



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغزور خنشلة
لكلية العلوم والتكنولوجيا
القسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude

présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

**Spécialité : Automatique et Informatique
Industrielle**

THEME

**Etude et analyse l'effet
de la température sur la
sensibilité des
capteurs piézorésistive**

*Réalisées par : - Bezza Oussama
- Zidane Ayoub*

Devant Le Jury :

<i>Président:</i>	<i>Dr. Bouras Mustafa</i>
<i>Rapporteur:</i>	<i>Dr. Beddiaf Abdelaziz</i>
<i>Examineur:</i>	<i>Dr. Berkani Abdelhakim</i>

Promotion 2021/2022

Remerciement



*Nous remercions avant tout **ALLAH** tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, la patience et la volonté pour réaliser ce travail. Nous tenons d'abord à remercier notre encadreur monsieur **BEDDIAF Abdelaziz** pour ses judicieux conseils et ses critiques constructives tout au long de la réalisation de ce travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury (**BOURAS Mustafa, BERKANI Abdelhakim**) pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons à remercier particulièrement toutes les responsables de département Génie industriel ainsi que nos collègues.*



Dédicaces

Je dédie ce travail

*A la personne la plus précieuse de mon père, que Dieu lui fasse
miséricorde,*

et à ma chère mère, qui a été la raison de mon arrivée ici, que Dieu

La préserve et prolonge sa vie.

A mes frères et ma sœur A toute ma famille sans exception

A mes amis

*A tout ma promotion de spécialité automatique et informatique
industriel*

Résumé :

Le domaine de l'instrumentation des capteurs de pression à détection piézorésistive ou capacitive est en constante évolution. Ces capteurs représentent aujourd'hui le segment le plus important du marché des MEMS . Ils sont présents dans de nombreux domaines en tant que premier élément de la chaîne de mesure. Le but principal de cette thèse consiste à étudier et à modéliser le comportement thermomécanique de ces capteurs. Nous avons débuté notre travail par une étude bibliographique sur l'état de l'art de ces dispositifs, en donnant quelques concepts sur les propriétés mécaniques et physiques du matériau utilisé dans la réalisation de ces capteurs. Ensuite on a étudié la déflexion au centre de la membrane et la contrainte normale agissant sur ses bords en fonction de la pression et de la température au repos. De plus, l'effet du dopage et de la température sur la tension de sortie du capteur et l'influence de la configuration du manomètre ont également été examinés. L'augmentation de la température provoque des dérives considérables dans la tension de sortie, qui sont dues non seulement aux processus de fabrication mais également au chauffage par effet Joule, cela nous a incité à consacrer par la suite toute une étude sur les dérives thermiques générées par cet effet dans les capteurs de pression piézorésistifs. Nous avons décrit l'incidence de la tension d'alimentation, du temps de fonctionnement et de leurs paramètres géométriques sur leurs caractéristiques de sortie. Les résultats obtenus ont confirmé que la faible tension de polarisation devrait être appliquée pour réduire l'effet Joule. De plus, le chauffage interne est inversement proportionnel aux dimensions de la membrane et à la longueur de l'élément piézorésistif. D'autre part, les résultats ont montré que l'auto-échauffement est sensiblement réduit pendant un court temps de fonctionnement du dispositif et la température prend une valeur d'état stationnaire au-delà de 100 min et devient indépendante du temps. Afin d'évaluer la fiabilité du capteur, nous avons couplé l'expression qui a été obtenue avec celle du KANDA pour évaluer le coefficient de piézorésistivité π_{44} et la sensibilité en fonction de la tension de polarisation et de la durée de fonctionnement du dispositif. Les résultats ont également montré que π_{44} et la sensibilité à la pression sont inversement proportionnelles à la tension d'alimentation et à la durée de fonctionnement, et sont proportionnelles à la longueur de la membrane et à celle de la jauge.

Mots clés : Capteur de pression, Piézorésistif, Capacitif, Dérives thermiques, Modélisation, Optimisation, Pression intraoculaire.

Abstract:

The field of instrumentation of pressure sensors with piezoresistive or capacitive detection is constantly evolving. At present, these sensors make up the largest segment of the network.MEMS market. They are found in many areas as the first element of the measurement chain.

The main goal of thesis in hand is to study and model the thermo mechanical behavior of these sensors. We have begun our work with a bibliographic study on the state of the art of such devices, giving a few concepts on the mechanical and physical properties of.the material used in the realization of these sensors. Then, we have studies the deflection at the center of the membrane and the normal stress acting on its edges as a function of pressure and temperature at rest. In addition, the effect of doping and temperature on the output voltage of the sensor and the influence of the configuration of the gauges were also studied.

Given that the increase in temperature causes considerable drifts in the output voltage, which are due not only to the manufacturing process but also to Joule heating, this prompted us to devote a whole study to the thermal drifts generated by this effect in the piezoresistive pressure sensors. We have described the influence of the supply voltage, the operating time and its geometric parameters on its output characteristics.

The obtained results confirmed that the low polarization voltage should be applied to dimensions of the membrane and to the length of the piezoresistive element. On the other hand, the results showed that the self-heating is substantially reduced during a short operating time of the device and the temperature assumes a steady state value beyond 100 min and becomes independent of time.

To assess the reliability of the sensor, we matched the resulting data.expression with that of the KANDA to evaluate the piezoresistivity coefficient π_{44} and the sensitivity based on polarization voltage and time operation of the device.The results has shown that π_{44} and pressure sensitivity are inversely proportional to the supply voltage.and the duration of operation, they are proportional to the length of the diaphragm.

Keywords: Sensor, Pressure, Piezoresistive, Capacitive, Thermal drifts, Modeling, Optimization.

الملخص:

ان مجال استعمال أجهزة السنتشعار الكهروضغطية أو السعوية هو في تطور تتواجد هذه الأخيرة في MEMES. مستمر، حاليا هذه الأجهزة هي الأكثر روجا في سوق العدید من التطبيقات على أساس انه العنصر الأول في سلسلة القياس. ان الهدف الرئيسي لهذه الطروحة هو دراسة ونمذجة السلوك الميكانيكي و حاري لهذه الأجهزة لبدأنا هذا العمل بمعاينة بعض الاعمال السابقة بعبارة اخرى لمحاكاة السلوك الميكانيكي للهيكل ولجهاز ككل خالصين الى حاسابة الجهاز للضغط وهذا بعد تطرفنا لبعض المفاهيم الميكانيكية و الفيزيائية لمادة السيلكون المستعمل في صناعة الغشية. بعدها قمنا بدراسة الجهدات الحرارية الناجمة عن مفعول جول في أجهزة السنتشعار الكهروضغطية، ومدى تأثير مدة التشغيل والتوتر المطبق على المقاومة في خصائص مخرجه.

النتائج أكدت انه لنخفيض مفعول جول البعد من تطبيق نوتر منخفض. عاوية على ذلك التسخين الذاتي يتناسب عكسيا مع ابعاد الشريحة وطول المقاومة. من ناحية أخرى أظهرت النتائج ان التسخين الذاتي يتناسب بنقصان مدة التشغيل وتصبح درجة الحرارة غير متعلقة بزمن التشغيل ابتداء من 100 دقيقة من استعمال الجهاز. النتائج المتحصل عليها اثبتت أيضا ان معامل وحسابة الجهاز للضغط يتناسب عكسا مع التوتر المطبق ويتناسب طرعا π الكهروضغطية 44 مع ابعاد الغشاء وطول المقاومة

الكلمات المفتاحية:

ألتشعار الضغط الكهروضغطية و السعوية ، الجهدات الحرارية، النمذجة.

Titre	Page
Remerciements	/
Dédicace	/
Résumé	/
Table des matières	/
Liste des Abréviations et des symboles	/
Introduction générale	01
Chapitre I : Etat de l'art	
I.1. Introduction	02
I.2. Capteurs de pression	03
I.3. Caractéristiques des capteurs	04
I.4. Avantages et inconvénients des capteurs de pression piézorésistifs	05
I.5. Capteurs de pression	06
I.5.1. Capteurs de pression piézo-resistifs	06
I.6. Conclusion	10
Références bibliographiques	11 - 13
Chapitre II : Capteurs de pression piézo-resistifs	
II.1. Introduction	14
- Description et principe de fonctionnement	14
II.2. Propriétés mécaniques et physiques du Silicium	15
II.2.1. Phénomène de piézorésistivité	18
II.2.2. Coefficients de piézorésistivité	22
II.3. Modélisation et simulation de la membrane	24
II.3.1. Modélisation de la membrane	24
II.3.2. Simulation la membrane	26
II.4. Conclusion	31
Références bibliographiques	32 - 34

Chapitre III : Dérives thermiques dans les capteurs de pression piézo-resistifs	
III.1. Introduction	35
III.1.2 Transfert thermique	35
III.2. Modélisation de l'effet Joule dans les capteurs de pression	37
III.2.1. Méthode des différences finies	40
III.3. Paramètres d'influence sur la génération de la température	43
III.3.1 Effet de la tension de polarisation	44
III.3.2 Influence de la durée de fonctionnement	45
III.4. Influence de la durée de fonctionnement S_p	48
III.4.1. Influence de la durée de fonctionnement sur la sensibilité S_p	49
III. 4.2. Influence de la tension sur la sensibilité S_p	51
III.5. Conclusion	54
References bibliographiques	55 - 58
Conclusion général	59

