$ mm).....	20
Figure III.7: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique V_p ($ep = 0.1$ mm).....	21
Figure III.8 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique V_p ($ep = 0.1$ mm).....	21

Figure III.9: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique.....	22
Vp (ruban d'épaisseur 0.01 mm et de largeur 0.2 mm)	
Figure III.10 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique.....	22
Vp (ruban d'épaisseur 0.01 mm et de largeur 0.2 mm)	
Figure III.11 : Modèle du micro-réchauffeur en « serpentín ».....	22
Figure III.12 : Diffusion de chaleur en surface du micro-réchauffeur en « serpentín ».....	23
Figure III.13: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique.....	23
Vp (micro-réchauffeur en « serpentín »)	
Figure III.14 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique.....	23
Vp (micro-réchauffeur en « serpentín »)	
Figure III.15 : Modèle du micro-réchauffeur en U.....	24
Figure III.16 : Diffusion de chaleur en surface du modèle en U.....	24
Figure III.17 : Variation de la température en fonction du potentiel d'alimentation.....	26
Vp du modèle en U	
Figure III.18 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique.....	26
Vp du modèle en U	
Figure III.19 : Variation de la température en fonction de Vp.....	30
(Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.01 mm)	
Figure III.20 : Variation de l'énergie électrique en fonction de Vp.....	30
(Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.01 mm)	
Figure III.21 : Variation de la température en fonction de Vp.....	31
(Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.05 mm)	
Figure III.22 : Variation de l'énergie électrique en fonction de Vp.....	31
(Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.05 mm)	
Figure III.23 : Variation de la température en fonction de Vp.....	32
(Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.1mm)	
Figure III.24 : Variation de l'énergie électrique en fonction de Vp.....	32
(Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.1 mm)	

Liste des tableaux

Tableau I.1 : limite de température de certaines surfaces de détection d'oxyde métallique.....4 utilisées dans les capteurs de gaz	
Tableau III.1 : Différents modèles à plaques.....	27
Tableau III.2 : Variation de la température en fonction du potentiel V_p28 pour différents modèles en plaques	
Tableau III.3 : Variation de l'énergie électrique en fonction du potentiel V_p29 pour différents modèles en plaques	

ملخص

تم فحص السخانات الدقيقة على نطاق واسع بسبب تطبيقاتها الواسعة في مستشعرات الغاز، وأجهزة استشعار معدل التدفق والأنظمة الدقيقة الأخرى. تمت دراسة التحسين الهندسي للسخان الدقيق من خلال محاكاة مجموعة واسعة من الأشكال الهندسية الممكنة باستخدام COMSOL، وهي حزمة تجارية لتحليل العناصر المحدودة (FEA) يتم تقديم النتائج المحاكاة للسخانات الدقيقة التي لها توزيع محسن لدرجة الحرارة على منطقة الاستشعار وكثافة أعلى للتكامل في هذه العلاقة. تم تصميم السخانات الدقيقة لضمان استهلاك منخفض للطاقة، وكتلة حرارية منخفضة وتوحيد أفضل لدرجة الحرارة. في هذه العلاقة، قدمنا بعض الأنماط المختلفة للسخانات الدقيقة مع ملف تعريف درجة الحرارة الكهرو حراري. بالنسبة لنفس جهد الإمداد المطبق، يتم تحليل ملف تعريف درجة الحرارة الموحد واستهلاك الطاقة للسخان لجميع الأنماط ومقارنتها.

Résumé

Les micro-réchauffeurs ont été largement étudiés en raison de leurs applications étendues dans les capteurs de gaz, les capteurs de débit et d'autres microsystèmes. L'optimisation géométrique du micro-réchauffeur a été étudiée en simulant une large gamme de géométries possibles à l'aide de COMSOL, un package commercial d'analyse par éléments finis (FEA). Les résultats simulés de micro-réchauffeurs ayant une distribution de température améliorée sur la zone de détection et une densité d'intégration plus élevée sont présentés dans ce rapport. Les micro-réchauffeurs sont conçus pour assurer une faible consommation d'énergie, une faible masse thermique et une meilleure uniformité de la température. Dans ce rapport, nous avons présenté différents modèles de micro-réchauffeurs avec leur profil de température simulé électrothermique. Pour la même tension d'alimentation appliquée, le profil de température uniforme et la consommation électrique du réchauffeur sont analysés pour tous les modèles et comparés.

Abstract

Microheaters have been widely investigated because of their extensive applications in gas sensors, flow rate sensors and other Microsystems. The geometric optimization for the microheater was studied by simulating a wide range of possible geometries using COMSOL, a commercial Finite Element Analysis (FEA) package. The simulated results of Microheaters having an improved temperature distribution over the sensing area and a higher density of integration is presented in this rapport. The microheaters are designed to ensure low power consumption, low thermal mass and better temperature uniformity. In this work we have presented some different patterns of microheater with their Electro thermal simulated temperature profile. For the same supply voltage applied, the uniform temperature profile and the power consumption of the heater is analyzed for all the patterns and compared.

INTRODUCTION GENERALE

De nombreux gaz utilisés dans les industries pourraient être mortels pour les humains. Il est donc d'une importance capitale de les détecter et de les surveiller en dehors de la zone de travail. Dans ce but, beaucoup d'efforts ont été consacrés à la détection et à la surveillance des gaz utilisés dans l'industrie. La pollution de l'air par divers gaz offensifs a été un grave problème dans la vie moderne. La détection de gaz est importante car elle est nécessaire dans de nombreux domaines différents, on peut citer par exemple, le contrôle des émissions industrielles, la sécurité des ménages, le contrôle des émissions des véhicules et la surveillance de l'environnement. Le gaz méthane (CH₄) affecte le réchauffement climatique vingt fois plus sévèrement que le gaz carbonique (CO₂). Il est explosif, en raison de sa grande volatilité et de son inflammabilité dans l'air et dans les zones fermées, le gaz méthane peut provoquer une suffocation. Le contrôle et la surveillance du CO revêt une grande importance dans les domaines environnemental et industriel. De même, le gaz ammoniac (NH₃) est produit et largement utilisé dans de nombreuses industries chimiques, usines d'engrais, systèmes de réfrigération, transformation des aliments, diagnostic médical, centrales d'incendie. Une fuite dans le système peut entraîner des risques pour la santé. L'ammoniac est toxique pour l'homme à partir d'une certaine concentration. L'exposition à l'ammoniac provoque des maladies pulmonaires chroniques, irritantes et même brûlantes des voies respiratoires. La pollution de l'environnement est un problème mondial brûlant.

Dans de nombreux aspects de la vie d'aujourd'hui, l'utilisation de capteurs de gaz devient de plus en plus importante. Pour évaluer les performances des capteurs de gaz, plusieurs indicateurs doivent être considérés:

- La sensibilité, qui est définie comme la valeur minimale de la concentration volumique des gaz cibles lorsqu'ils pourraient être détectés.
- La sélectivité, c'est la capacité des capteurs de gaz à identifier un gaz spécifique parmi un mélange gazeux.
- Le temps de réponse, c'est la période entre le moment où la concentration de gaz atteint une valeur spécifique et celle où le capteur génère un signal d'avertissement.
- La consommation d'énergie.
- La réversibilité, elle définit la capacité des matériaux de détection (utilisés par le capteur) à revenir à leur état d'origine après détection.
- La capacité d'adsorption (affecte également la sensibilité et la sélectivité),
- La fabrication en termes de coût.

La détection de gaz peut être effectuée par un large éventail de principes physiques, chimiques, électrochimiques et optiques [1]. De manière générale, pour la surveillance des gaz, différents types de systèmes de capteurs peuvent être utilisés: spectroscopiques, optiques et à semi-conducteurs sont les trois principales familles de capteurs de gaz. Les systèmes spectroscopiques sont ceux basés sur l'analyse directe des propriétés fondamentales des gaz, telles que la masse moléculaire ou le spectre vibratoire. Les systèmes de capteurs optiques sont basés sur la mesure des spectres d'absorption après stimulation lumineuse. Les oxydes métalliques sont basés sur le changement des propriétés physiques et / ou chimiques d'un matériau de détection après exposition aux gaz.

Dans le cadre de notre mémoire nous nous intéressons au domaine des capteurs à oxydes métalliques et plus précisément à un élément important dans la conception du capteur.

L'élément est nommé micro plaque chauffante ou micro réchauffeur [2].

Le micro-réchauffeur est le composant principal des capteurs de gaz résistifs pour rendre la couche de détection plus sensible et sélective. Malheureusement, c'est aussi la partie la plus consommatrice d'énergie dans les capteurs de gaz. Par conséquent, la conception et la fabrication parfaites du micro-réchauffeur sont un aspect important.

Les micro-réchauffeurs dans les capteurs de gaz sont essentiellement des faisceaux résistifs qui peuvent atteindre une température de 300° C à 500° C en raison du chauffage par effet joule, lorsqu'une tension suffisante est appliquée aux extrémités.

La conception des micro-radiateurs est optimisée pour :

- une faible consommation d'énergie.
- une faible dilatation thermique.
- une meilleure uniformité de la température à travers l'appareil.
- une isolation thermique améliorée de l'environnement.

Ces sont ces objectifs qu'on essaye d'atteindre, dans le cadre du travail présenté dans ce mémoire. Pour cela, le mémoire est organisé comme suit:

- Un premier chapitre qui clarifie les notions de base des micro-réchauffeurs.
- Un deuxième chapitre qui établit les étapes de conception utilisées sous le logiciel de simulation Comsol.
- Un troisième chapitre qui présente les différents résultats et leurs analyses.
- Une conclusion générale complète le rapport de travail.

I.1 Introduction

Le capteur de gaz à oxyde métallique nécessite un élément capable de produire une température élevée (250 °C -500 °C) avec une faible consommation d'énergie. C'est le micro-réchauffeur (Figure I.1) ou microplaque, qui est utilisé pour produire ces température élevée des films (couche de matériaux) de détection de gaz.

Les principaux problèmes du micro-réchauffeur pour les applications de détection de gaz d'oxyde métallique sont :

- l'analyse de la distribution de la température sur la couche sensible.
- la sensibilité, qui dépend de la température.
- une bonne stabilité mécanique à des températures élevées.

Pour atteindre les objectifs, qui sont l'optimisation des problèmes cités auparavant, dans la conception du micro-réchauffeur, les caractéristiques thermiques de ce dernier sont optimisées en contrôlant les pertes thermiques, les matériaux diélectriques et la configuration du micro-réchauffeur.

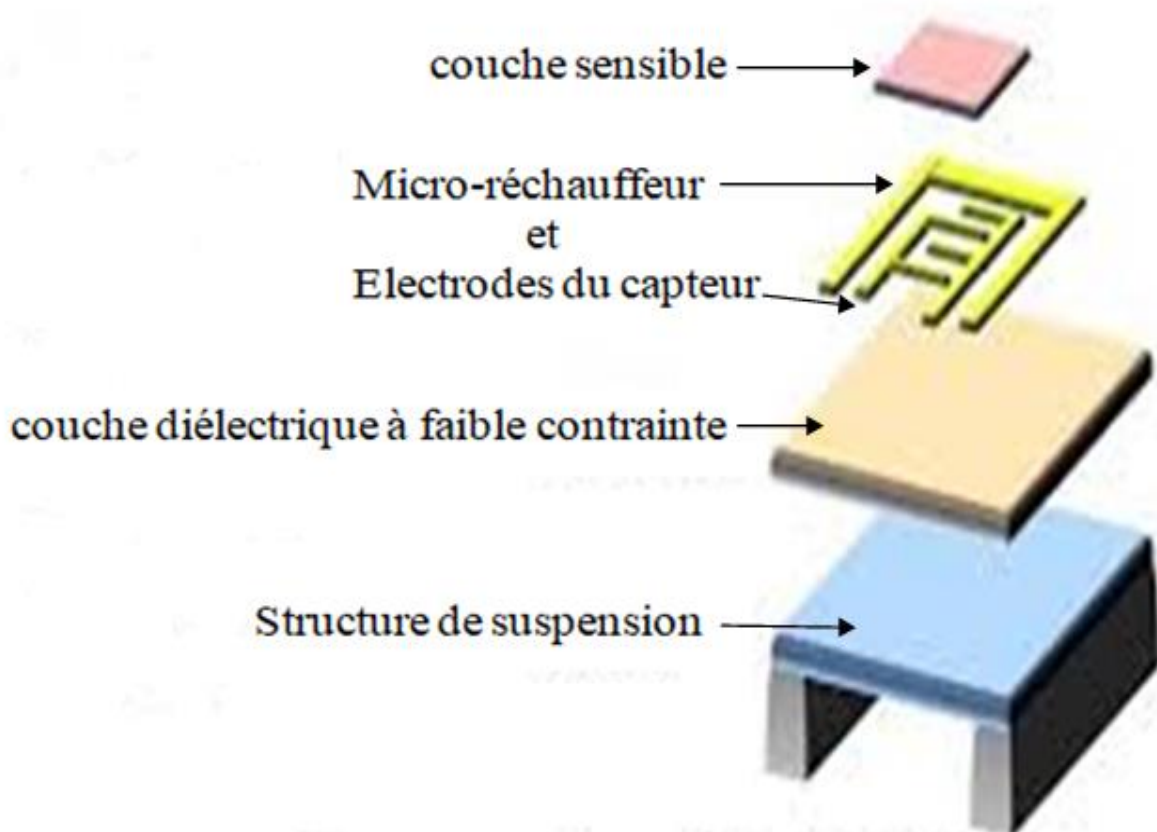


Figure I.1 : Emplacement du micro-réchauffeur dans la structure d'un capteur de gaz à oxyde métallique.

I.2 La nécessité physique du micro-réchauffeur dans la structure d'un capteur de gaz à oxyde métallique

Les micro-réchauffeurs sont les composants clés des micro-capteurs sous-miniatures, en particulier des capteurs de gaz. Les capteurs de gaz à oxyde métallique utilisent les propriétés d'adsorption de surface, au niveau de la couche sensible, pour détecter les changements de résistance en fonction de la concentration variable de différents gaz [3]. Pour détecter les changements résistifs, au niveau des électrodes du capteur, la température du réchauffeur doit être dans la plage de température requise sur la zone de chauffage (Tableau I.1). Par conséquent, la sensibilité et le temps de réponse du capteur dépendent de la température de fonctionnement du micro-réchauffeur.

Leur conception appropriée est donc d'une importance cruciale [4].

Surfaces de détection d'oxydes métalliques	Ecart de température en °C
Oxyde d'étain (SnO_2)	300 °C et moins
Oxyde de zinc (ZnO)	300 °C
Trioxyde de tungstène	Au dessus de 500 °C
L'oxyde d'étain indium	300 °C
Oxyde de titane (TiO_2)	250 °C
Oxyde de cérium (CeO_2)	400 °C

Tableau I.1 : limite de température de certaines surfaces de détection d'oxyde métallique utilisées dans les capteurs de gaz.

I.2.1 Matériaux pour la réalisation d'un micro-réchauffeur

Les matériaux utilisés dans la conception des micro-réchauffeurs doivent posséder des caractéristiques mécaniques et thermiques appropriées à l'application. Certains matériaux avec leur caractéristiques thermomécaniques sont illustrés selon la figure I.2 suivante :

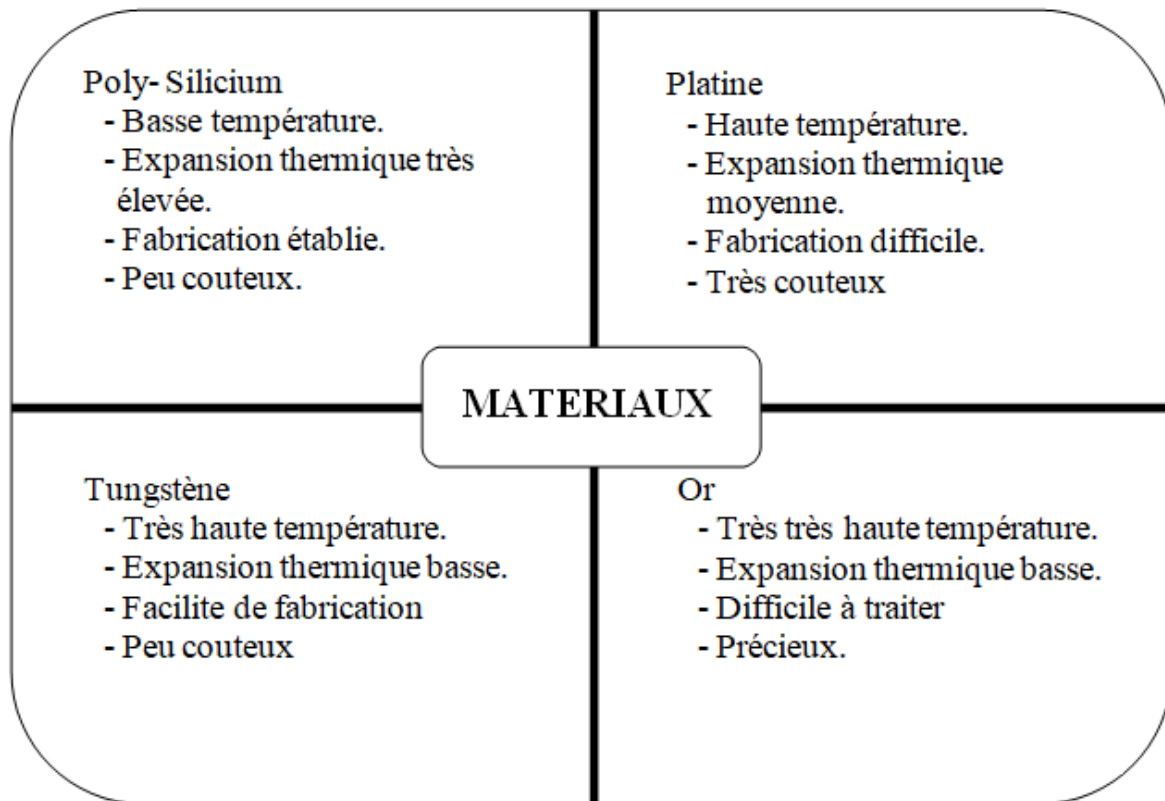


Figure I.2 : Caractéristiques des matériaux utilisés dans la conception des micro-réchauffeurs.

I.3 Caractéristique principales d'un micro-réchauffeur

Lorsqu'on commence une étude pour la conception d'un micro-réchauffeur il faut garder à l'esprit les problèmes suivants :

- Le chauffage uniforme
- La faible consommation d'énergie
- La stabilité mécanique

I.3.1 Le chauffage uniforme

Le chauffage doit être uniforme sur toute la surface. Il ne doit pas y avoir de points chauds et pour un chauffage uniforme, un appareil de chauffage non uniforme qui présente des écarts de bande inégaux peut être utilisé.

En outre, il existe de nombreux types de conception de chauffage parmi lesquels un chauffage approprié doit être choisi en fonction de l'application.

I.3.2 La faible consommation d'énergie

Dans la miniaturisation des appareils, la minimisation de la consommation d'énergie a toujours été un problème car elle devrait être aussi faible que possible. Elle peut être réduite en utilisant une cavité sous le micro-réchauffeur.

I.3.3 La stabilité mécanique

Le matériau utilisé dans la conception du micro-réchauffeur doit être de nature rigide et capable de résister à des températures élevées.

I.4 Equations électriques du micro-réchauffeur

Les modèles de micro-réchauffeur utilisés sont de type « ruban », c'est une couche résistive d'une certaine longueur, d'une certaine épaisseur et d'une certaine largeur (en micromètre) (Figure I.3). Comme le micro-réchauffeur est la source de chauffage de la couche sensible, nous utiliserons l'effet Joule, en simulation, pour le chauffer et atteindre les températures voulues pour l'application.

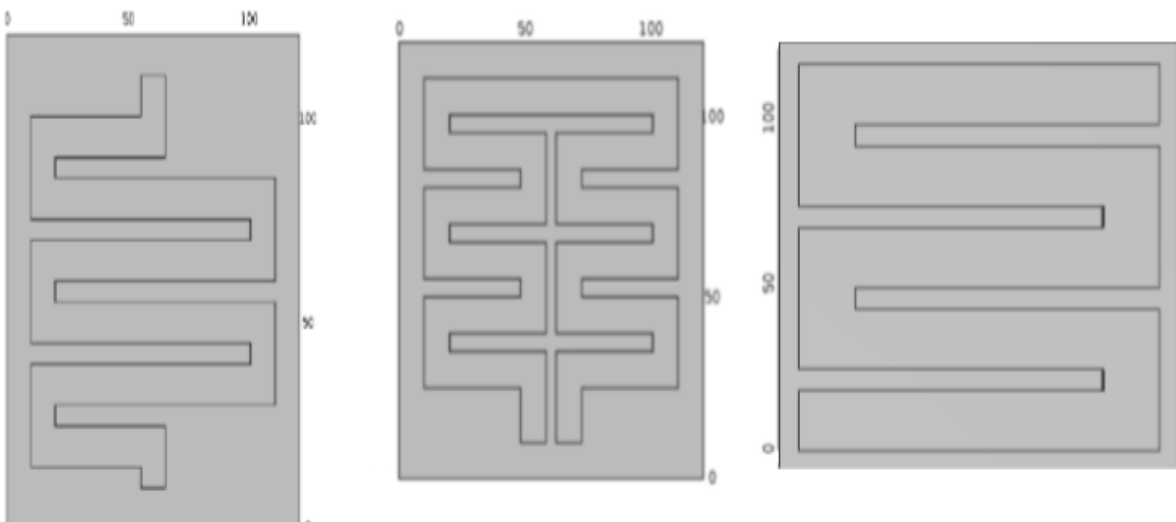


Figure I.3 : Forme géométrique de micro-réchauffeur

I.4.1 Puissance électrique (P)

La puissance électrique (P) développée par le micro-réchauffeur a pour équation :

$$P = R.I^2 \quad (I.1)$$

ou R représente la résistance électrique du matériau définissant le micro-réchauffeur.
et I le courant électrique traversant le micro-réchauffeur.

En utilisant la loi classique de la résistance :

$$R = (\rho.L)/A \quad (I.2)$$

et la loi d'Ohm

$$V = R.I \quad (I.3)$$

avec,

ρ , la résistivité du matériau définissant le micro-réchauffeur.

L, la longueur du micro-réchauffeur.

A, la surface latérale du micro-réchauffeur.

V, la différence de potentiel appliquée entre les bornes du micro-réchauffeur.

On aura alors l'équation de la puissance électrique délivrée par le micro-réchauffeur comme étant une équation dépendante du matériau et des dimension, du micro-réchauffeur :

$$P^2 = (V^2.A)/(\rho.L) \quad (I.4)$$

La puissance est directement proportionnelle a la différence de potentiel entre les bornes du micro-réchauffeur et inversement proportionnelle a sa résistivité.

I.4.2 Densité de courant (J)

La densité de courant de courant [5], du micro-réchauffeur est liée aux caractéristiques matériaux et aux dimensions de ce dernier, elle s'exprime par l'équation suivante :

$$J = V/(R.w.d) \quad (I.5)$$

ou w, représente la largeur du micro-réchauffeur.

et d, l'épaisseur du micro-réchauffeur.

En utilisant les équations (I-2) et (I-4), l'équation (I-5) prend la forme :

$$J = (V.A)/(w.d.\rho.L) = P/(w.d.V) \quad (I.6)$$

La densité de courant est proportionnelle a P est inversement proportionnelle a V.

Elle est dépendante, inversement proportionnelle, des dimensions du micro-réchauffeur.

I.4.3 Conductivité électrique (σ)

Dans une gamme de température la conductivité électrique dépend de la température, elle est exprimée par l'équation [5-6], suivante :

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(T - T_0)} \quad (I.7)$$

ou,

σ_0 , représente la conductivité électrique à la température de référence T_0 .

α , coefficient de température de la résistivité. Il décrit la variation de la résistivité en fonction de la température.

T_0 , la température de référence.

Conclusion

Dans ce chapitre les notions de base du micro-réchauffeur tant mécanique (matériaux) qu'électriques ont été exposées. Ces notions de base seront, par la suite, reprises par le logiciel au niveau de sa modélisation mathématique pour résoudre les équations citées (I.1-I.7) et tracer les caractéristiques du micro-réchauffeur étudié.

II.1 Introduction au logiciel de simulation comsol multiphysics

Le logiciel de simulation comsol multiphysics a été élaboré en suède [7]. Il est utilisé partout Dans le monde par les universités et les laboratoires de recherche. Il contient des pro-logiciels (sous forme de modules) pour le domaine de l'ingénierie et le domaine médical. Le but de ces outils est de créer un environnement virtuel pour une tâche particulière afin d'obtenir des résultats similaires à l'environnement réel. Il possède une variété de modules comme le module AC/DC, le module électrique, le module chimique, le module plasma, le module physique générale et beaucoup d'autres.

Il comprend diverses interfaces et propriétés de différents matériaux. L'utilisateur peut proposer ses propres variables et équations. La fenêtre principale de Comsol est représentée sur la figure II.1.

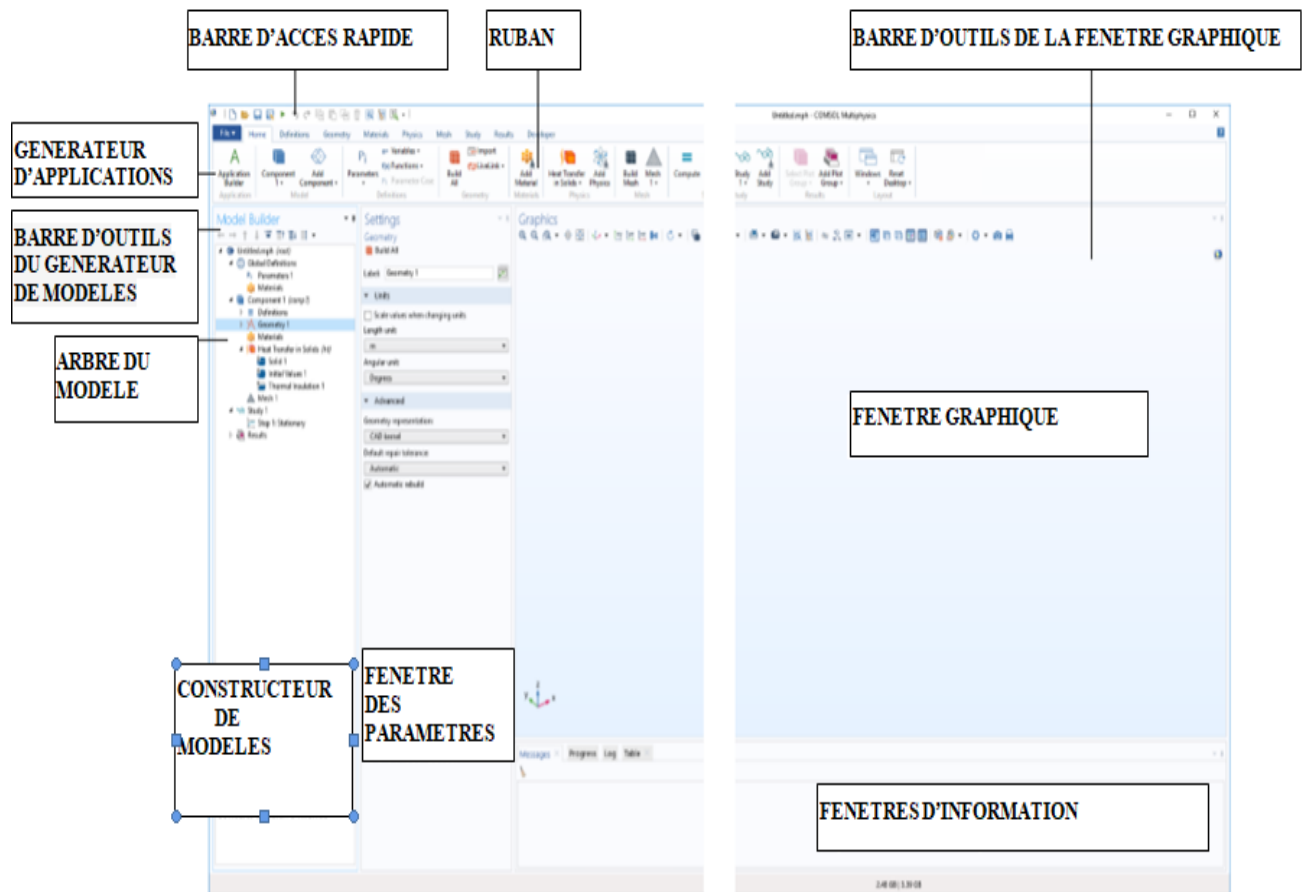


Figure II.1 : Bureau Comsol.

- fenêtre graphique

La fenêtre graphique présente des graphiques interactifs pour la géométrie, le maillage et les nœuds de résolution.

Les opérations comprennent la rotation, le panoramique, le zoom et la sélection

- fenêtres d'information

Les fenêtres d'informations afficheront des informations vitales sur le modèle pendant la simulation, telles que l'heure de la solution, la progression de la solution, les statistiques de maillage, les journaux du solveur et, le cas échéant, les tableaux de résultats.

- fenêtre des paramètres

Cliquez sur n'importe quel nœud dans l'arborescence du modèle pour voir sa fenêtre de paramètres associés affichée à côté du générateur de modèle.

- constructeur de modèles

La fenêtre de création de modèle avec son arborescence de modèle et les boutons de la barre d'outils associés vous donne une vue d'ensemble du modèle.

Le processus de modélisation peut être contrôlé à partir de menus contextuels.

- Arbre du modèle

L'arborescence du modèle donne un aperçu du modèle et de toutes les fonctionnalités et opérations nécessaires à la construction et à la résolution.

- Générateur d'applications

Cliquez sur ce bouton pour basculer vers le générateur d'application et commencer à créer une application basée sur votre modèle.

- Barre d'accès rapide

Utilisez ces boutons pour accéder à des fonctionnalités telles que l'ouverture / l'enregistrement de fichiers, l'annulation / la restauration, le copier / coller et la suppression.

- Ruban

Les onglets du ruban ont des boutons et des listes déroulantes pour contrôler toutes les étapes du processus de modélisation.

Ces différents outils vont nous permettre de comprendre les étapes de construction du modèle micro-réchauffeur qui vont être établis par la suite.

II.2 Etapes de modélisation du micro-réchauffeur

II.2.1 Géométrie du modèle

Le modèle est simulé dans un espace à trois dimensions (x,y,z). L'unité de mesure pour le dimensionnement de la structure est le micromètre. Il est composé de blocs parallélépipédiques. Un exemple traité en simulation est illustré en figure II.2

Il existe quatre blocs nommés respectivement :

- Hot Plate (plaque chauffante) : c'est la plaque centrale sur laquelle le micro-réchauffeur va diffuser sa chaleur acquise par effet joule.
- Un « ruban » centrale, qui est le micro-réchauffeur.