Liste des Abréviations et les symboles

$\Pi_{11} \Pi_{12} \Pi_{13} \Pi_{14} \Pi_{44}$	coefficient de piézorésistivité
B	contraint dans un petite volume de hook
ϵ	la déformation
V	coefficient de paisson
G	module de cisaillement ou de colomb
α	coefficient d'anisotropie
R	résistance
S	section
L	longueur
∂	flux de courant
ρ	résistivité
$\frac{\Delta\rho}{\rho}$	la variation relative da résistivité
$\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta}{S}$	La deformation
ρ_0	la résistivité ou repos d'un matériou longéne
E	le champ électrique
T	la température applique
K_b	la constant de boltezmane
E_f	l'energie de ferm
P	pression applique
D	la rigidité du matréou
$\alpha:$	le coté
ω	la déflexion
p_a	unité mondial pour misérére la pression
A_{nsys}	est un éditeur de logicielle spatialisé en simulation numérique
Fluent	logicielle de modélisation en mécanique de fluide
Coventor	logiciel de convertire
Comsol	logicielle de simulation
EDP	équation de dérivée partielles
V out	tension de sortie
V0	tension de l'alimentation de pont

Cp	capacité calorifique
A	la surface de solide
ϕ_{conv}	le flux convectif
K^{-1}	coefficient de convection du silicium
FDm	methode de différences finies

Introduction générale

La nécessité de l'automatisation de certains processus dans des secteurs aussi variés comme la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides, la biophysique, la médecine..., nous pousse à introduire de plus en plus des capteurs en tous genre. En particulier, on distingue le capteur de pression qui constitue une partie importante du marché des dispositifs MEMS.

C'est un dispositif, qui transforme essentiellement une grandeur physique, objet de la mesure nommé le mesurande, en une autre grandeur physique, généralement électrique image de la grandeur d'entrée .

Dans ce type de capteur, il y a plusieurs façons de détecter la déformation d'un diaphragme soumis à une pression uniforme et constante. La plus évidente est de déterminer la deflexion de la membrane en exploitant la piézorésistivité du silicium pour le capteur de type piézoresistif ou en utilisant le changement de la capacité pour le type capacitif .

Notre objet dans cette étude est de l'optimisation du fonctionnement des capteurs de pression ,peu importe la chaleur (l'effet de JOULE) .

Ce travail est structurée en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré pour des généralités sur les capteurs de pression piézoresistifs, dont leur principe de fonctionnement, avantages et inconvénients de ces types , les caractéristique ainsi que les comportements mécanique et thermique.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à l'étude des micro-capteurs de pression piézoresistifs. Ainsi nous entamons cette étude par une brève description de ces dispositifs ainsi que leur principe de fonctionnement , explication du phénomène de la piézorésistivité dans la membrane de silicium et leur caractéristique mécanique .

Le troisième chapitres consiste à étudier les dérives thermiques dans les capteurs de pression piézoresistifs, pour ce faire, nous consacrons en premier lieu une partie aux généralités sur le transfert thermique et ses trois modes de transfert. Par la suite, une deuxième partie est réservée aux interprétations des résultats obtenus concernant les dérives thermiques provoquées par le chauffage par effet Joule dans les capteurs de pression piézoresistifs.

I.1. Introduction

De nombreux domaines tels que la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides, la biophysique, la médecine..., nous pousse à introduire de plus en plus des capteurs en tous genre. En particulier, on distingue les capteurs de pression, de type piézorésistif ou capacitif, qui constituent la plus grande partie du marché des dispositifs MEMS. Ce capteur un dispositif, qui transforme essentiellement une grandeur physique, objet de la mesure nommé le mesurande, en une autre grandeur physique, généralement électrique image de la grandeur d'entrée [1-6].

Leur principe fonctionnement est basé sur la variation d'une piézoresistance ou d'une capacité en fonction de la pression appliquée. Le silicium est le matériau clé pour la réalisation des dispositifs MEMS. Les connaissances sur ce matériau ont considérablement progressées depuis qu'il est devenu la base de l'industrie de la microélectronique et de la micro-technologie. Ce qui le rend, l'un des matériaux les plus utilisés dans le monde avec des caractéristiques lui permettant de répondre aux besoins des nouveaux dispositifs de très hautes performances [1-6]. Ils constituent actuellement le plus gros segment du marché des dispositifs MEMS.

L'objectif de ce travail est d'étudier les capteurs pression piezoresistif. En générale, les capteurs de pression sont composés d'un élément déformable (corps d'épreuve) dont les déformations sont mesurées et converties en signaux électriques en fonction des valeurs de la pression [7-14].

Avec l'évolution de la technologie microélectronique et l'utilisation des microsystèmes (MEMS) les capteurs de pression ont connus une révolution technologique impressionnante. La miniaturisation de ces dispositifs, a permis de diminuer le nombre de parties constitutives, mais surtout le nombre d'assemblages en aboutissant ainsi à des microcapteurs. Ces derniers intègrent sur la même puce le microcapteur, l'actionneur, toute l'électronique associée ainsi que la partie numérique qui, souvent, fait intervenir un microprocesseur embarqué. Celui-ci peut avoir comme objectif de modifier le comportement interne du microcapteur afin d'optimiser sa capacité à collecter les données, ou simplement pour effectuer localement des traitements et des calculs. Nous allons par la suite décrire ces dispositifs en explicitant leurs principales caractéristiques.

I.2. Capteurs de pression

Les capteurs sont chargés de transformer une grandeur physique, objet de la mesure, nommée mesurande, en une autre grandeur physique, généralement électrique image de la grandeur physique et de ses variations. Le signal électrique à la sortie du capteur est assuré au moyen des variations des propriétés physiques de l'élément sensible (résistance, capacité, bobine,...), comme dans le cas des capteurs passifs, ou par l'exploitation des effets physiques appropriés (piézoélectricité, électroluminescences, effet hall, magnétostriction...), c'est le principe des capteurs actifs [15-17].

Le capteur de pression est composé de deux grandes parties : une pour la détection «cellule sensible » et l'autre pour le traitement de signal : circuit électronique de traitement ou le circuit électronique de mise en forme (figure I.1).

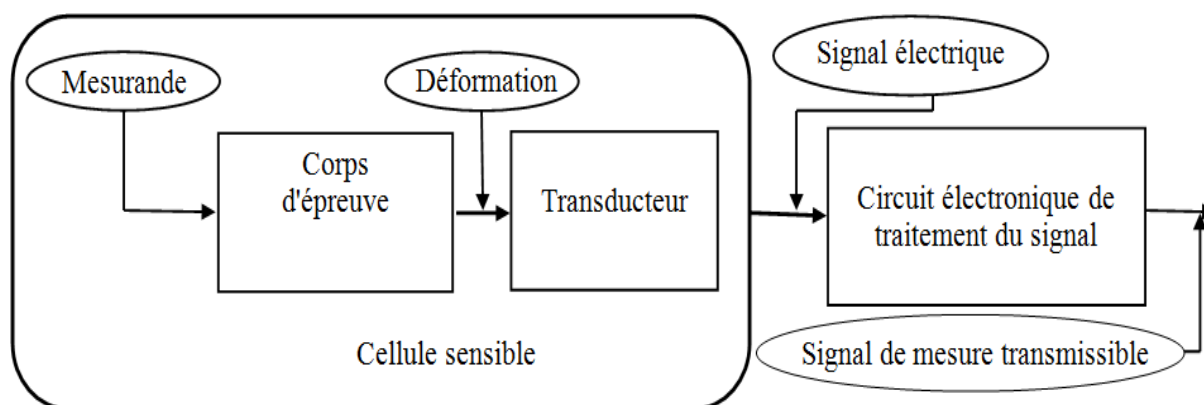


Figure I.1 : Schéma synoptique du capteur de pression.

1) Cellule sensible

La cellule sensible est composée du corps d'épreuve et d'un élément de transduction.

a) Corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis au mesurande étudié assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique, le mesurande secondaire, qu'un capteur adéquat traduit alors en grandeur électrique. L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif constitue un capteur composite.

Les corps d'épreuve les plus utilisés sont les plaques, les poutres et les membranes (diaphragmes).

Ces nouveaux dispositifs sont basés sur la déformation d'une membrane de silicium qui, de nos jours, est le corps d'épreuve le plus répandu en raisons de ses excellentes propriétés mécaniques et physiques [18-23].

b)Le transducteur est l'élément sensible qui est lié directement au corps d'épreuve. Il permet de traduire la réaction de ce dernier en un signal électrique. Pour effectuer la mesure de la pression, cet élément peut générer l'un des types de signaux suivants: une tension électrique, un courant électrique ou une charge.

2)Circuit électronique de traitement du signal

C'est un circuit électronique qui convertit, compense ou modifie le signal de sortie du transducteur afin de le transformer en un signal électrique usuel tel qu'un courant, une tension ou une charge. Il est souvent physiquement indissociable du transducteur, il sert à mettre en forme un signal électrique transportant l'information donnée par le transducteur. Autrement dit, ce signal doit être l'image de la déformation du corps d'épreuve et par suite, de la pression appliquée à l'entrée du corps d'épreuve.