- Deux éléments d'extension du support Hot Plate, servant de support pour le micro-réchauffeur.

Les extrémités latérales du micro-réchauffeur, reposants sur ces éléments d'extension, seront connectés à un générateur de tension. Un comme pôle positif (potentiel variable) et l'autre comme pôle négatif (potentiel à 0 V, ou point de masse du générateur).

Les extrémités, latérales, des éléments d'extension servent comme éléments de fixation, pour éliminer toutes vibrations ou flexions de la plaque centrale.

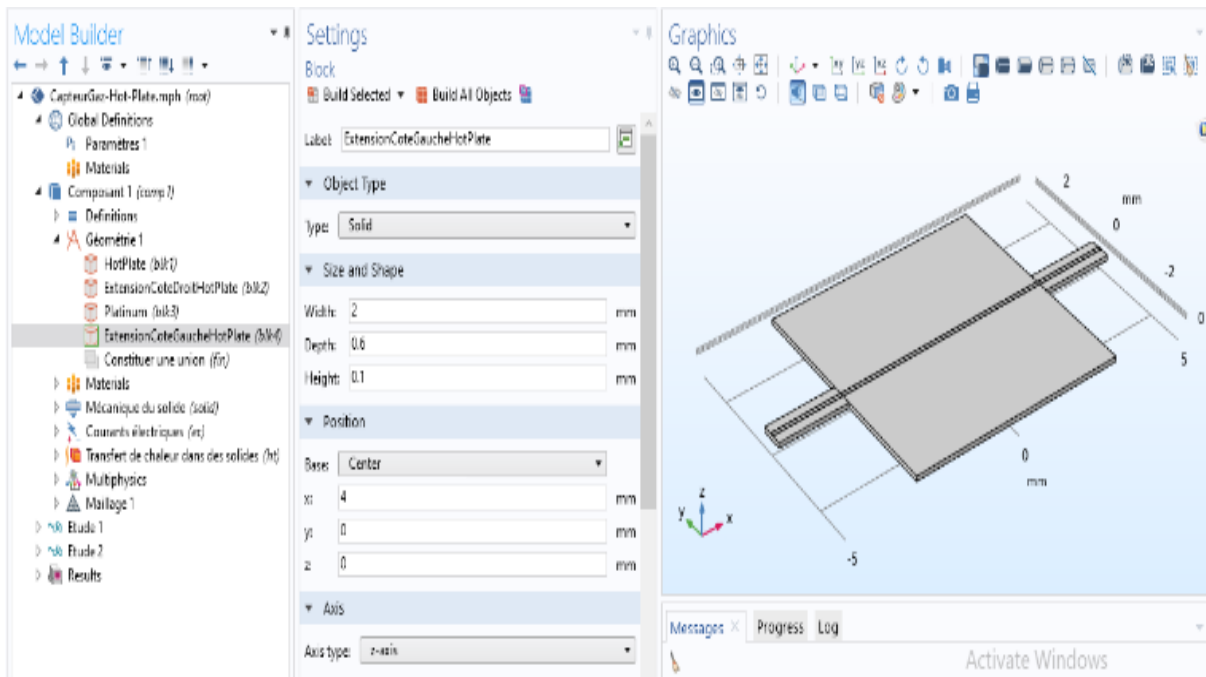


Figure II.2 : Structure d'un modèle de micro-réchauffeur étudié en simulation.

II.2.2 Matériaux constituant le modèle

Dans le cadre de cet exemple les matériaux choisis sont le Platine pour le « ruban » et le silicium pour la plaque chauffante (Figure II.3). La simulation peut porter, aussi, sur le choix d'autres matériaux et cela fonction de la surface de détection (plaque sensible) et de la température à laquelle elle doit être pour activer sa sensibilité au gaz à détecter.

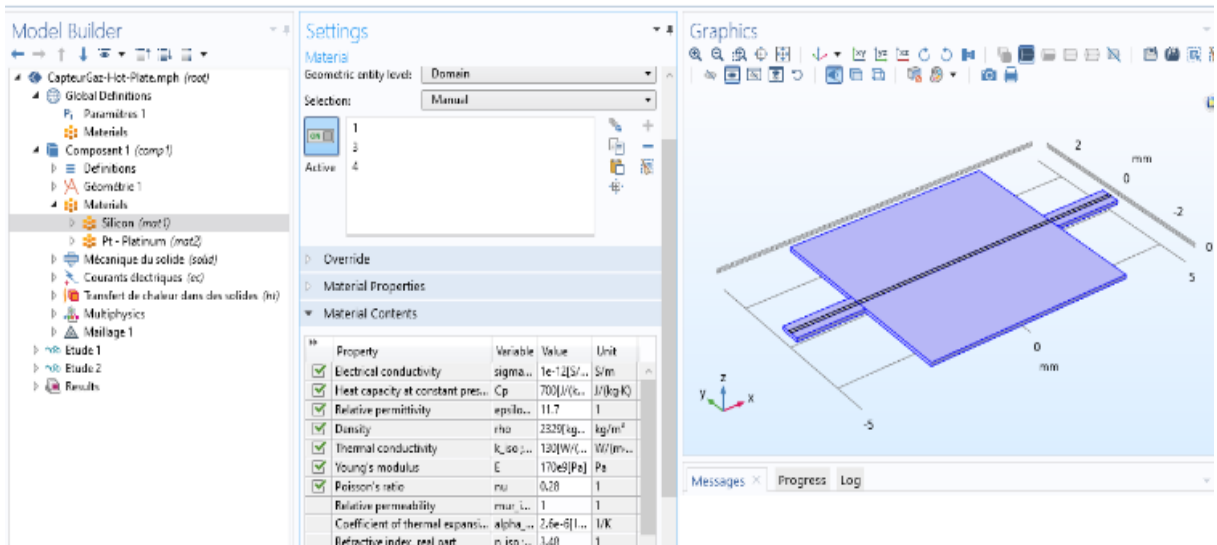


Figure II.3 : Choix des matériaux constituant le modèle simulé.

La figure III.3 illustre le choix du matériau silicium (silicon) sur les domaines (1,2 et 3) qui représentent la plaque chauffante. Le Platine (Pt-Platinum) quant à lui est choisi pour la conception du micro-réchauffeur (« ruban »). Comme on peut le constater les caractéristiques du matériau silicium tel que, la conductivité électrique, la capacité de chaleur à pression constante, la densité, le module de Young et d'autres, apparaissent clairement au niveau de la fenêtre du milieu (setting).

Le choix des matériaux n'est pas aléatoire. Il se fait en fonction des objectifs à atteindre par l'application.

II.2.3 Etats physiques intervenants dans le modèle

Les « états physiques » (modules) sont choisis en fonction des résultats définis comme objectifs dans une étude. Dans le cas de cette étude l'objectif est de chauffer un matériau afin qu'il diffuse son énergie thermique sur un second matériau pour que ce dernier atteigne une température de fonctionnement. De plus le comportement de tout matériau, solide, est régi par les lois de la mécanique du solide (pression, force, compression, extension etc.). Alors, en fonction de tout ces « états physiques » le choix portera sur la mécanique des solides, le courant électrique et le transfert de chaleur. Comme le simulateur doit étudier et solutionner le comportement du modèle, il y a interconnexion de tous ces « états physiques » entre eux (la solution d'un état et un paramètre utilisé pour un autre état). Cette interconnexion se fait par un module (multiphysics) qui est ajouté automatiquement dans le cadre d'une telle étude.

a/ Le module mécanique du solide

Le module mécanique du solide, qui existe dans l'arborescence mécanique des structures, est utilisé dans le cadre de cette étude pour permettre un encastrement (fixation) de la plaque chauffante à ces deux extrémités (Figure II.4). La plaque est ainsi maintenue fixe. Il n'y a aucun déplacement de cette dernière dans aucune direction de l'espace. La rotation est aussi inexistante.

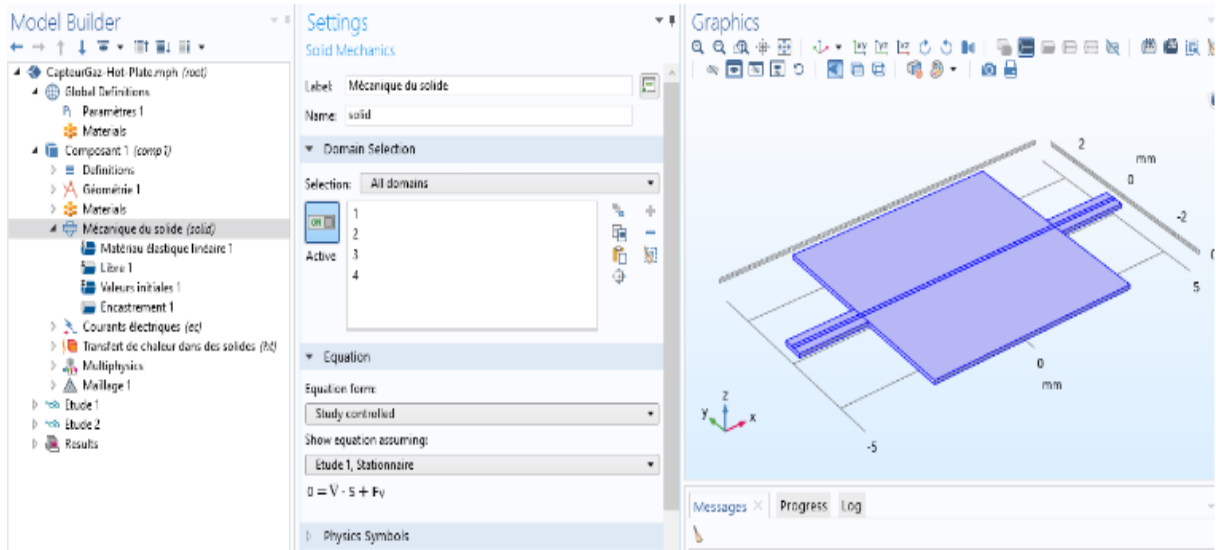


Figure II.4 : Encastrement de la plaque chauffante simulé grâce au module mécanique du solide.

L'encastrement est appliqué aux extrémités latérales des parties « extension » de la plaque chauffante.

b/ Le module courant électrique

L'élément chauffant, qui est dans cette partie appelé « ruban » (micro-réchauffeur) doit être chauffé. La technique de chauffage utilisée est l'effet Joule. Pour cela on utilisera un générateur de tension qui sera connecté aux extrémités du « ruban ». Pour réaliser cet effet Joule on utilisera les notions d'électricité de base du module courant électrique. Le « ruban » étant un matériau conducteur, les lois de base de l'électricité sont donc applicables et en particulier le chauffage par effet Joule. Comme l'effet Joule n'est autre que la manifestation thermique de la résistance électrique qui se produit lors du passage d'un courant électrique dans tout matériau conducteur, nous obtenons bien le chauffage du micro-réchauffeur.

La figure II.5 illustre, uniquement, la connexion du potentiel positif à une extrémité du micro-réchauffeur.

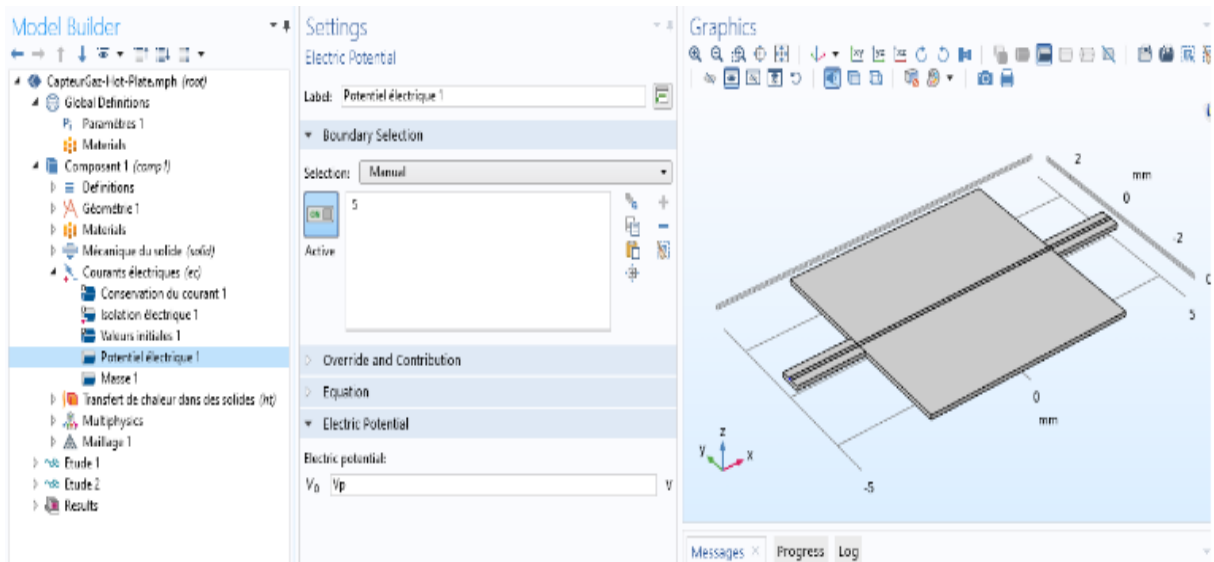


Figure II.5 : Connexion d'un générateur courant continu aux bornes du micro-réchauffeur.

c/ Le module transfert de chaleur dans les solides

C'est un module qui existe dans l'arborescence du module transfert de chaleur. Notre objectif étant de transférer la chaleur acquise par effet Joule du micro-réchauffeur à la plaque chauffante (Figure II.6), il est donc nécessaire d'utiliser un tel module qui assurera cette fonction. Le transfert de chaleur est régit par l'équation :

$$\rho C_p - \Delta \cdot (k \cdot \Delta T) = Q \quad (II.1)$$

ou,

ρ , correspond a la masse volumique (du matériau utilise dans la conception du micro-réchauffeur)

C_p , correspond à la capacité thermique a pression constante.

Δ , l'operateur Laplacien ($\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$)

ΔT , variation de la temperature

Q , le flux thermique

le flux thermique ou chaleur résistive générée Q est proportionnelle au carré de la grandeur de la densité de courant électrique J .

k , constante de Boltzmann

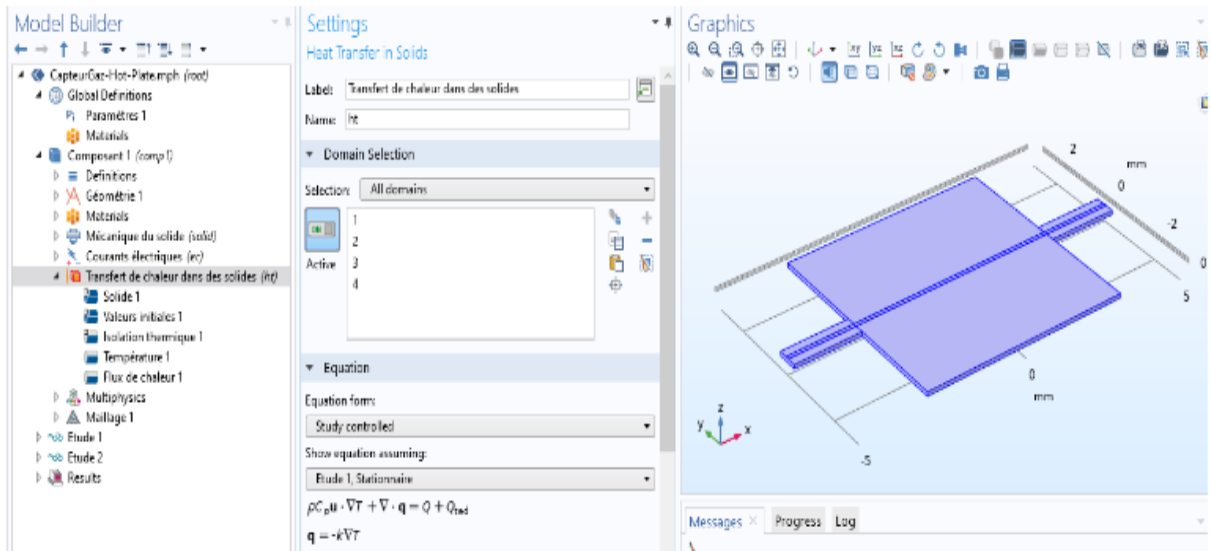


Figure II.6 : Application de la physique de transfert de chaleur dans les solides, sur le modèle.

II.2.4 Maillage

Le maillage est une séquence permettant d'obtenir une solutionner affinée des équations, différentielles (par exemple l'équation II-1), utilisées par Comsol. Plus le maillage est fin plus la solution du problème traité est précise, mais le temps de calcul devient élevé. Il faut donc trouver, pour les problèmes compliqués, un compromis entre précision-temps de calcul. La figure II.7, illustre dans la fenêtre réglages, sur un autre exemple, l'ensemble des maillages proposés par Comsol. Le maillage appliqué, sur la structure étudiée, apparait sur la fenêtre graphique.

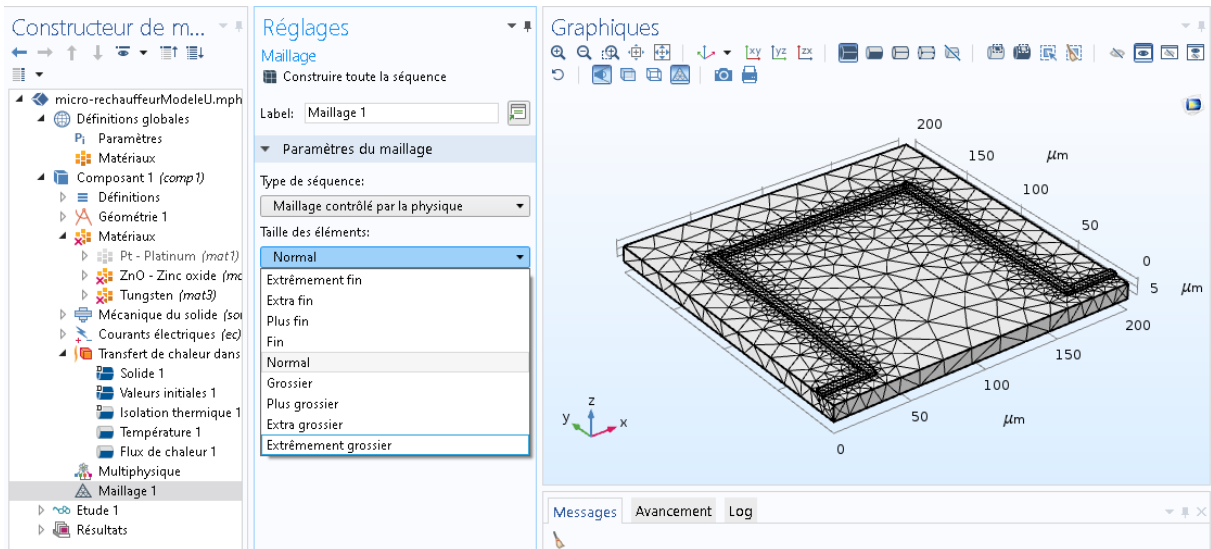


Figure II.7 : Application d'un maillage « Normal » sur une structure.

II.2.5 Etude

L'étude est la partie qui permet de faire les calculs, donc de solutionner toutes les équations définissant la dynamique de la structure proposée dans l'étude. La figure II.8 illustre les cas d'études qu'on peut avoir, pour le problème posé.

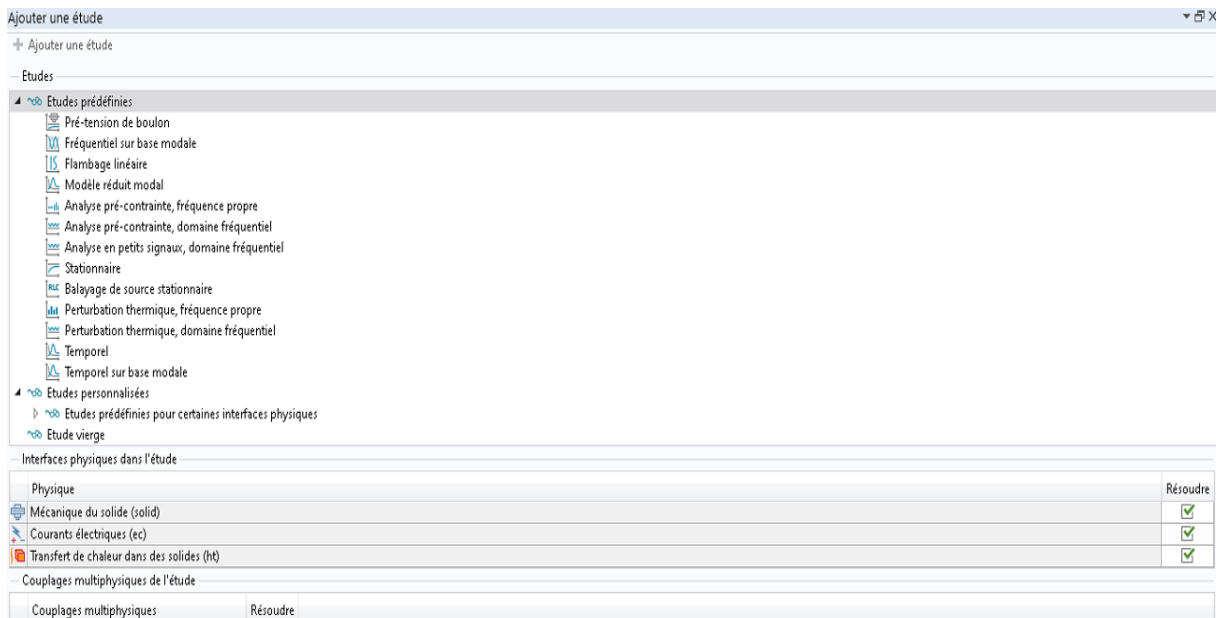
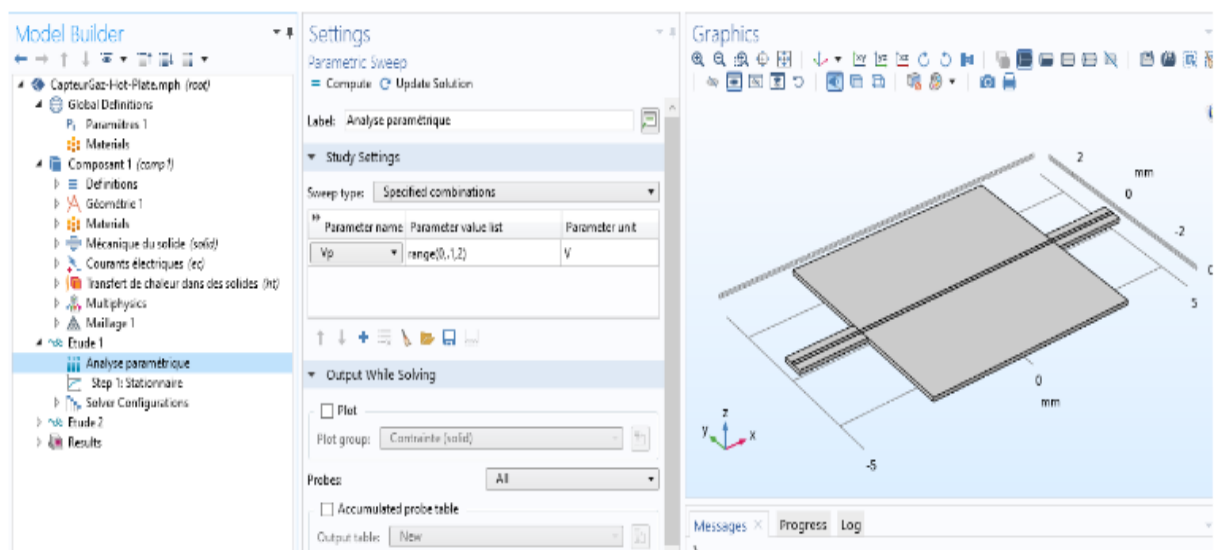


Figure II.8 : Etudes proposées par Comsol.

Pour étudier la structure proposée, dans le cadre de ce mémoire, nous avons opté pour une étude stationnaire, suffisante pour obtenir les résultats désirés. De plus comme nous utilisons un générateur de tension pour créer un courant aux bornes du micro-réchauffeur, nous introduisons au niveau de cette étude stationnaire une analyse paramétrique. L'analyse paramétrique va nous permettre d'avoir des résultats sur une gamme de variation (0V à 2V), par pas de 0.1V, du paramètre tension généré par le générateur de tension (Figure II.9)



Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux étapes de conception d'une structure d'un micro-réchauffeur. Une telle structure nécessite trois modules principaux couplés entre eux par un quatrième pour solutionner l'étude désirée. Structure mécanique, courant électrique et transfert de chaleur dans les solides sont les trois modules nécessaires à l'étude. Le module de couplage est le module multiphysiques. Chaque structure à simuler passe par les étapes citées dans ce chapitre.

Ce chapitre est réservé à la simulation de différents modèles micro-réchauffeurs. On présentera la géométrie de chaque modèle traité, puis les résultats graphiques de l'évolution de la température et de l'énergie électrique, en fonction du paramètre potentiel électrique variable dans la gamme 0 à 2 V. Le micro-réchauffeur est fait à partir du matériau platine et la plaque chauffée est faite en oxyde de zinc. L'utilisation du matériau polysilicium pour le micro-réchauffeur, est aussi simulée pour un besoin de comparaison de résultats.

III.1 Simulation et analyse du modèle 1

Le premier modèle simulé est un micro-réchauffeur sous forme de ruban dont la longueur vaut 10 mm, la largeur 0.1 mm et l'épaisseur (ep) 0.01 mm (Figure III.1). Nous analyserons l'effet de la variation de l'épaisseur sur la température et l'énergie.

III.1.1 Ruban d'épaisseur $ep = 0.01$ mm

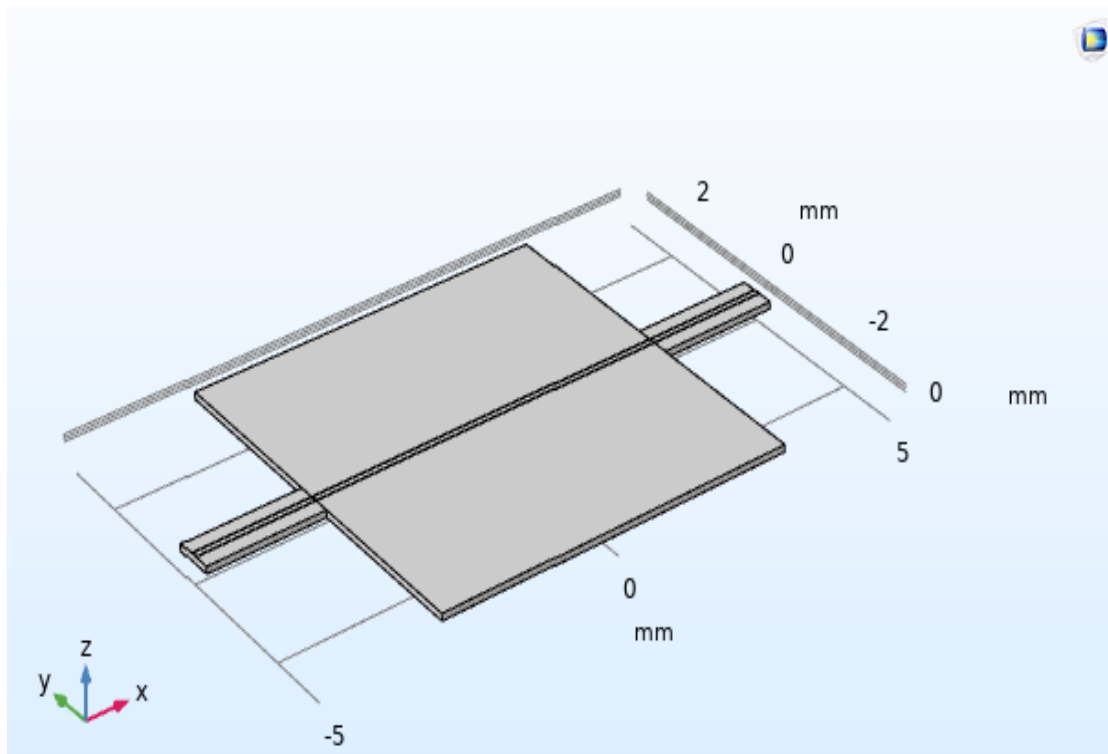


Figure III.1 : Micro-réchauffeur sous forme de ruban linéaire.

Les illustrations présentées en figure III.2 , figure III.3 et figure III.4 permettent de voir la variation respectivement de la diffusion en surface de la chaleur, de la température en Kelvin et de l'énergie électrique en Joule.

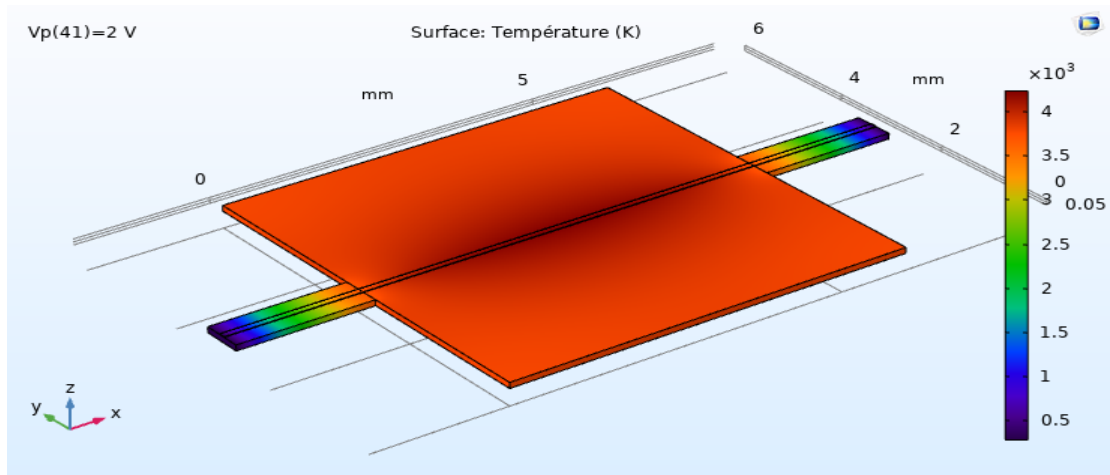


Figure III.2 : Diffusion en surface de la chaleur exprimée en Kelvin.