Le développement de la microélectronique a permis d'intégrer ces nouvelles technologies au sein de ce circuit électronique de traitement. L'évolution des techniques numériques a également permis à ce circuit d'ajouter aux microcapteurs de nouvelles fonctionnalités comme la correction des erreurs de mesure, effectuer localement des traitements et des calculs, l'auto-ajustage, l'autodiagnostic, la reconfiguration dynamique et la communication en réseaux avec des systèmes extérieurs.

Ce qui lui a conféré de nombreux avantages tels que: une haute précision de mesure, un coût très réduit, une facilité d'utilisation...

I.3. Caractéristiques des capteurs

Chaque capteur présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurande, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber l'élément de mesure.

a) La sensibilité

La sensibilité d'un capteur représente le rapport de la variation du signal de sortie à la variation du signal d'entrée, pour une mesure donnée. C'est donc la pente de la courbe de réponse de ce capteur.

b) La linéarité

La linéarité est une caractéristique qui définit la constance de la sensibilité sur toute la plage de mesure. La plage de linéarité est la plage dans laquelle le microcapteur possède une caractéristique linéaire.

c) L'étendue de mesure

L'étendue de la mesure est la plage de variation de la grandeur d'entrée (mesurande) pour laquelle le microcapteur répond aux spécifications.

I.4. Avantages et inconvénients des capteurs de pression piézorésistifs

Ce type de dispositifs ont été développés et largement utilisés dans les applications de l'industrie et de la biomédicale en raison de leur haute performances en matière de sensibilité, et présente une haute linéarité, ainsi que pour leur facilité du traitement du signal [8].

Cependant, ces capteurs ont les inconvénients suivants :

➤ Le coefficient de dilatation thermique ou coefficient de température des jauges de contraintes piézorésistives (ou les piézorésistances), est assez grand [24]. Pour de nombreuses applications, les transducteurs piézoresistifs doivent être soigneusement calibrés avec une compensation des dérives thermiques. Ce qui est généralement très complexe et très onéreux.

➤ Sont sensibles aux contraintes, leurs performances sont étroitement liées aux technologies de packaging. Toute contrainte mécanique ou de discordance thermique entre la puce et son boîtier (packaging) peut provoquer une tension de décalage et une dérive en température du signal de sortie.

Nous allons à présent décrire quelques travaux de recherche effectués sur ce type des capteurs.

I.5. Capteurs de pression

I.5.1. Capteurs de pression piézoresistifs

Les capteurs de pression piézorésistif ont été développés dans les années 1960, fabriqués en utilisant des matériaux dont la résistance électrique est fonction de la contrainte (jauge de contrainte ou piézorésistance) et constituent aujourd'hui la majeure partie des microcapteurs de pression fabriqués dans le monde.

Smith a découvert, en 1954, l'effet piézorésistif. Ce dernier représente la variation de résistivité d'un corps de germanium ou de silicium soumis à une variation de contraintes mécaniques [9]. Il a découvert que la modification de la résistance dans un semi-conducteur est principalement provoquée par la variation de la résistivité du matériau subissant une contrainte mécanique, due à la déformation des bandes d'énergie.

Avec la découverte de cet effet de valeur assez élevée, dans le silicium monocristallin, et avec ses excellentes propriétés physiques, font du silicium un matériau par excellence pour la conversion d'une déformation mécanique en un signal électrique. De nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont été consacrés à l'étude de cette importante propriété en vue de la conception des microcapteurs de pression piézoresistifs avec de très hautes performances. Dans le domaine de la recherche ces capteurs ont un grand potentiel pour diverses applications en raison de leur simplicité.

Le modèle permettant de déterminer la déformation de la membrane en fonction de la pression et de la température, par la méthode des différences finies a été conçu en 1982 par Wise [10]. Il a déterminé par la suite, la réponse thermomécanique des capteurs de pression piézoresistifs ainsi que l'optimisation de leurs performances. Ces travaux ont conduit à la réduction de la sensibilité thermique du capteur dans une gamme de température réduite (-30 à 70 °C).

En 1995 El Gamel [12] a développé une nouvelle technique semi analytique simple afin d'améliorer l'efficacité de la méthode utilisée par Wise. Son modèle permet de déterminer la déflexion de la membrane sous une pression statique et uniforme dans le cas de

grandes déformations. Il a ainsi déterminé les contraintes en utilisant les lois de Hooke, et par la suite le changement de la résistance. Le comportement thermique établi dans ce modèle est limité à la température ambiante. Cependant, ce modèle présente d'une part ses limitations concernant l'étude en température, et d'autre part des difficultés rencontrées lors du couplage de différents phénomènes physiques pour la simulation précise de la réponse du capteur.

Une modélisation du comportement thermomécanique des capteurs de pressions par le modèle des éléments finis sous environnement ANSYS a été effectué Chauffleur [13] en 1998 pour pallier aux difficultés rencontrées dans la technique utilisée par El Gamel. Ces capteurs sont munis d'un corps d'épreuve composé d'une membrane en silicium et d'un substrat en pyrex. Cet auteur a développé des procédures de calculs numériques spécifiques pour simuler leur réponse. Ces procédures reposent sur l'hypothèse de couplage des trois phénomènes physiques : thermique, mécanique et électrique. Cette approche lui permis de modéliser, remarquablement bien, la réponse en pression des capteurs ainsi que leur comportement thermique à partir des lois fondamentales de la physique et des propriétés des matériaux. Dans cette étude, les défauts de parallélisme de la membrane, qui sont à l'origine de la perte de la sensibilité dans un capteur de pression piézorésistif au silicium, n'ont pas été pris en compte.

Pour cette raison, une nouvelle approche qui traite la modélisation d'une structure réalisée par des techniques microélectroniques et gravure chimique, contenant quatre piézorésistance de type P connectés en pont de Wheatstone a été présenté par Dibi [14] en 2002. Il a d'une part, simulé le défaut de parallélisme des deux côtés de la membrane et a étudié son incidence sur la sensibilité du capteur de pression piézorésistif au silicium, d'autre part il a tenu en compte les effets des dimensions réelles des jauges en fonction de leurs positions sur la membrane.

Les travaux d'Aljancic [15], portent sur l'étude des effets de la température et de la compensation des dérives thermiques de la tension de décalage (offset) du capteur de pression piézorésistif au silicium. Les mesures qu'il a effectuées confirment l'importance des contraintes thermiques induites sur la membrane. Dans ces travaux une approche de compensation de la dérive en température de la tension de décalage est proposée puis confirmée avec des résultats expérimentaux.

Pramanik [2] en 2006 a met au point à un modèle analytique pour la résolution de l'équation de transfert de chaleur en coordonnées cylindriques pour une structure circulaire en

régime variable en utilisant la méthode de superposition de variables, pour modéliser l'élévation de la température dans la résistance ainsi que son impact sur la réponse du capteur. Elle a également développée un modèle thermique sous environnement Pspice, afin d'estimer l'élévation de la température dans la résistance. Ce modèle permet d'obtenir une relation entre les paramètres du circuit thermique équivalent et les paramètres de conception de la membrane, de sorte que l'élévation de la température peut être obtenue à partir du circuit thermique équivalent en fonction de la tension aux bornes de la capacité thermique.

Compte tenu de l'importance de la modélisation du comportement mécanique de la membrane dans le but d'améliorer et d'optimiser la réponse en pression du capteur; plusieurs approches ont été proposées pour déterminer la solution de l'équation de Lagrange d'ordre 4 régissant la déflexion d'une plaque parfaitement encadrée aux bords dans le cas des petites et grandes déformations.

Kerrou [6] en 2008 a présenté une approche qui consiste à utiliser la méthode de Galerkin avec des fonctions de base trigonométriques pour la résolution de l'équation aux dérivées partielles, qui régit la déformation d'une membrane mince de forme carrée en silicium, parfaitement encadré et soumise à une pression constante et uniforme dans le cas des faibles perturbations. Il a appliqué les résultats obtenus de la déformation mécanique d'une membrane de formes carrée et rectangulaire à un capteur de pression piézorésistif et capacitif.

Les travaux d'Olszacki [4] en 2009 portent sur misent en œuvre à des modèles analytiques pour modéliser un capteur de pression piézorésistif ou capacitif. Ces derniers ont été validés et optimisés par des simulations par élément finis sous environnement ANSYS et Matlab. Dans ces mêmes travaux, l'auteur a aussi effectué la fabrication et la caractérisation des cellules de test dont le comportement est ensuite comparé aux modèles analytiques établis. Ce qui a permis de montrer que les modèles utilisés généralement pour décrire la dérive thermique des piézorésistances présentaient des erreurs importantes.

Pour mener à bien l'étude et la compensation de ces dérives en température en sortie du capteur, Ras Lain [17] a présenté une approche théorique basée sur les divers modèles de mobilité pour déterminer les coefficients de dilatation de température du premier et du second ordre. Ce qui lui a permis de combiner l'effet de ces deux coefficients de température avec le

coefficient de piézorésistance π_{44} sur le comportement résistif du silicium type P. Il a ainsi proposé deux techniques de compensation de la dérive thermique de la tension d'offset.

Un système intelligent de compensation de la température pour réduire son effet sur la précision des capteurs a été proposé par Zhou [20] en 2014. En premier lieu, un circuit de conditionnement efficace pour l'acquisition de données et de traitement de signal est conçu. Par la suite, des essais pratiques de mesure de la pression sont effectués pour vérifier la performance du système. La compensation de la température est résolue dans l'intervalle de -40 à 85 °C. Le capteur compensé vise à fournir une mesure de pression dans les conduites d'huile de gaz.