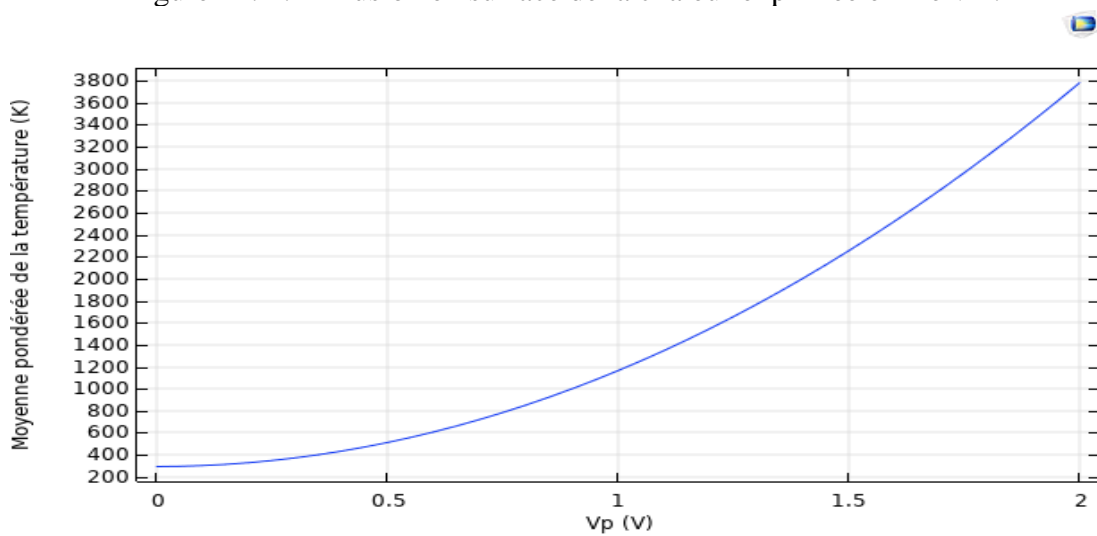


Figure III.3 : Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique Vp. (ep = 0.01 mm)

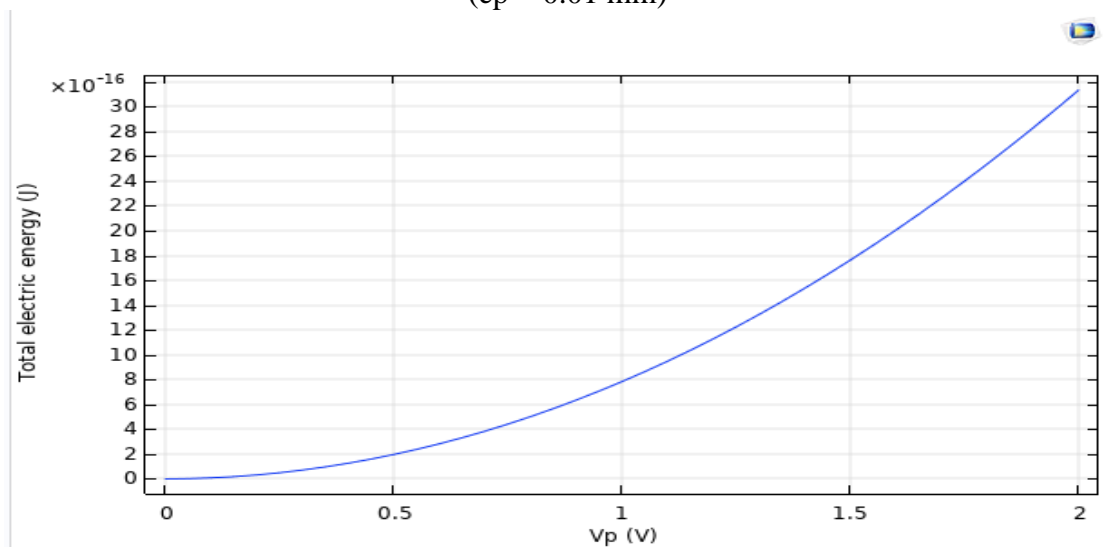


Figure III.4 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique Vp. (ep = 0.01 mm)

Les deux grandeurs augmentent sous forme parabolique en fonction du potentiel d'alimentation du micro-réchauffeur. L'énergie électrique est considérablement faible. Ce résultat est celui recherché dans ce cadre d'étude. Pour pouvoir utiliser, par exemple, la plaque sensible en ZnO

pour la détection de gaz il suffit de fixer le potentiel électrique au niveau de 0.5 V afin d'atteindre les 300 °C qui est la limite de température de la surface de détection d'oxyde métallique utilisée dans les capteurs de gaz. L'énergie électrique consommée dans ce cas sera de 2.10^{-16} J.

III.1.2 Ruban d'épaisseur 0.05 mm

Dans ce cas d'épaisseur les deux grandeurs, gardent le même profil de variation que précédemment (figure III.5-6) mais la température est largement élevée.

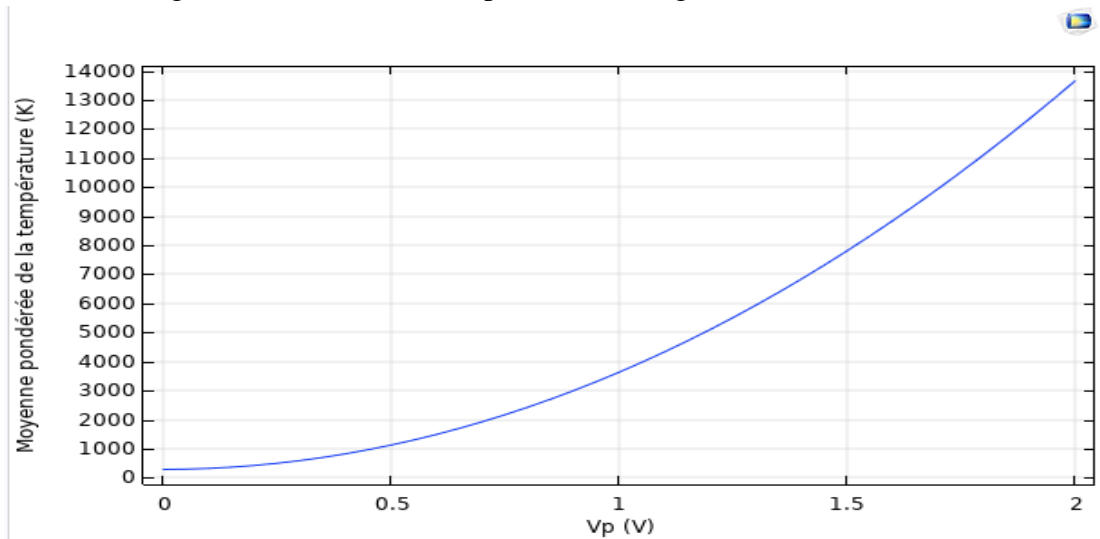


Figure III.5: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique V_p . ($ep = 0.05$ mm)

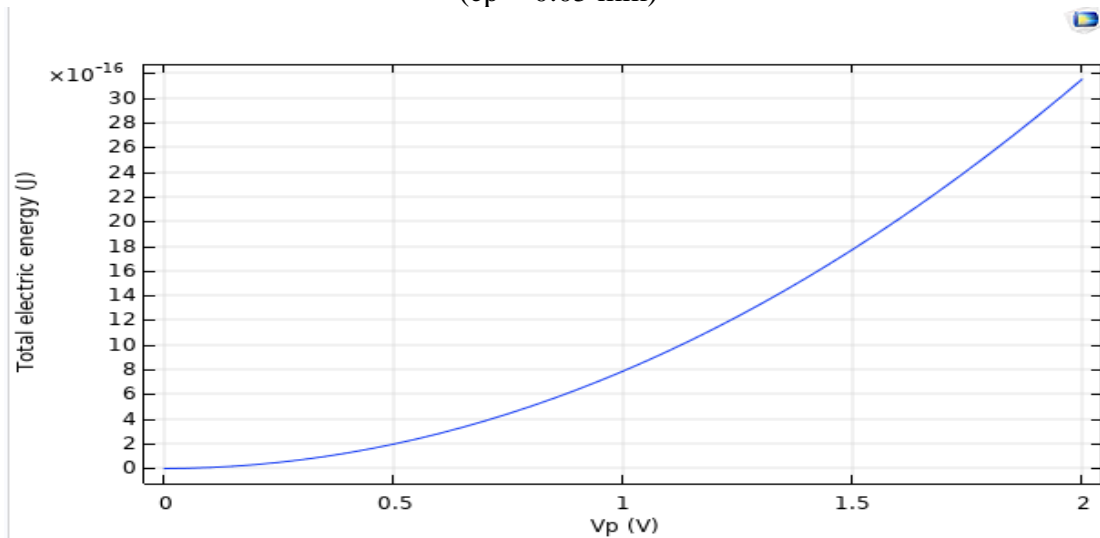


Figure III.6 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique V_p . ($ep = 0.05$ mm)

L'épaisseur du ruban n'a pas d'influence sur la variation de l'énergie électrique totale pour la même gamme du potentiel électrique utilisé.

III.1.3 Ruban d'épaisseur 0.1 mm

Les illustrations en figure III.7 et III.8 confirment bien, respectivement, l'augmentation de la température lorsque l'épaisseur du ruban augmente alors que la gamme de variation de l'énergie électrique reste la même.

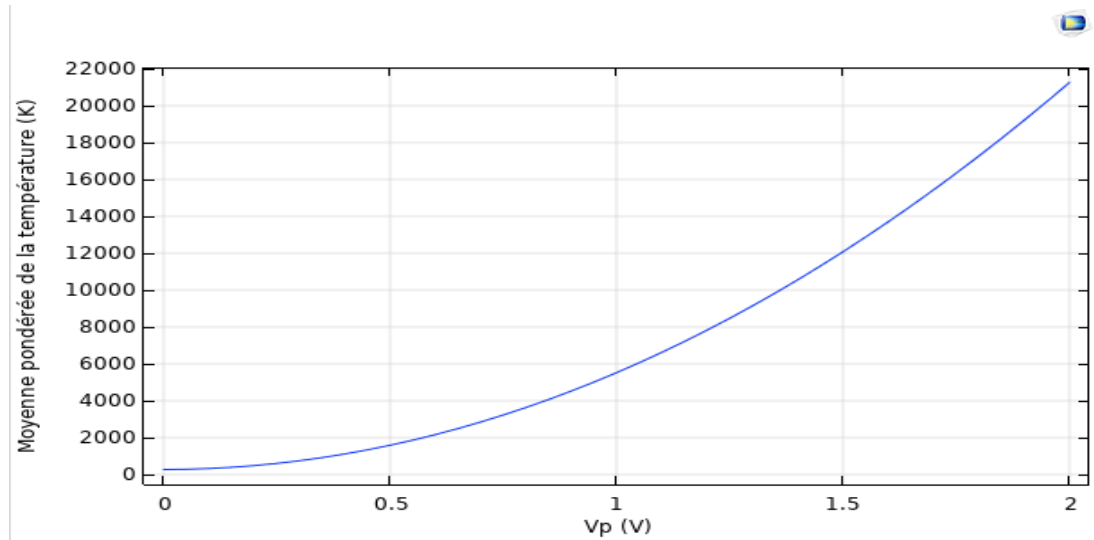


Figure III.7: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique Vp. (ep = 0.1 mm)

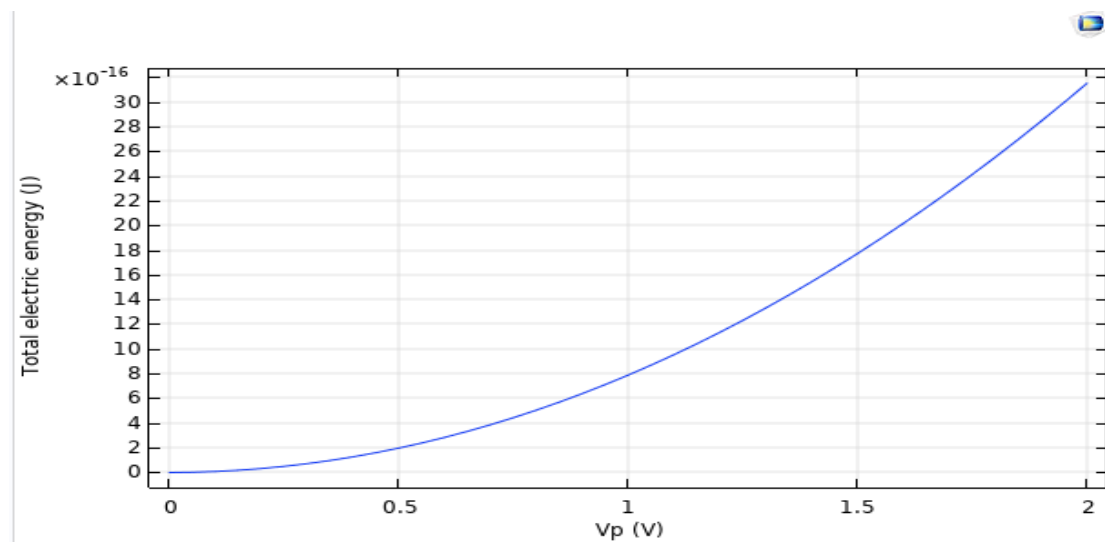


Figure III.8 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique Vp. (ep = 0.1 mm)

III.1.4 Ruban d'épaisseur 0.01 mm et de largeur 0.2 mm

Cette simulation est faite pour connaître l'effet de la largeur du ruban sur les deux grandeurs température et surtout énergie électrique. Il apparaît (figure III.9-10) que la température est variable alors que l'énergie électrique reste dans la gamme de variation. Ni les variations d'épaisseur, ni les variations de sa largeur n'influencent la gamme de variation de l'énergie électrique pour le même potentiel électrique utilisé pour alimenter le ruban.