A partir de cette étude bibliographique, il serait nécessaire de compléter ces travaux par des modélisations et simulations thermomécaniques afin de mieux cerner notamment les origines des dérives thermiques qui sont très complexes et qui mettent sûrement en œuvre des phénomènes croisés. Donc, la phase d'optimisation d'un microcapteur est très importante parce qu'elle affecte la réussite du projet. Pour diminuer le nombre de vérifications expérimentales on doit impérativement mener des simulations faites sur des logiciels puissants. Ces derniers offrent la possibilité d'effectuer de nombreuses simulations dans un temps très court, permettant également d'estimer l'influence du procédé technologique sur la performance des ces dispositifs. Ces techniques de simulation fournissent des informations physiques et mécaniques détaillées de la structure étudiée. Ceci permet de mieux comprendre l'effet des grandeurs d'influence affectant la sensibilité des microcapteurs.

La synthèse de ces travaux nous a amené à une investigation approfondie sur le comportement thermomécanique de ces capteurs.

a) Comportement mécanique

Dans une récente étude [21], nous avons entamé une simulation du comportement mécanique d'un microcapteur de pression piézorésistif au silicium par la méthode des éléments finis sous environnement COMSOL. Le modèle numérique établi permet de déterminer la déflexion maximale ainsi que les contraintes normales aux milieux des bords de la membrane en fonction de la pression.

b) Comportement thermique

Le conditionneur (pont de Wheatstone) utilisé dans les microcapteurs de pression piézoresistifs, est généralement alimenté par une tension continue de 3 à 10 V, provoquant ainsi des dérives thermique par effet Joule.

Afin de déterminer l'influence de cet effet dans ce type de capteurs, nous avons établi un modèle numérique, en utilisant la méthode des différences finies (*FDM*), de la répartition de la chaleur le long de la piézorésistance, en coordonnées cartésiennes en régime dynamique pour une structure carrée [22, 23].

Pour mettre en évidence l'influence de la tension appliquée sur la répartition de la chaleur le long de la piézorésistance, nous avons calculé l'évolution de la température pour différents paramètres géométriques du dispositif, ainsi que pour différentes durées de fonctionnement. Ce qui nous permet de mettre l'accent sur l'influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques du capteur pour optimiser ses performances. Les résultats ont montré que l'optimisation des paramètres géométriques du capteur permet de réduire l'effet de chauffage interne, confirmant également que la faible tension de polarisation doit être appliquée pour réduire le chauffage par effet Joule.

L'ensemble des travaux qu'on a effectué ont mis l'accent sur l'influence de la température sur les caractéristiques de sortie des capteurs de pression. Ces travaux nous ont permis de prédire l'effet de la température sur les performances de ces dispositifs, et de minimiser cet effet par l'optimisation de leurs paramètres géométriques.

I.6. Conclusion

Ce premier chapitre consiste en une étude des microcapteurs de pression piézoresistifs et capacitifs, en explicitant leurs principales caractéristiques, leurs performances, leur technique de conception et de fabrication. En second lieu, une synthèse bibliographique sur les capteurs, les microcapteurs et les MEMS décrivant l'essentiel des travaux déjà effectués dans le domaine.

Afin d'améliorer leurs performances et d'optimiser leurs caractéristiques, nous allons dans ce qui suit proposer des modèles qui permettent de prédire leur comportement mécanique et thermique.

Références bibliographiques

- [1] Liwei Lin, Member, IEEE, Huey-Chi Chu, and Yen-Wen Lu, (1999). "A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors", *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 8, no. 4.
- [2] C.Pramanik, *et al.*, (2006). "Development of SPICE Compatible Thermal Model of Silicon MEMS Piezoresistive Pressure Sensor for CMOS- MEMS Integration," *IEEE Sensors*, Korea.
- [3] Stephen D. Senturia "Microsystem Design" Massachusetts Institute of Technology
- [4] Michal Olszacki "Modelling and optimization of piezoresistive pressure sensors" Thèse de doctorat Université de Toulouse juillet 2009.
- [5] Cezary MAJ "Modelling and optimization of electrostatic membrane-based actuators" Thèse de doctorat Université de Toulouse juillet 2009.
- [6] Fouad Kerrou and Farida Hobar "A novel numerical approach for the modelling of the square shaped silicon membrane", *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2006. V. 9, N 4. P. 52-57.
- [7] Menini, P. "Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium" Thèse de doctorat Université de Toulouse , France (1998).
- [8] Jacob Fraden "Hindbouck of modern sensors. Physics, design and application" 4^{ieme} édition
- [9] Smith, C.S. Piézorésistance Effect in Germanium and Silicon. *Physical Review*, **94**, 42-49. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.94.42>, (1954)
- [10] K.W. Lee and K.Wise. « SENSIM : A Simulation Program for Solid-state Pressure Sensors ». IEEE. 1982.
- [11] A . Boukaabache "Conception, modélisation et réalisation d'un capteurs de pression piézoresistif à faible dérives thermiques" Thèse de doctorat Université de Toulouse 1993.
- [12] H.E. Elgamel, Closed form expressions for the relationship between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A*, 50 (1995) 17-22.
- [13] X. Chauffleur " Modélisation par la méthode des éléments finis du comportement thermomécanique de capteurs de pression capacitif et piézoresistif en silicium" Thèse de doctorat Université de Toulouse 1998.

- [14] Z. Dibi et A. Boukabache " Combined effect of the membrane flatness defect and real dimensions gauges on the sensitivity of a silicon piezoresistive pressure sensor " 0-7803-7454-1/02/\$17.00 02002 IEEE
- [15] U. Aljancic, D. Resnik "Temperature Effects Modeling in Silicon Piezoresistive Pressure Sensor" IEEE MELECON 2002, May 7-9,2002, Cairo, EGYPT.
- [16] Mohamed Souilah *et al.* Fabrication Process for PCBMEMS Capacitive Pressure Sensors Using the Cu Layer to Define the Gap. IEEE Sensors Journal, Vol. 16, No. 5, March 1, 2016.
- [17] Ras lain Mohamed. "Contribution à l'identification des paramètres de non idéalité dans les capteurs de pression piézo-resistifs au Silicium", Thèse doctorat de l'université de Constantine (2009).
- [18] M. A. Fraga et L. L. Koberstein "An Overview on the Modeling of Silicon Piezoresistive Pressure Microsensors " 978-1-4673-0870-0/12/\$31.00 ©2012 Crown
- [19] Xin Li, Qin Liu " High-temperature piezoresistive pressure sensor based on implantation of oxygen into silicon wafer " Sensors and Actuators A 179 (2012) 277– 282
- [20] Guanwu Zhou, Yulong Zhao, Fangfang Guo and Wenju Xu "A Smart High Accuracy Silicon Piezoresistive Pressure Sensor Temperature Compensation System" Sensors 2014, 14, 12174-12190.
- [21] Abdelaziz, Beddiaf., Fouad, Kerrou., and Salah Kemouche. "Thermo mechanical Modeling of Piezoresistive Pressure Sensor." International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), Vol. 7, No. 3, (2014).
- [22] Abdelaziz, Beddiaf., Fouad, Kerrou., and Salah Kemouche. "A Numerical Model of Joule Heating in Piezoresistive Pressure Sensors.", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol.6, No.3, (2016).
- [23] Abdelaziz, Beddiaf, *et al.* "Optimization of the thermal drift caused by Joule heating in piezoresistive pressure sensor". 12th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME 2016 Lisbon), 978-1-5090-0493-5/16/\$31.00 ©2016 IEEE.
- [24] Fouad Kerrou "Etude et modelisation de capteurs de pression piezo-resistifs et capacitifs au silicium", Thèse de doctorat Université de Constantine, (2008).
- [25] Abdelaziz, Beddiaf, *et al.*, "Thermal drift characteristics of capacitive pressure sensors," Journal of Engineering Science & Technology (JESTEC), Vol.11, No.6, (2016).

-
- [26] Abdelaziz Beddiaf, *et al.*, "Performance Optimization of a Capacitive Pressure Sensor" Key Engineering Materials Vol 644, pp 101-105 Trans Tech Publications, Switzerland, (2015).
- [27] N. Ben moussa "Conception, modélisation et réalisation d'un capteur de pression capacitif microélectronique", Thèse doctorat del'université de Toulouse, 1985.
- [28] G. Blasquez et al "Intrinsic thermal behaviour of capacitive pressure sensors: mechanisms and minimisation" Sensors and Actuators 85, (2000), pp. 65–69.
- [29] Blasquez, G. , Douziech and C., Pons, P. "Analysis characterisation and optimisation of temperature coefficient parameters in capacitive pressure sensors", Sensors and Actuators, A: Physical, Vol. 93, pp. 44-47 (2001).
- [30] C. Douziech. «Comportement Thermique des Capteurs de Pression Capacitifs au Silicium», Thèse doctorat del'université de Toulouse. 2001.
- [31] M. Al bahri. « Influence de la Température sur le Comportement Statique et Dynamique des Capteurs de Pression Capacitifs au Silicium», Thèse doctorat de l'université de Toulouse. 2005.

II.1. Introduction

Plusieurs domaines nécessitent l'application de microcapteurs de pression avec de haute précision [1-7]. On rappelle qu'ils sont les premiers maillons d'un système de perception, de contrôle ou de mesure. Dans ce chapitre on s'intéresse à l'étude des capteurs de pression piézoresistifs. Ainsi nous entamons cette étude par une brève description de ces dispositifs ainsi que leur principe de fonctionnement.

- Description et principe de fonctionnement

Le capteur de pression piézoresistif est composé de deux parties : une partie de détection nommée cellule sensible et une partie de traitement de signal. La partie détection est composée d'un corps d'épreuve et d'un transducteur piézoresistif qui transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur électrique. Le corps d'épreuve du microcapteur considéré est constitué d'une membrane micro usinée dans une plaquette de silicium, soudé sur un substrat rigide. En présence d'une pression extérieure, des déformations et des contraintes sont engendrées dans le corps d'épreuve. Des jauges de contraintes généralement de type P sont diffusées en surface de la membrane, et connectées en pont de Wheatstone, permettant de convertir ces sollicitations en variation de résistance. Le schéma fonctionnel de ce type de capteur peut être représenté par la figure II.1.

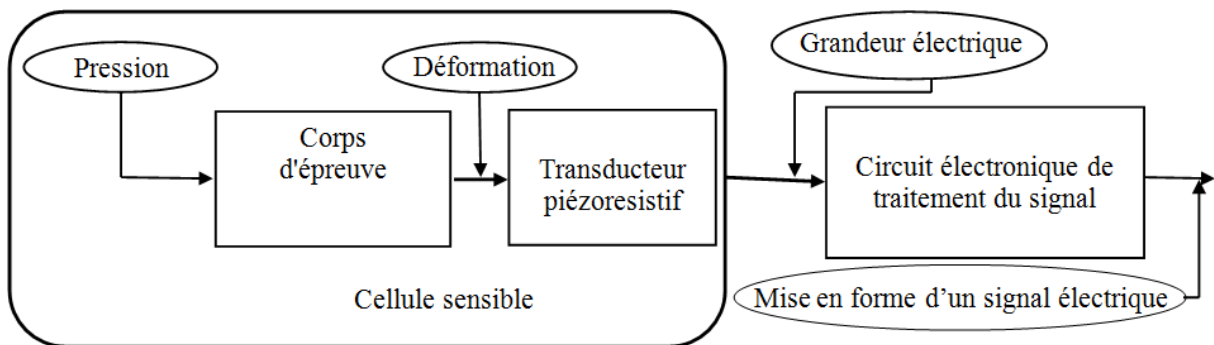


Figure II.1 : Schémas synoptique d'un capteur de pression piézoresistif.

Avec l'avènement de la technologie microélectronique, les capteurs de pression piézoresistifs à base de silicium ont beaucoup progressés. Cette technologie laisse entrevoir la possibilité de capteurs miniaturisés assurant de très hautes performances, avec des avantages techniques et économiques [8-11]. Afin d'améliorer les performances de ces dispositifs et de

réduire les coûts de leur développement, l'approche du prototypage virtuel devient indispensable.

Ce chapitre s'insère dans ce cadre, on se propose d'établir un modèle de comportement mécanique de la membrane. Mais avant cela, nous allons tout d'abord donner quelques concepts sur les propriétés mécaniques et physiques du silicium utilisé pour la réalisation de ce dispositif. Par ailleurs, nous établissons une étude théorique de l'effet combiné du dopage et de la température sur le coefficient de piézo-resistivité π_{44} .

En suite, nous allons simuler le comportement mécanique de la membrane. La comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature permet de valider notre modèle.

II.2. Propriétés mécaniques et physiques du Silicium

Les connaissances sur le silicium ont considérablement progressées, il est devenu le matériau de base par excellence de l'industrie microélectronique. Ce matériau est couramment utilisé aujourd'hui dans la construction d'appareils électroniques en raison de ses grandes propriétés électriques, mécaniques et physiques.

Les principaux avantages qui font du silicium le matériau le plus populaire dans la fabrication des microsystèmes sont : [12-15].

- ✓ Module d'Young élevé comparable à l'acier
- ✓ Faible densité
- ✓ Large gamme d'élasticité linéaire
- ✓ Haute limite élastique
- ✓ Une faible dilatation thermique
- ✓ Point de fusion à 1400 °C ce qui entraîne un traitement à haute température

- Tenseur des déformations

Les déformations dépendent des propriétés mécaniques du matériau. Selon la direction suivant laquelle la contrainte est exercée, les déformations résultantes sont généralement différentes. Pour définir l'état de la déformation en un point quelconque on utilise le formalisme tensoriel. Cette déformation est représentée par un tenseur symétrique de rang 2 :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ xx & xy & xz \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ yx & yy & yz \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ zx & zy & zz \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

-Tenseur des contraintes

La contrainte est une force divisée par une surface, elle est donc homogène à une pression et exprimée en Pascal ou N/m^2 dans le système international. Dans le cas général, chaque élément d'un cristal de forme cubique sous chargement mécanique est exposé à des contraintes normales et de cisaillement, comme cela est représenté sur la figure II.2. Pour représenter la contrainte en un point donné d'un matériau, on utilise le formalisme tensoriel. La contrainte σ dans un petit volume d'un matériau est exprimée dans la base des axes cristallographiques comme un tenseur de neuf éléments indépendants, ce dernier est décrit par l'équation II.2.

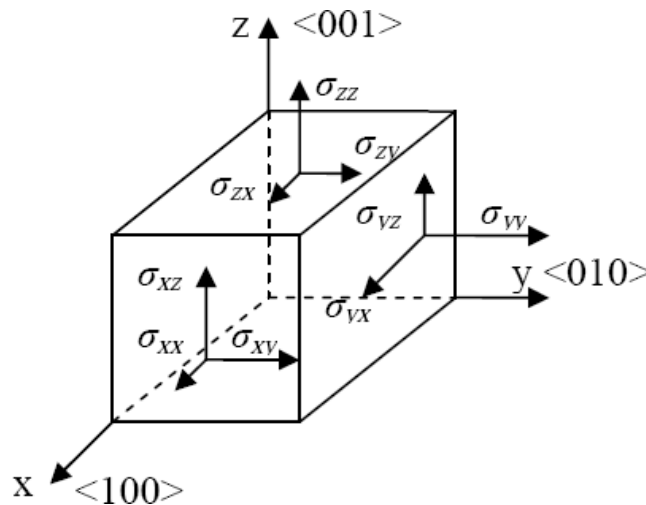


Figure II.2 : Composantes du tenseur des contraintes mécaniques.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma & \sigma & \sigma \\ xx & xy & xz \\ \sigma & \sigma & \sigma \\ yx & yy & yz \\ \sigma & \sigma & \sigma \\ zx & zy & zz \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

A l'équilibre, le tenseur de contrainte σ_{xy} est symétrique, $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ et il possède six composantes indépendantes [16-18]. Les déformations ε dépendent linéairement de ces contraintes mécaniques, par le module d'élasticité appelé module de Young E régissant ainsi la loi d'élasticité de Hooke [19, 20].

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{II.3})$$

En raison de la structure de type diamant du silicium, les directions orthogonales ont les mêmes propriétés mécaniques [17], ce qui conduit que le silicium monocristallin peut être considéré comme un matériau orthotrope. La relation contrainte-déformation pour le silicium cristallin, au lieu de sa forme de base (II.3), peut être fournis par l'équation suivante (II.4) [19, 20] :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec ν coefficient de Poisson, qui permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué [20]. Le coefficient G est appelé le module de cisaillement ou le module de Coulomb, qui est donné [19]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{II.5})$$

Notons que, les valeurs de ces coefficients dépendent des directions cristallographiques. Nous regroupons dans le tableau II.1, les paramètres mécaniques de base de silicium pour les directions les plus utilisées ($\langle 100 \rangle$ et $\langle 110 \rangle$) [20].

Directions	Module d'Young	Module de Coulomb	Module de Poisson	coefficient d'anisotropie
	E [GPa]	G [GPa]	ν	α
<100>	129.8	79.5	0.278	1.4067
<110>	168.9	50.4	0.0625	0.6621

Tableau II.1: Paramètres mécaniques du silicium en fonction de la direction cristallographique [20].

II.2.1. Phénomène de piézorésistivité

En 1856, le physicien britannique William Thomson a remarqué pour la première fois que la valeur de la résistance d'une barre métallique change quand elle est exposée à une charge mécanique. Cette propriété est exploitée par la suite pour la réalisation des corps d'épreuves dans les capteurs de pression piézo-resistifs.

Pour commencer, nous considérons une résistance R de forme parallélépipédique constituée d'un matériau homogène d'une section S et d'une longueur L comme il est montré sur la figure II.3.

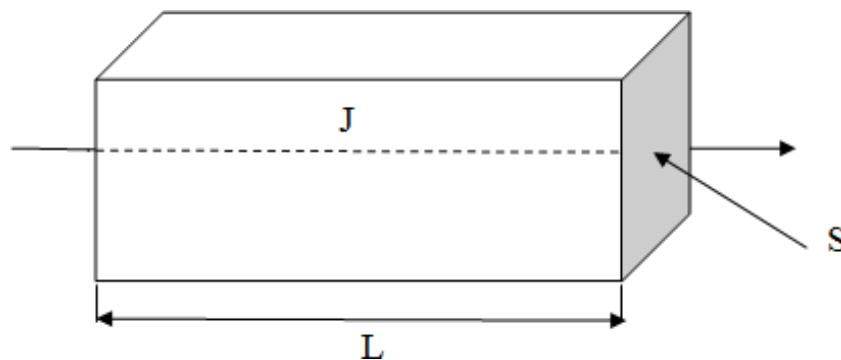


Figure II.3 : Résistance R de forme parallélépipédique

En appliquant un flux de courant J , à travers cette jauge, le long de sa longueur L , nous sommes en mesure de calculer sa résistance électrique R en utilisant l'équation II.6.