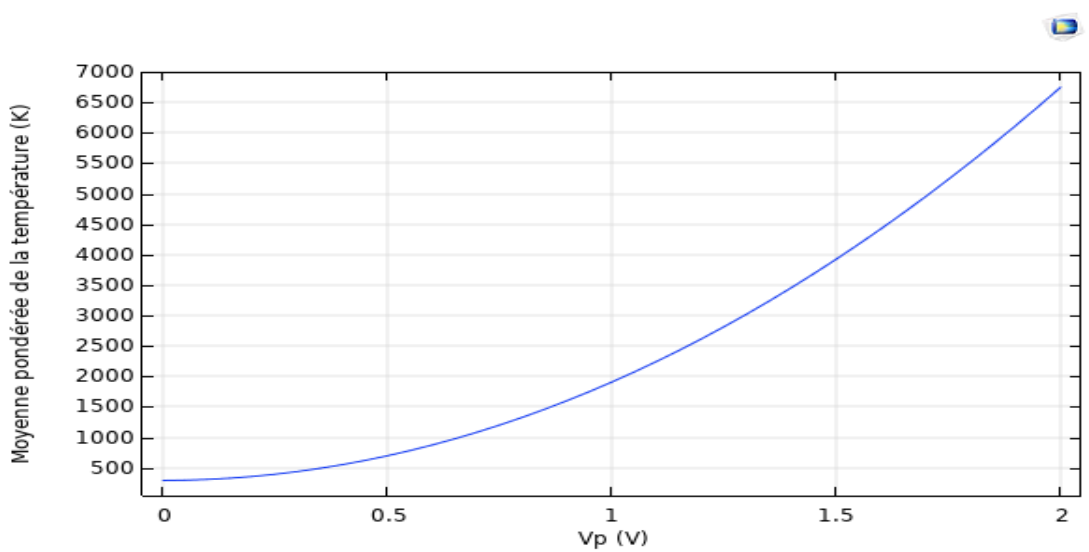


Figure III.9: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique V_p . (ruban d'épaisseur 0.01 mm et de largeur 0.2 mm)

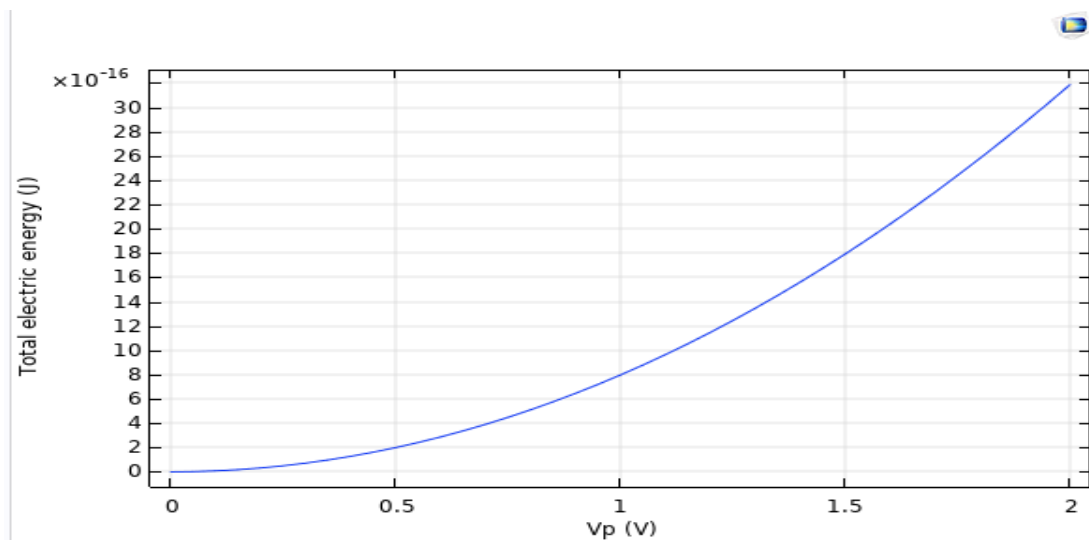


Figure III.10 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique V_p . (ruban d'épaisseur 0.01 mm et de largeur 0.2 mm)

III.2 Simulation et analyse du modèle 2

Le modèle 2 (figure III.11) est sous forme d'un « serpentín » à angle droit. La simulation d'un tel micro-réchauffeur a donné les résultats présentés en figure III.12 - 14

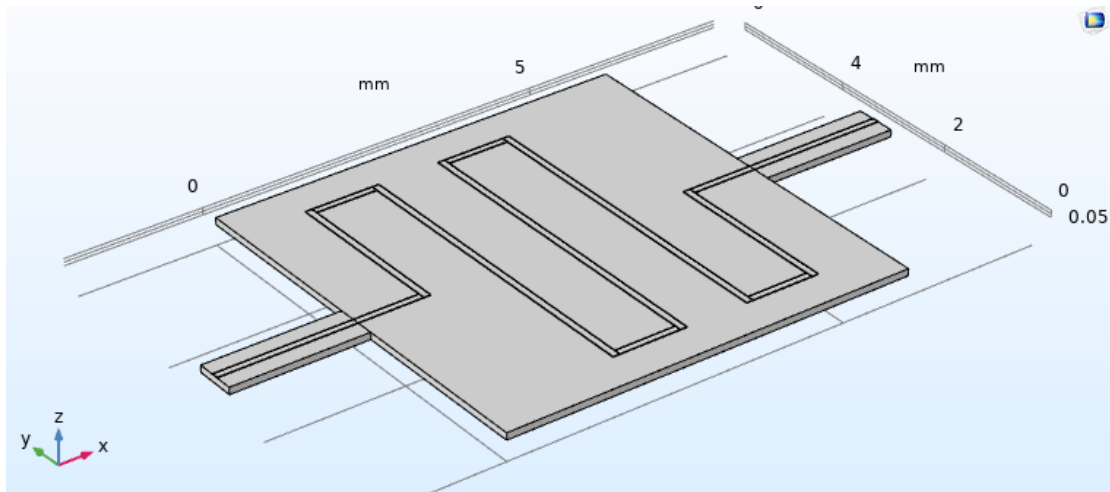


Figure III.11 : Modèle du micro-réchauffeur en « serpentín ».

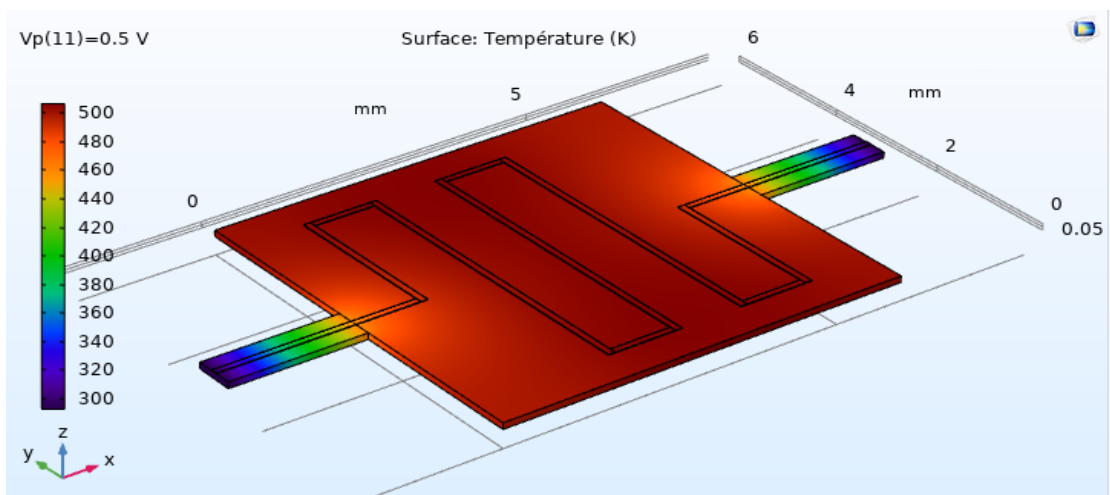


Figure III.12 : Diffusion de chaleur en surface du micro-réchauffeur en « serpentín »

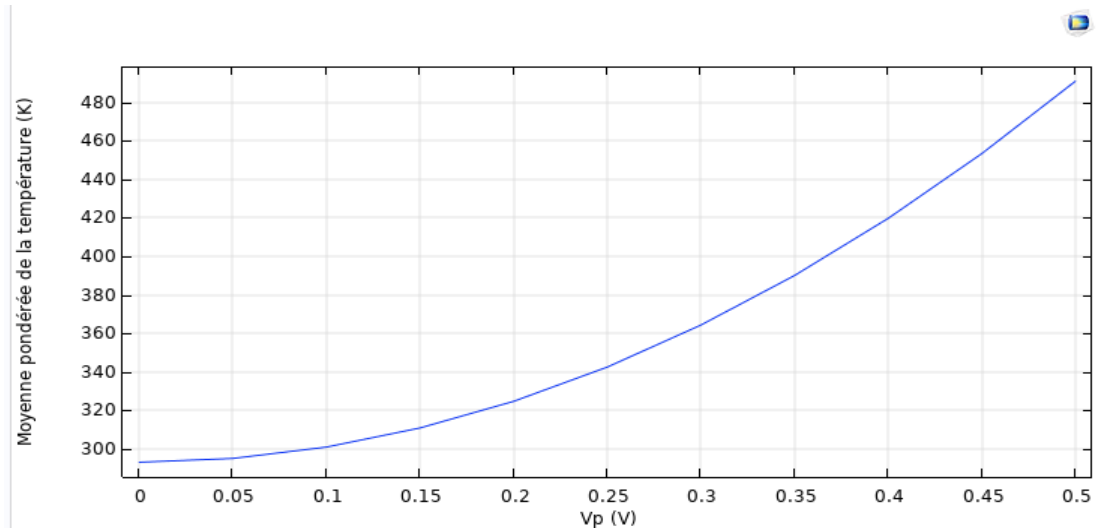


Figure III.13: Graphe de la variation de la température en fonction du potentiel électrique V_p . (micro-réchauffeur en « serpent »)

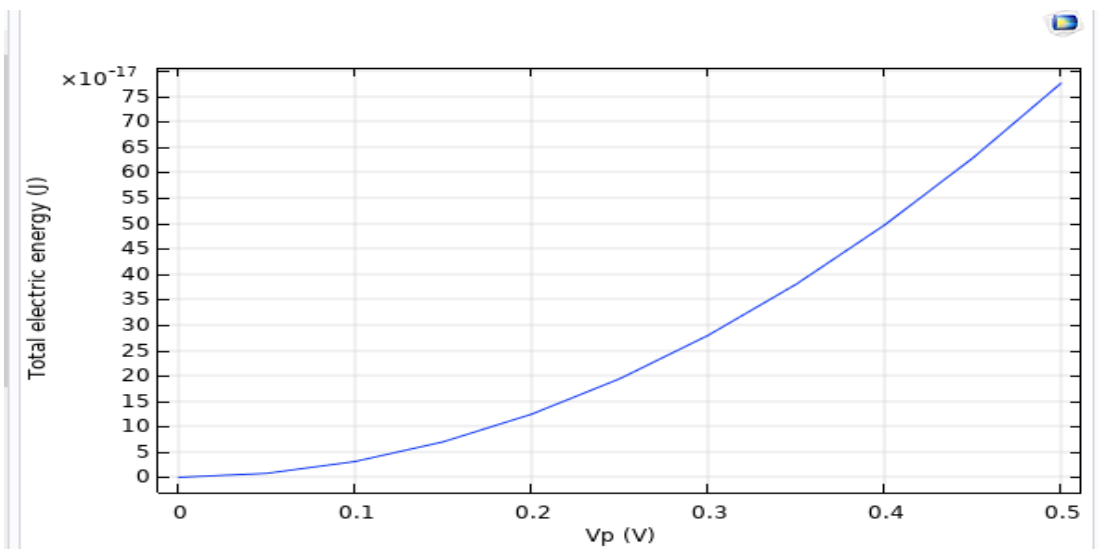


Figure III.14 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique V_p . (micro-réchauffeur en « serpent »)

La variation de la température reste dans les mêmes proportions du micro-réchauffeur en ruban (ici la simulation est faite dans une plage de 0 à 0.5 V pour le potentiel d'alimentation du micro-réchauffeur). Nous constatons que la forme géométrique du micro-réchauffeur influe sur l'énergie électrique totale dans le sens décroissant par rapport à la forme du ruban. Nous nous basons sur le micro-réchauffeur en ruban car les dimensions des différents rubans constituant le serpent sont quasi identiques en dimension (épaisseur de 0.01 mm et largeur de bande du ruban 0.6 mm). Leur longueurs diffèrent, 0.9 mm pour les rubans horizontaux et 2.5 mm pour les rubans verticaux.

III.3 Simulation et analyse du modèle 3

Le modèle 3 est un modèle en U. La géométrie du modèle est illustrée en figure III.15. Il est semblable au modèle en ruban (même épaisseur et même largeur de bande du ruban) sauf qu'il n'est pas en forme linéaire.

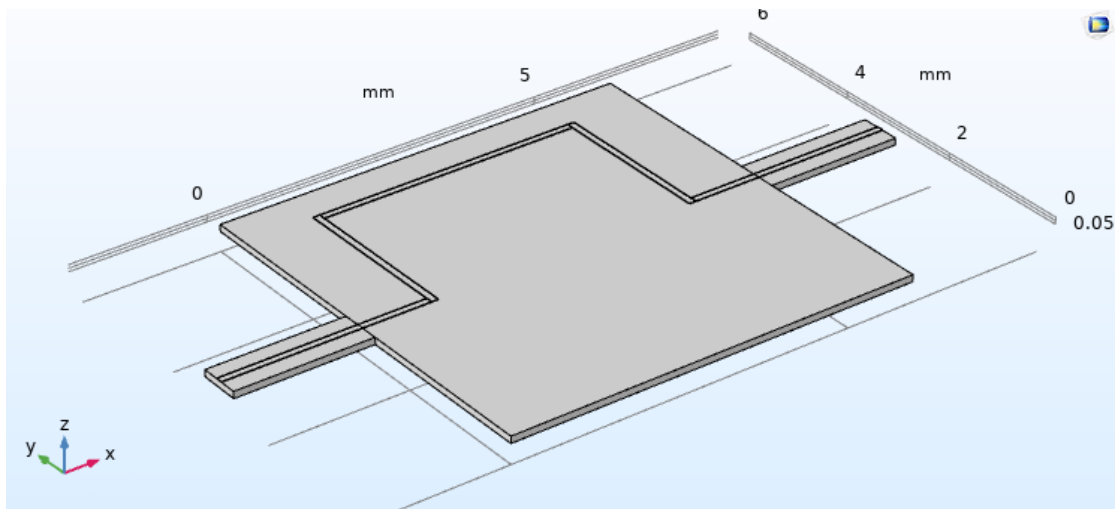


Figure III.15 : Modèle du micro-réchauffeur en U.

La diffusion de chaleur en surface, le graphe de variation de la température et la variation de l'énergie électrique sont présentés respectivement en figure III.16, figure III.17 et figure III.18.

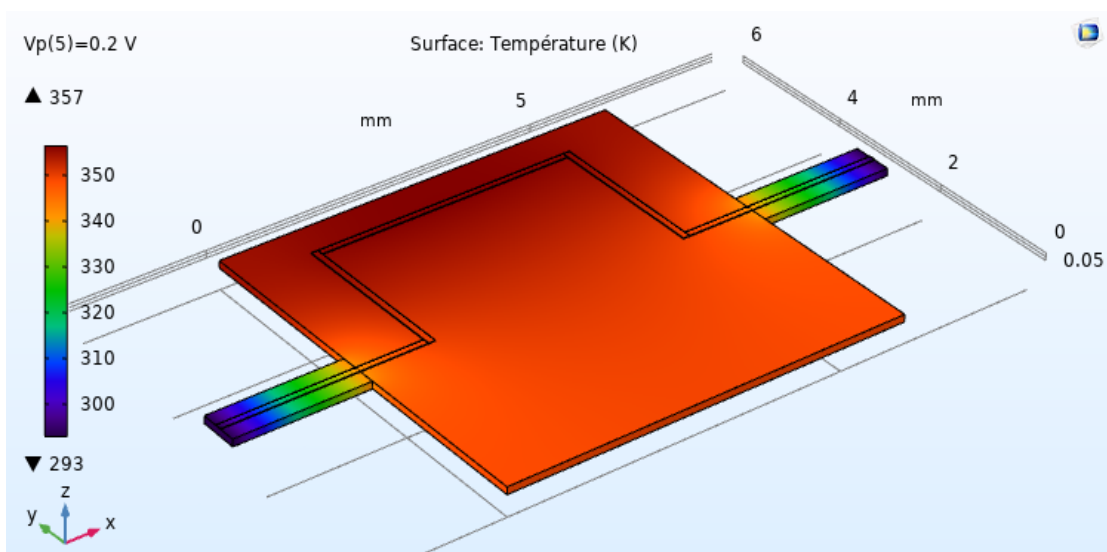


Figure III.16 : Diffusion de chaleur en surface du modèle en U.