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{II.6})$$

Où L la longueur de la résistance en m, S sa section exprimée en m^2 et ρ sa résistivité.

Comme on peut le voir, afin de changer la résistance électrique, on peut effectuer l'une des deux actions suivantes : changer ses dimensions ou modifier sa résistivité figure II.4.

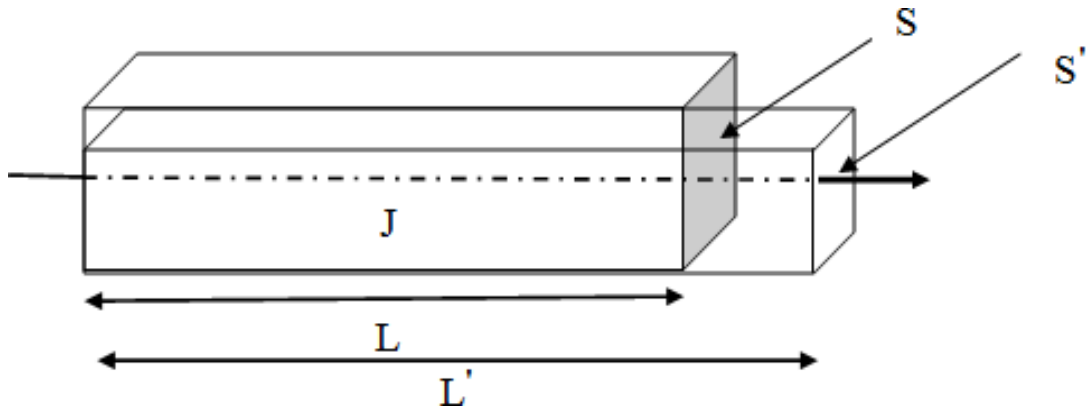


Figure II.4 : La résistance d'une barre de matériau sous l'effet d'une contrainte

La variation de cette résistance se fait sous l'application d'une contrainte (ou déformation), ce qui conduit au changement de la dimension latérale de la résistance.

$$R' = \rho \frac{L'}{S'} \quad (\text{II.7})$$

De manière générale la variation de la résistance s'écrit :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S} \quad (\text{II.8})$$

Où $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ représente la variation relative de résistivité et $\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S}$ est la déformation.

Dans la jauge métallique la résistance change essentiellement avec la variation de sa géométrie, donc les deux derniers termes de l'équation II.8 sont prépondérants, par contre la jauge piézorésistive présente une variation de résistance surtout due à la modification de sa résistivité. Pour une jauge à base d'un matériau semi-conducteur le premier terme de la relation (Eq.II.8) représente le changement de la résistivité dû à l'application d'une contrainte, il est largement dominant. La relation II.8 peut se réécrire sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} (1 + 2\nu) \quad (\text{II.9})$$

Cette double influence des contraintes sur les caractéristiques électriques et mécaniques du barreau existe dans la plupart des matériaux, qu'ils soient conducteurs ou semi-conducteurs. Cependant, en pratique et suivant la nature et la structure atomique des semi-conducteurs, les variations relatives des trois termes de l'expression II.8 traduisent cette influence et sont d'une importance inégale.

Prenons encore une fois, un barreau soumis à une contrainte (figure II.4), comme nous le savons depuis la partie précédente de ce chapitre, chaque élément du cristal de forme cubique sera exposé à des contraintes normales et de cisaillement (figure II.2). Il a été mentionné qu'il y'a deux éléments qui peuvent changer la valeur de la résistance électrique : résistivité et dimensions géométriques. Contrairement à la jauge métallique, en silicium la variation de la résistance est de 99% en raison de la variation de sa résistivité, puis pour la modification de sa géométrie [19]. Dans un matériau piézorésistif comme le silicium, le fait d'appliquer une contrainte modifie à la fois le nombre et la mobilité des porteurs, donc la résistivité.

L'effet piézorésistif représente donc, la variation de résistivité d'un corps soumis à une variation de contraintes mécaniques [21-25]. Cet effet est très important et anisotrope dans le silicium, il est exprimé par l'équation II.10 :

$$\rho = \rho_0 + \rho_0 \pi \sigma \quad (\text{II.10})$$

Où ρ_0 est la résistivité au repos d'un matériau homogène.

Dans un matériau semi-conducteur, la résistivité relie le champ électrique E et le flux de courant J par la relation suivante :

$$E = (\rho + \Delta\rho)J \quad (\text{II.11})$$

La forme finale de l'équation qui décrit la relation entre la contrainte et la résistivité de silicium, pour une orientation cristallographique (100) peut s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} \rho_{xx} \\ \rho_{yy} \\ \rho_{zz} \\ \rho_{yz} \\ \rho_{xz} \\ \rho_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{xx}^0 \\ \rho_{yy}^0 \\ \rho_{zz}^0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_{xx}^0 \\ \rho_{yy}^0 \\ \rho_{zz}^0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Les trois coefficients π_{11} , π_{12} et π_{44} décrivent complètement le comportement du matériau piézoresistif anisotrope, cristallisant dans le système cubique. Leur valeurs ont été estimées expérimentalement par Smith en 1954 [23] pour le silicium faiblement dopé, à la fois de type N et P (actuellement encore utilisées), le tableau II.2 résume ces valeurs.

Coefficient de piézoresistivité	π_{11} [10^{-11} Pa $^{-1}$]	π_{12} [10^{-11} Pa $^{-1}$]	π_{44} [10^{-11} Pa $^{-1}$]
Si type P	+6.6	-1.1	+138.1
Si type N	-102.2	+53.4	-13.6

Table II.2 : Valeurs des coefficients de piézoresistivité obtenues à température ambiante par Smith pour le silicium faiblement dopé [23].

Les trois coefficients non nuls de piézoresistivité ont une signification physique telle que [15]:

- π_{11} : Coefficient reliant le champ électrique et la densité de courant lors de l'application d'une contrainte parallèlement à eux.
- π_{12} : Coefficient, qui permet de déterminer l'effet provoqué sur la résistivité du matériau, soumis à une contrainte perpendiculaire aux lignes de champ.
- π_{44} : Représente l'effet piézoresistif dû à l'application de la contrainte de cisaillement quand le champ électrique et le courant sont perpendiculaires.

II.2.2. Coefficients de piézo-resistivité

La conclusion fondamentale des travaux de Kanda [24], est que les coefficients de piézo-resistivité à température ambiante et pour un dopage de l'ordre 10^{16} at/cm³ obéit à la relation suivante [24] :

$$\pi(N,T) = \pi(N_0,300K).P(N,T) \quad (\text{II.13})$$

Le terme $\pi(N_0,300K)$ représente la valeur du coefficient de piézo-resistivité pour le silicium faiblement dopé (concentration $N_0 = 10^{16}$ at/cm³) à la température $T=300K$. $P(N, T)$ est une fonction de correction appelée aussi facteur de piézo-resistivité, qui dépend de la température et de la concentration du dopage, donnée par l'expression suivante [24] :

$$P(N,T) = \frac{300}{T} \frac{1}{\left(1 + \exp\left(\frac{-E_f}{K_b T}\right)\right) \ln\left(1 + \exp\left(\frac{E_f}{K_b T}\right)\right)} \quad (\text{II.14})$$

Où K_b est la constante de Boltzmann et E_f représente l'énergie de Fermi dont l'expression est prise à partir de la référence [21].

A partir de l'expression II.14 établie par Kanda, on peut tracer le facteur $P(N,T)$ en fonction du dopage et de la température. Le facteur de piézo-resistance et le coefficient de piézo-resistivité représentés respectivement en figure II.5 et II.6, pour le silicium de type P , nous permet de voir l'effet de la température sur le coefficient de piézo-resistivité et de minimiser cet effet par l'optimisation de la concentration du dopage.

Nous pouvons remarquer, à partir de la figure II.5, que le facteur de piézo-resistance $P(N,T)$ est constant pour les faibles valeurs de concentrations, et puis il diminue à partir d'une valeur de dopage de l'ordre de 5.10^{17} at/cm³. Par ailleurs, ce facteur décroît quand la température augmente, et devient indépendant de la température pour les concentrations les plus élevées.

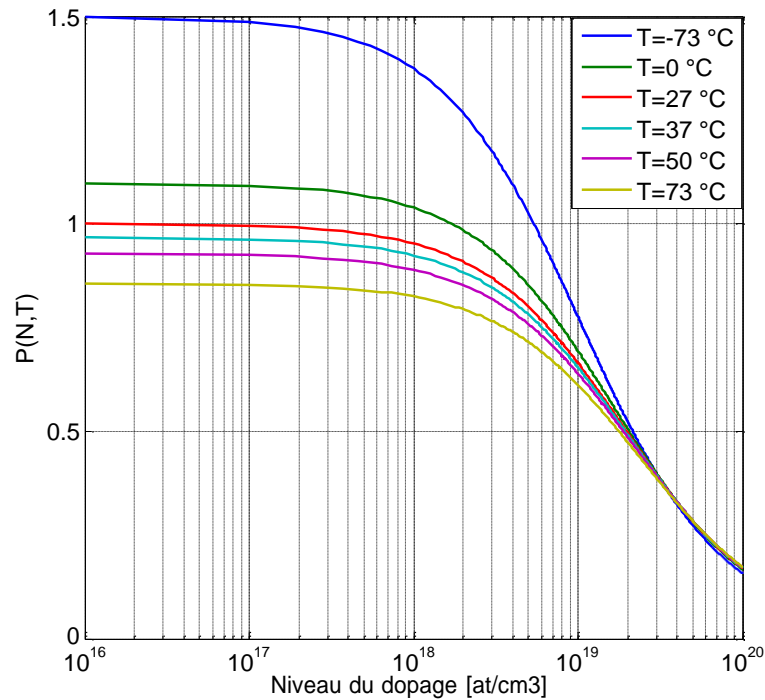


Figure II.5 : $P(N,T)$ en fonction de la concentrations pour différentes températures [24]

La figure II.6 met en évidence l'influence de la température sur le coefficient de piézorésistivité, conformément à la relation Eq II.14. On peut constater sur cette figure que π_{44} est pratiquement constant sur une large gamme de concentration, et il est inversement proportionnel à la température. A partir des figures II.5 et II.6 [15, 24], on peut dire que l'effet combiné de la température et du dopage sur le facteur de piézorésistance ainsi le coefficient de piézorésistivité permet de conditionner le comportement piézo-resistif et thermique de l'élément sensible [24].

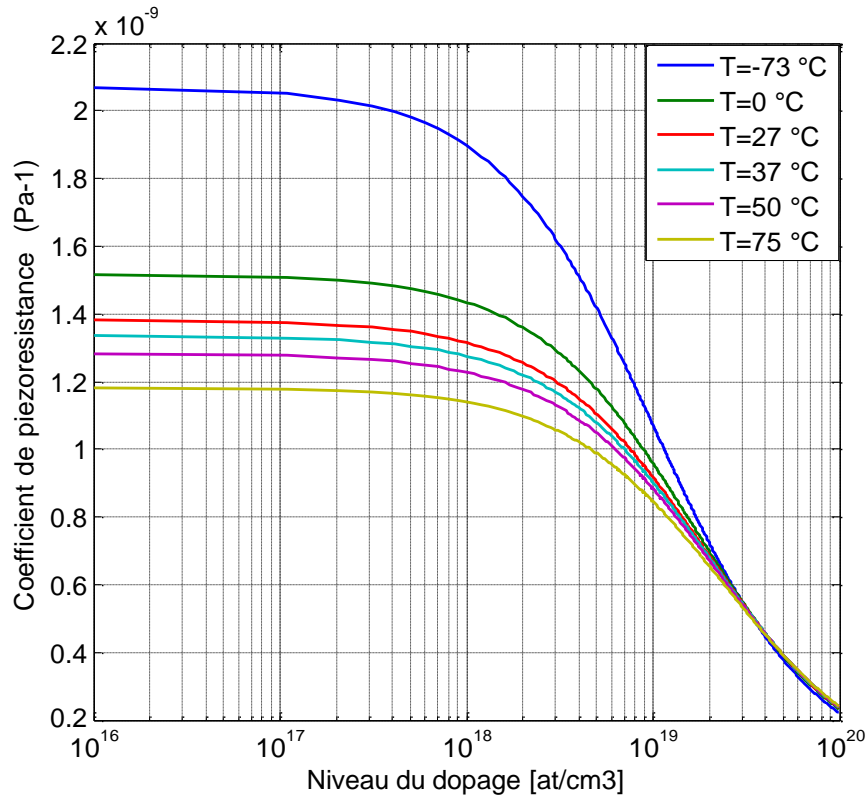


Figure II.6: π_{44} en fonction de la concentration pour différentes températures [24]

II.3. Modélisation et simulation de la membrane

II.3.1. Modélisation de la membrane

Fondamentalement, la déflexion mécanique d'une membrane fine au silicium, soumise à une pression constante et uniforme et parfaitement encadrée, à l'état stationnaire est régie par l'équation de Lagrange d'ordre quatre, en coordonnées cartésienne elle est donnée par [19] :

$$\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} + 2\alpha S_i \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (\text{II.15})$$

Où $w(x, y)$ est la déflexion de la membrane, P est la pression appliquée et D est la rigidité du matériau décrite par l'équation ci-dessous [20] :

$$D = \frac{E}{12(1-\nu^2)} h^3 \quad (\text{II.16})$$

Et α_{Si} le coefficient caractérisant l'anisotropie du silicium qui est défini par [20] :

$$\alpha_{Si} = \nu + \frac{2G(1-\nu^2)}{E} \quad (\text{II.17})$$

La figure II.7 illustre une membrane fine au silicium monocristallin de forme carrée, de côté égal à $2a$ et de hauteur d .

Etant donné que le silicium monocristallin a des propriétés mécaniques fortement anisotropiques, il est indispensable de tenir en compte de l'orientation cristallographique de la membrane. La technologie microélectronique de fabrication nous oblige à admettre que la membrane soit micro usinée dans un plan (100), tandis que ses bords soient orientés parallèlement à la direction $\langle 110 \rangle$ [15]. Les conditions aux limites de Neumann et de Dirichlet sont imposées par l'encastrement parfait de la membrane à ses bords.

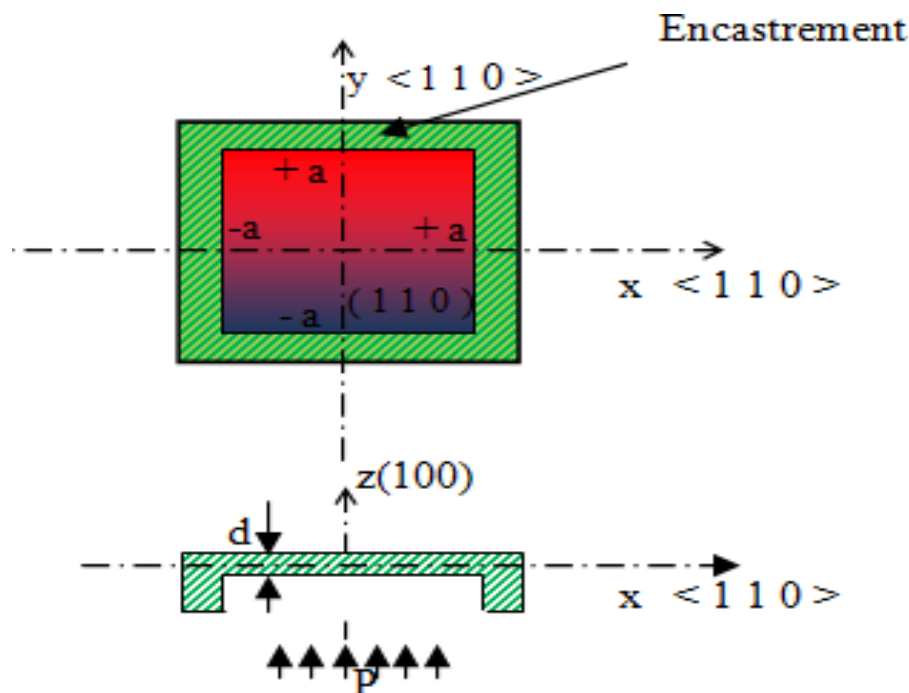


Figure II.7: Vue de haut de la structure

Plusieurs solutions approchées ont été proposées dans la littérature pour la résolution de l'équation de Lagrange Eq.II.17 qui régit la déformation d'une membrane parfaitement encadrée aux bords et soumise à une pression uniforme et constante [16, 19, 26, 27]. Parmi lesquelles on peut citer celle établie par Kerrou [16] :

$$w(x, y) = \frac{w_0}{16} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n K_{ij} \left(1 + \cos\left(2i+1\right) \frac{\pi}{2} x \right) \left(1 + \cos\left(2j+1\right) \frac{\pi}{2} y \right) \quad (\text{II.18})$$

Où w_0 la deflexion maximale au centre de la membrane donnée par [16] :

$$w_0 = 0.0224 \frac{Pa^4}{16D} \quad (\text{II.19})$$

II.3.2. Simulation la membrane

a) Déflexion la membrane

Avec l'évolution de l'informatique qui nous offre de nombreux puissants logiciels tels que : ANSYS, FLUENT, COVENTOR et COMSOL. Ces derniers permettent l'établissement aisé de modèles très complexes, offrent une très haute vitesse d'exécution des opérations de calcul et ils présentent certains autres avantages en matière d'affinité et de se rapprocher de la structure réelle du dispositif (prise en compte de l'intégralité de la structure). Nous nous proposons de faire une nouvelle étude sous environnement COMSOL multi physiques. Qui est une plate-forme flexible qui nous permet de modéliser tous les aspects physiques pertinents de nos conceptions, c'est un outil fiable pour mener bien les études paramétriques nécessaires afin d'optimiser les performances du capteur [28].

Afin de valider ce modèle, nous déterminerons l'expression de la deflexion maximale au centre de la membrane. Par la suite, nous allons déterminer la déflexion de la membrane. Par ailleurs, nous avons également effectué une étude en fonction du dopage et de la température.