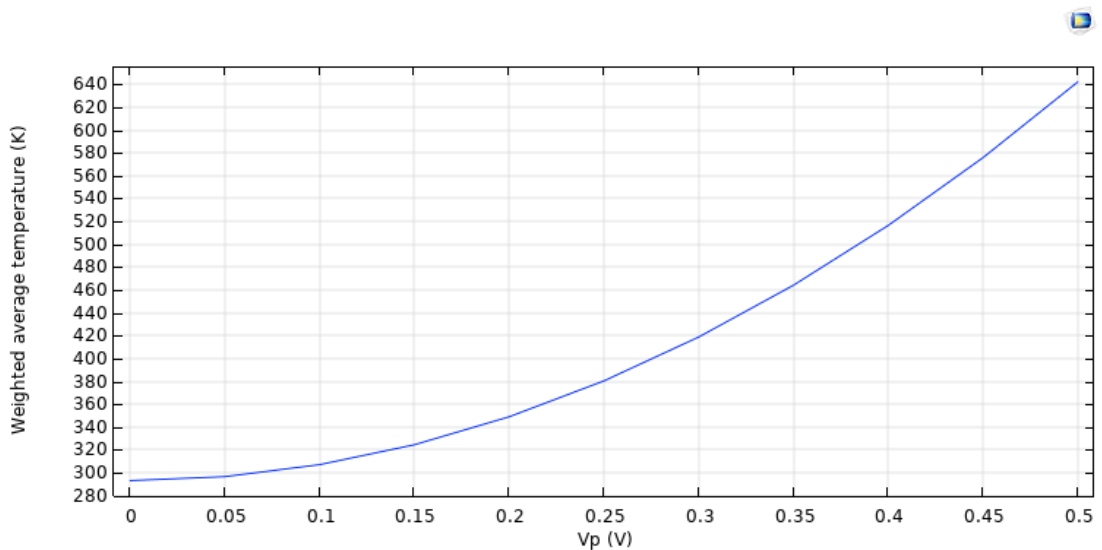


Figure III.17 : Variation de la température en fonction du potentiel d'alimentation V_p du modèle en U.

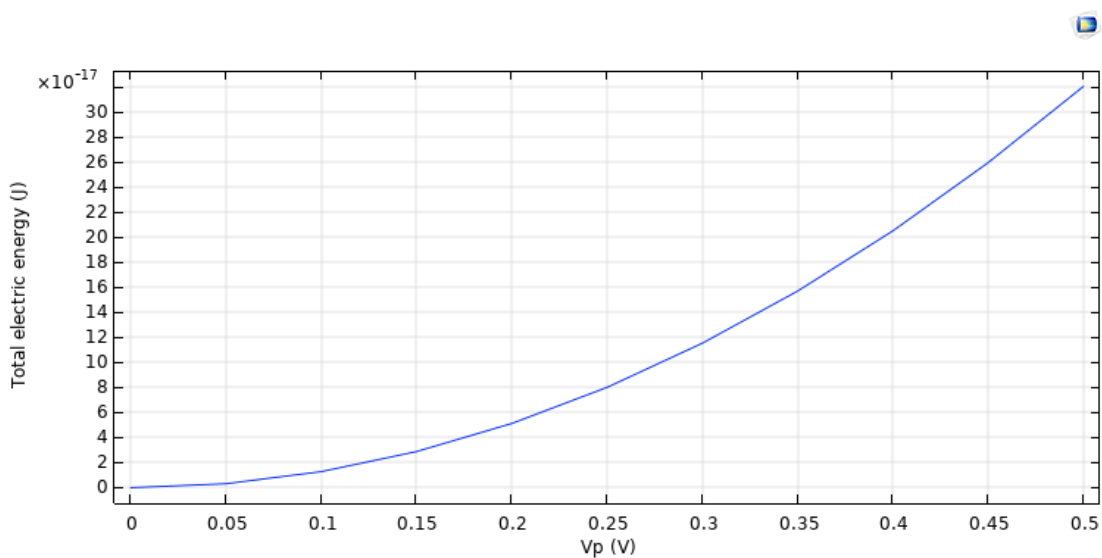


Figure III.18 : Variation de l'énergie électrique totale en fonction du potentiel électrique V_p du modèle en U.

Les illustrations confirment les observations précédentes, car la température reste dans la même gamme de variation et l'énergie électrique diminue. La forme géométrique du micro-réchauffeur a une influence sur l'énergie électrique consommée.

III.4 Simulation et analyse de certains modèles

Dans cette partie différents modèles à plaques sont schématisés et simulés. Une certaine ressemblance de forme existe et implique un rapprochement des résultats, dans le sens où la température est approximativement la même dans sa gamme de variation et que la forme du micro-réchauffeur a une influence sur la variation de l'énergie électrique. Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants :

Modèle	Géométrie du modèle
1	
2	
3	

--	--

Tableau III.1 : Différents modèles à plaques.

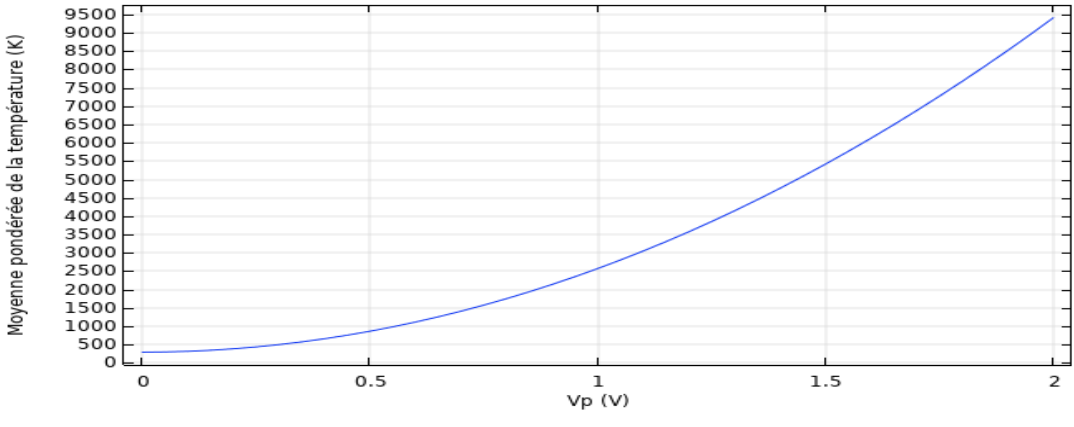
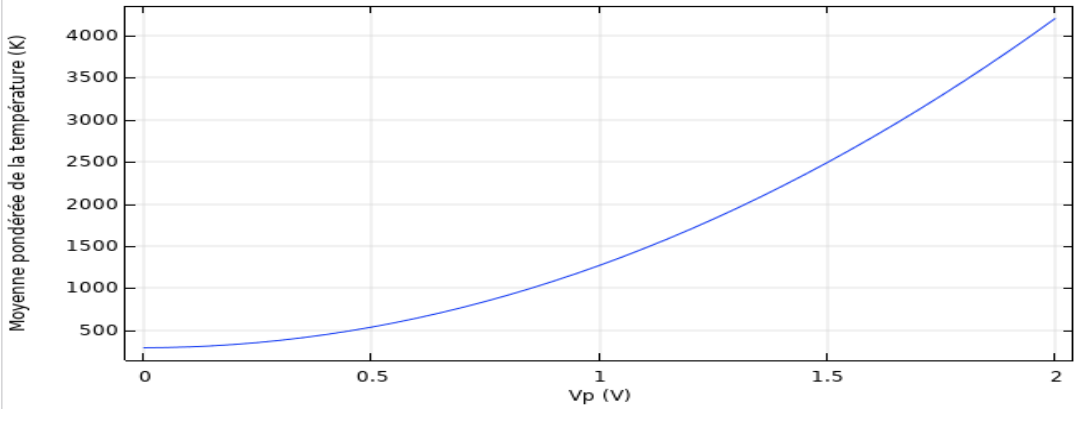
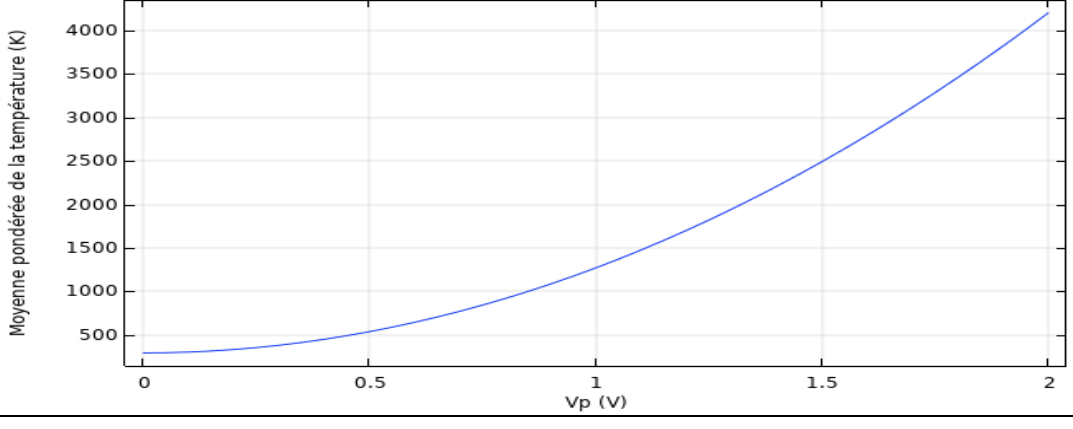
Modèle	Variation de la température en fonction du potentiel V_p .
1	
2	
3	

Tableau III.2 : Variation de la température en fonction du potentiel V_p , pour différents modèles en plaques.

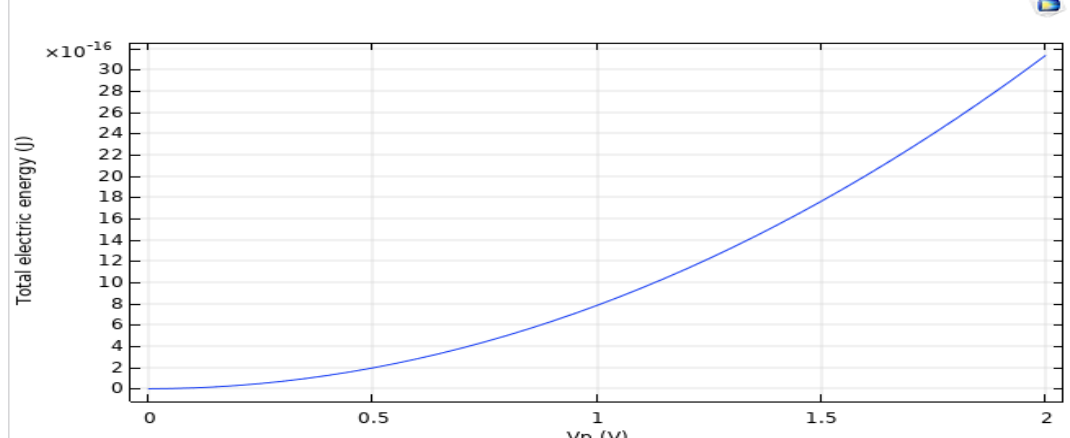
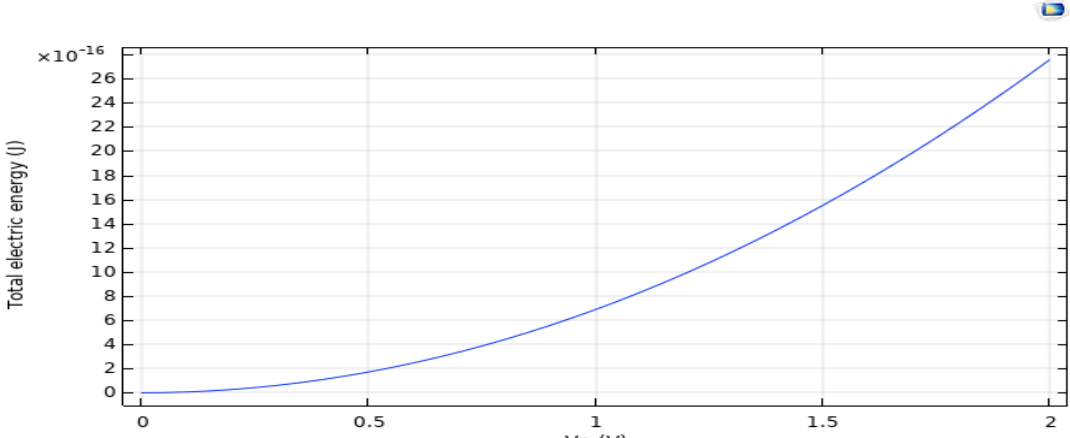
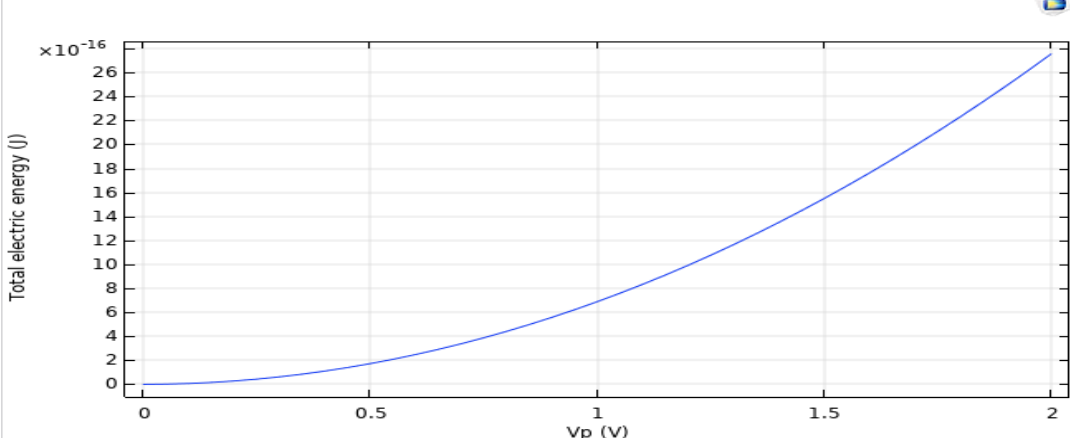
Modèle	Variation de l'énergie électrique en fonction du potentiel V_p .
1	
2	
3	

Tableau III.3 : Variation de l'énergie électrique en fonction du potentiel V_p , pour différents modèles en plaques.

III.5 Simulation du micro-réchauffeur en polysilicium sur la plaque en oxyde de zinc

Pour essayer de comprendre l'effet du matériau, constituant le micro-réchauffeur, sur les grandeurs température et énergie électrique, on a simulé le modèle initial (micro-réchauffeur en ruban linéaire d'épaisseur 0.01 mm) en utilisant le matériau polysilicium pour sa conception virtuelle.

Les résultats, relatifs à la température en surface et à la consommation électrique sont illustrés sur les figures III.19 a III.24.

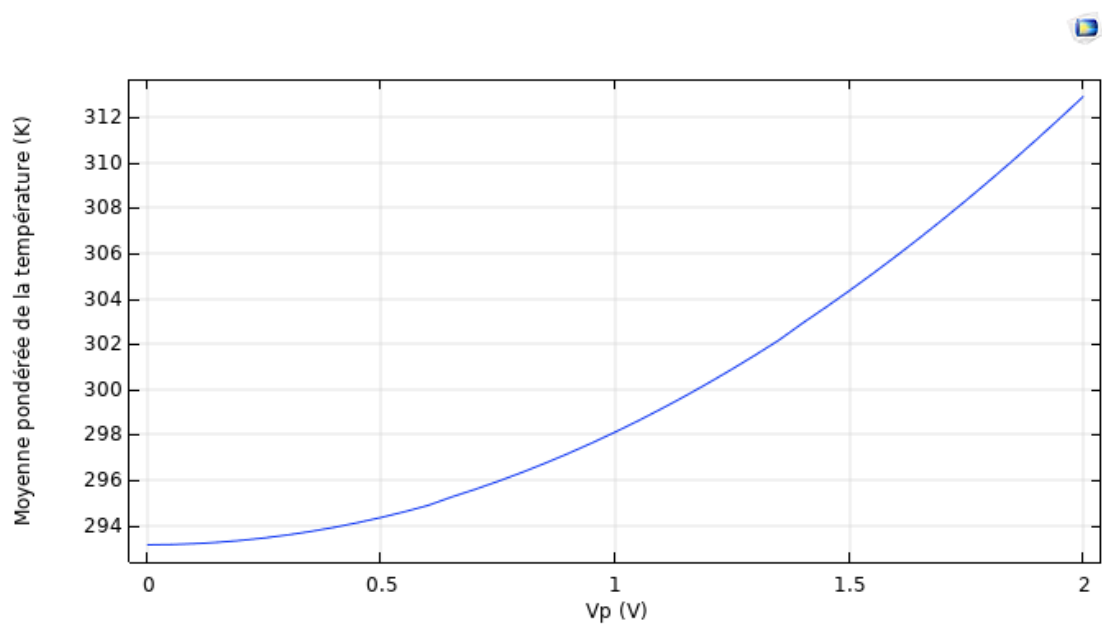


Figure III.19 : Variation de la température en fonction de V_p (Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.01 mm)

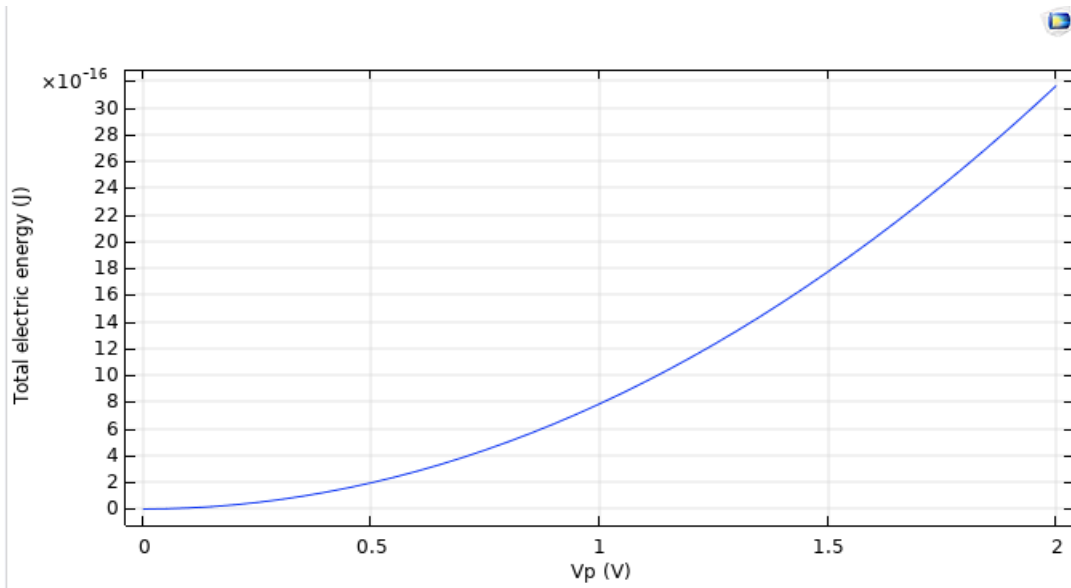


Figure III.20 : Variation de l'énergie électrique en fonction de Vp (Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.01 mm)

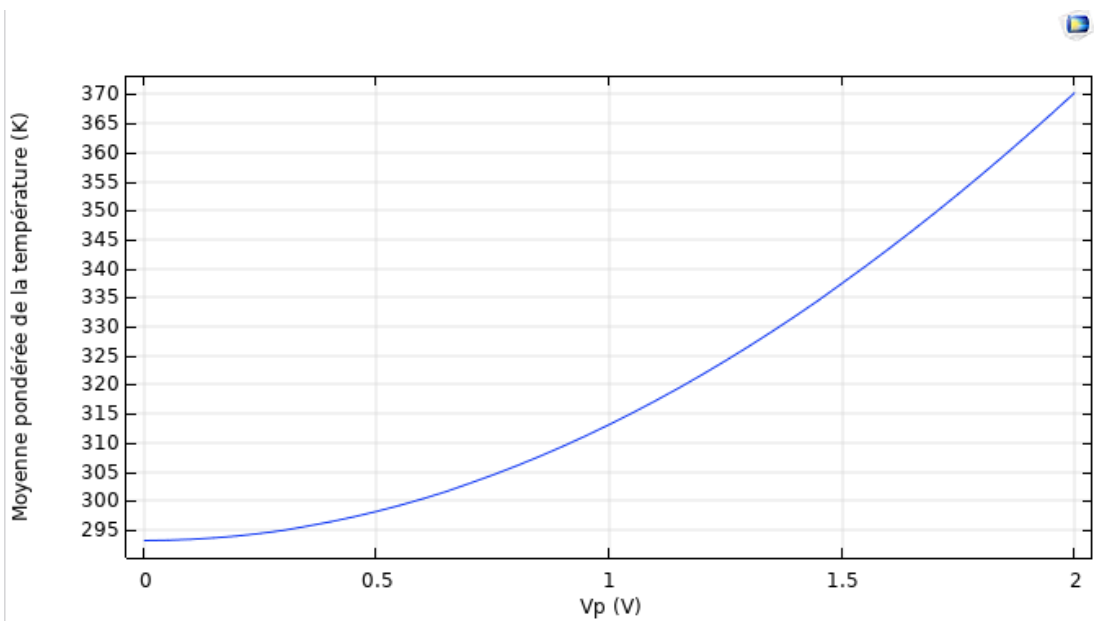


Figure III.21 : Variation de la température en fonction de Vp (Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.05 mm)

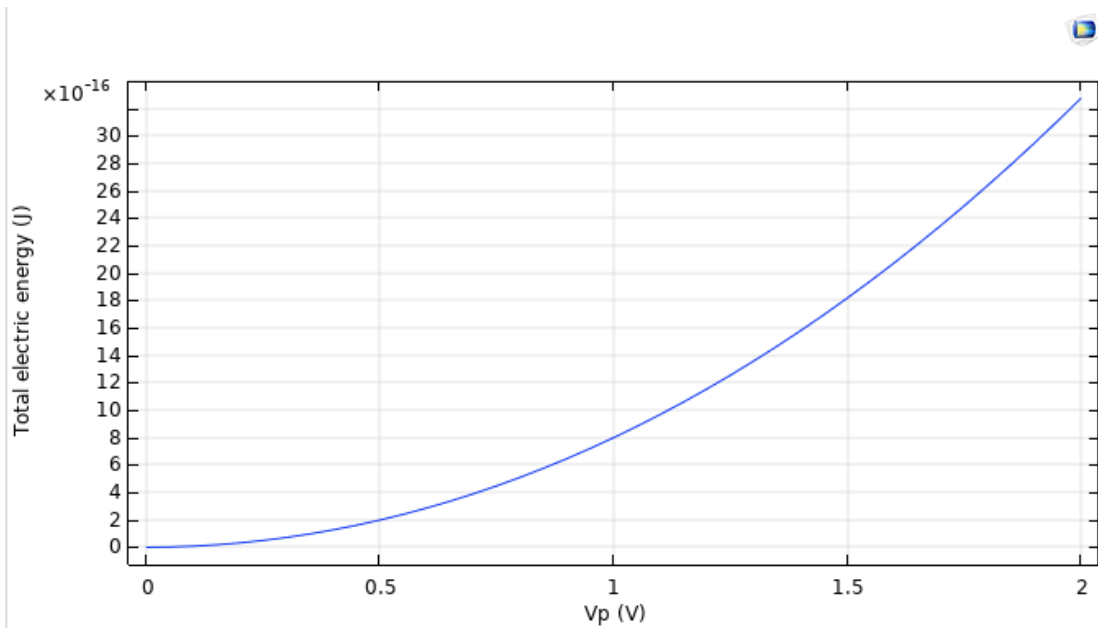


Figure III.22 : Variation de l'énergie électrique en fonction de Vp (Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.05 mm)

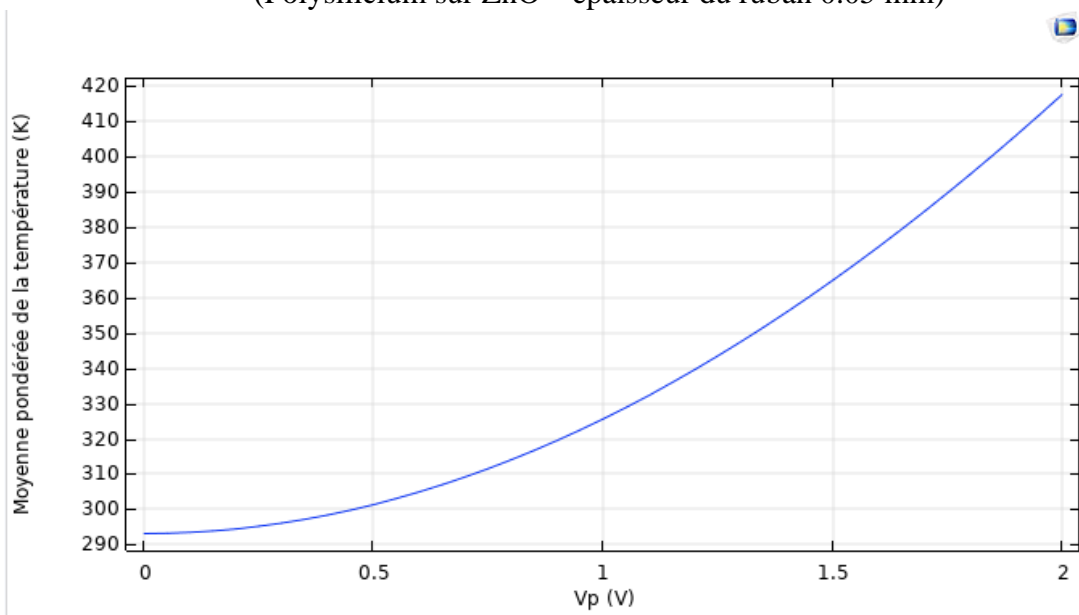


Figure III.23 : Variation de la température en fonction de Vp (Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.1mm)

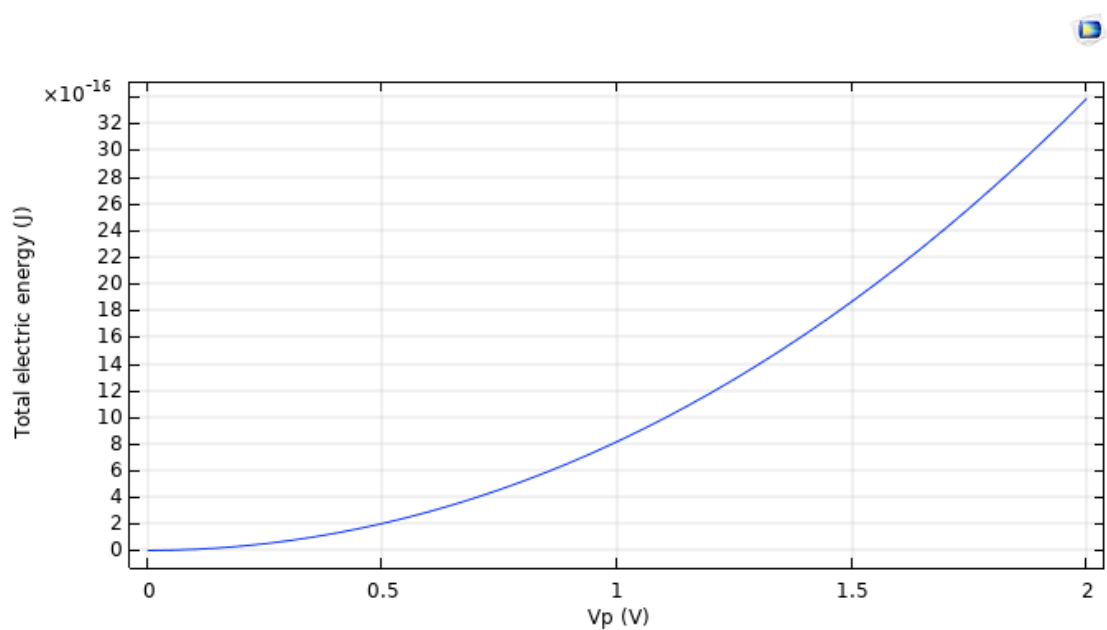


Figure III.24 : Variation de l'énergie électrique en fonction de Vp
(Polysilicium sur ZnO – épaisseur du ruban 0.1 mm)

Le comportement de la température en fonction de l'épaisseur du matériau polysilicium reste identique. Cette dernière augmente lorsque l'épaisseur du micro-réchauffeur augmente. Seulement on constate clairement que cette augmentation est nettement inférieure à celle du cas platine sur ZnO, elle est lente. L'énergie électrique reste dans la même gamme de variation que pour le cas platine sur ZnO.

Conclusion

Dans ce chapitre une analyse des résultats a été faite en se basant sur la simulation des différents modèles utilisés dans la conception virtuelle du micro-réchauffeur. L'épaisseur du matériau utilisé dans cette conception a une influence sur la variation en surface de la grandeur physique température. La forme géométrique quant à elle, a une influence sur l'énergie électrique consommée par le micro-réchauffeur.

CONCLUSION GENERALE

A l'aide de l'outil de conception virtuel comsol, nous avons simulé le comportement d'un micro-réchauffeur utilisé dans la réalisation des capteurs de gaz à oxyde métallique. Nous avons donc pu constater, dans une gamme du potentiel d'alimentation du micro-réchauffeur une uniformité de la température et une faible consommation de l'énergie électrique. Les résultats ont été obtenus en utilisant le platine comme matériau de conception du micro réchauffeur et l'oxyde de zinc comme matériau pour la plaque chauffée par effet thermique du à l'effet Joule.

Les variations de température, varient en fonction de l'épaisseur du micro réchauffeur et la consommation d'énergie électrique a une dépendance, en gamme de variation, par rapport à la forme géométrique du micro réchauffeur.

Le matériau polysilicium utilisé, aussi, dans la conception virtuelle du micro-réchauffeur présente des variations de gamme de température lente par rapport au matériau platine.

REFERENCES

- [1] Xiao Liu , Sitian Cheng
"A Survey on Gas Sensing Technology "
Sensors vol.12 , pp. 9635- 9665, 2012.
- [2] Manju Ahuja, Rajneesh Talwar, B. Prasad
Simulation of mems microhotplate for metal oxide gas sensors : review
ICRTEDC -2014, Vol. 1, Spl. Issue 2(May, 2014)
- [3] Woo- Jin Hwang, Kyu- Sik Shin, Ji- Hyoung Roh, Dae- Sung Lee and Sung- Hoon Choa
Development of Micro- Heaters with optimized Temperature Compensation Design for Gas
Sensors
Sensors 2011.
- [4] L.Sujatha ,V.S.Selvakumar, S.Aravind, R.Padamapriya, B.Preethi
Design and Analysis of Micro-Heaters using COMSOL Multiphysics For MEMS Based Gas
Sensor.
Excerpt from the proceedings of the 2012 Comsol conference in Bangalore.
- [5] Md. Nazibul Hasana, Debabrata Acharjeea, Dhiraj Kumarb, Arvind Kumarb, Santanu
Maityb
Simulation of low power heater for gas sensing application
Procedia Computer Science 92 (2016) 213 – 221.
- [6] Velmathi .G, Ramshanker .N and Mohan .S
2D Simulations and Electro-Thermal Analysis of Micro-Heater Designs Using COMSOLTM
for Gas Sensor Applications
Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 India.
- [7] <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>