La conception du modèle numérique fait appelle à des équations aux dérivée partielles gouvernant le comportement de notre système nommée modèle EDP sous COMSOL.

Les résultats obtenus de la simulation du modèle établi sont représentés sur les figures II.8, II.9 et II.10. Ces figures représentent respectivement les courbes de variations de la déflexion de la membrane $w(x, y)$ pour $P=100$ kPa.

La figure II.8 montre que la déflexion de la membrane est maximale au centre, qui est conforme à celle établie dans la théorie [16, 29].

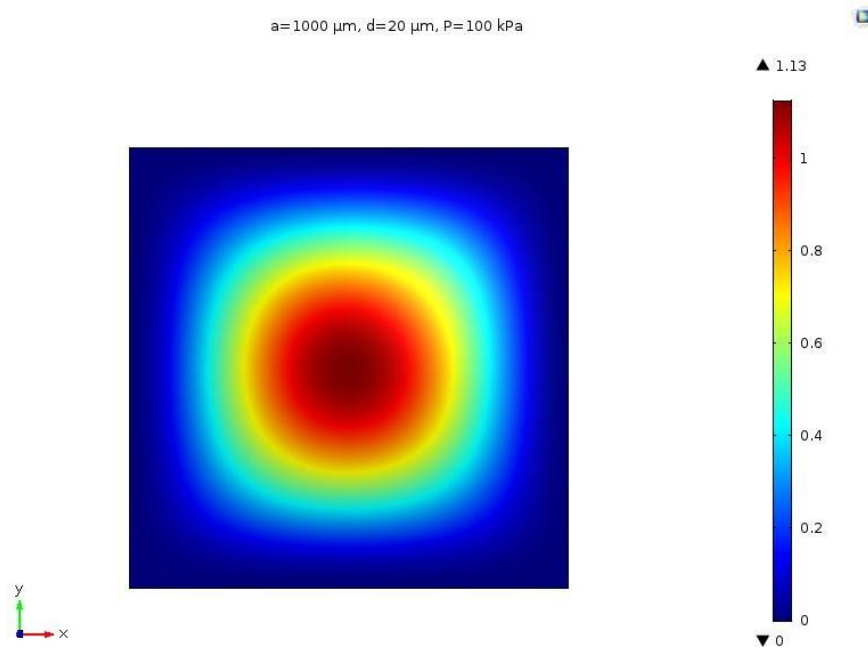


Figure II.8 : Déflexion $w(x,y)$ pour $P=100$ kPa

Lors de cette simulation on a considéré une membrane de forme carrée d'une longueur $a = 1000 \mu\text{m}$ et d'une épaisseur $d=20 \mu\text{m}$. Notons que ces dimensions sont prises à partir de littérature [29], ceci afin de pouvoir valider le modèle utilisé. Les valeurs des modules d'Young, de Coulomb G et le coefficient de Poisson du silicium utilisées dans cette simulation sont données par [20] :

$$E= 0.16892 \text{ GPa};$$

$$G= 0.05092 \text{ GPa}; \quad (\text{II.20})$$

$$\nu= 0.0642;$$

Pour mieux apprécier ces résultats, nous allons également représenter l'évolution de la déflexion obtenues par la simulation, que nous superposons à ceux obtenus théoriquement [16]. L'expression de la déflexion maximale obtenue par le modèle utilisé est donnée par :

$$w_0 = 0.0203 \frac{Pa^4}{16D} \quad (\text{II.21})$$

A partir des expressions obtenues précédemment (II.20 et II.21), nous traçons les variations de la déflexion maximale au centre de la membrane. On peut constater que ces figures sont en bonne concordance avec ceux reportées dans la littérature [16]. Ce qui permet

de valider le modèle développé sous COMSOL, qui est facile à mettre en œuvre, et se rapproche plus de la structure réelle du capteur avec une extrême flexibilité.

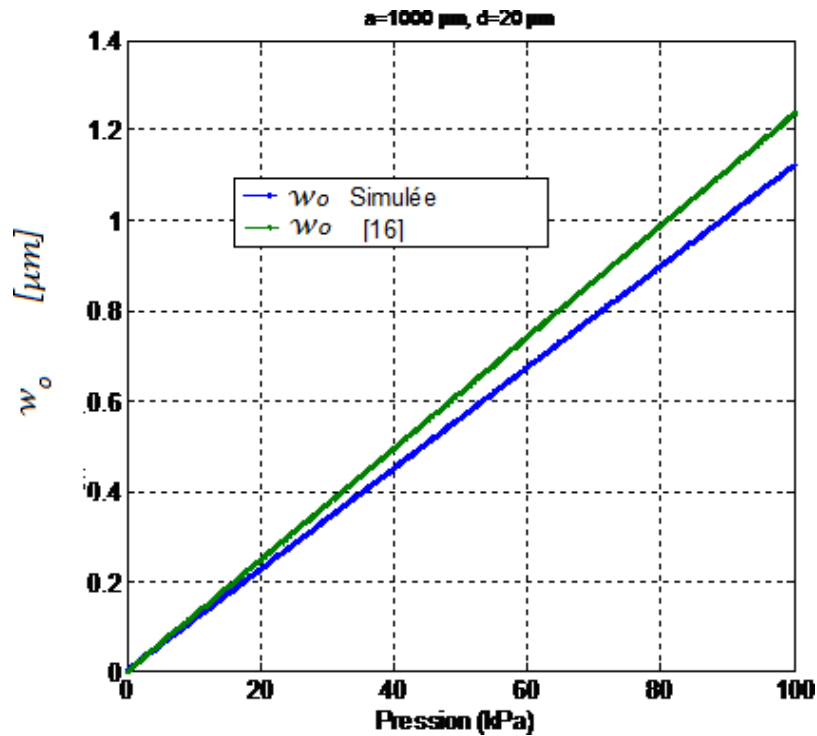


Figure II.9 : Déflexion maximale au centre de la membrane w_0 en fonction de P

b) Contraintes normales σ_{xx} et σ_{yy}

A partir des figures II.12 on peut noter que les valeurs maximales des contraintes normales σ_{xx} est de l'ordre de 78 MPa.

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = 0.29 \left(\frac{a}{d} \right)^2 P \\ \sigma_{yy} = 0.0195 \left(\frac{a}{d} \right)^2 P \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

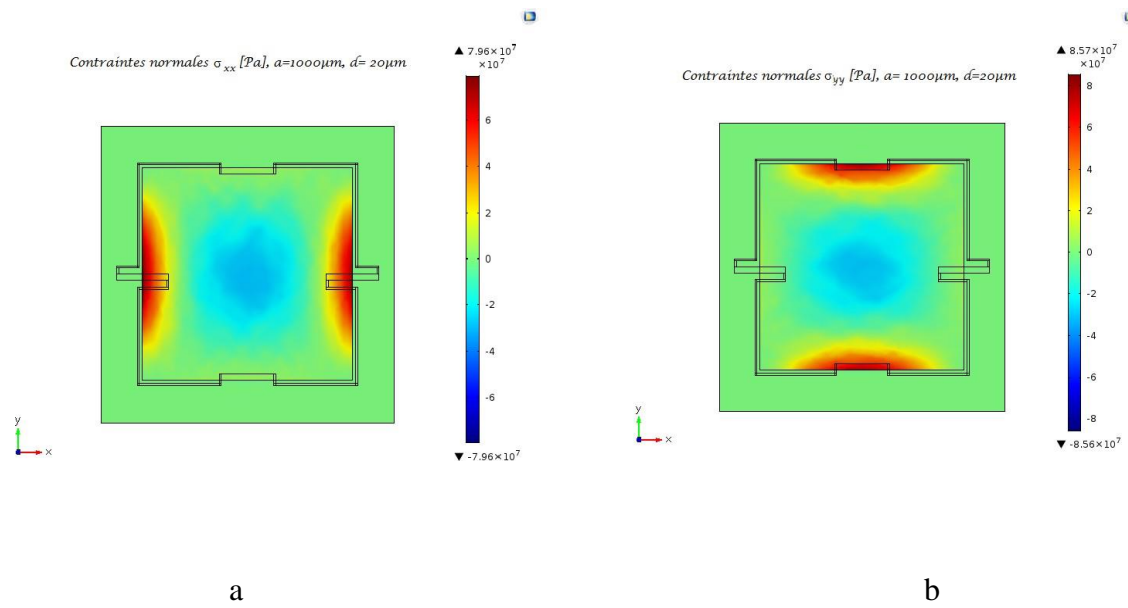


Figure II.10 : Représentation 2D des contraintes normales σ_{xx} et σ_{yy} respectivement

Les piézorésistances connectées en pont de Wheatstone et disposées deux parallèles et deux perpendiculaires, engendrent ainsi une tension de sortie V_{out} donnée par :

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_0} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \tag{II.23}$$

Où V_0 est la tension de l'alimentation du pont.

En substituant l'expression (Eq.II.22) des contraintes normales dans l'équation caractérisant la réponse du capteur (Eq.II.23), nous obtenons alors :

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_0} = 0.1352 * \pi_{44} \left(\frac{a}{d} \right)^2 P \tag{II.24}$$

Nous obtenons donc une tension de sortie V_{out} proportionnelle a la pression appliquée comme le montre la figure II.11.

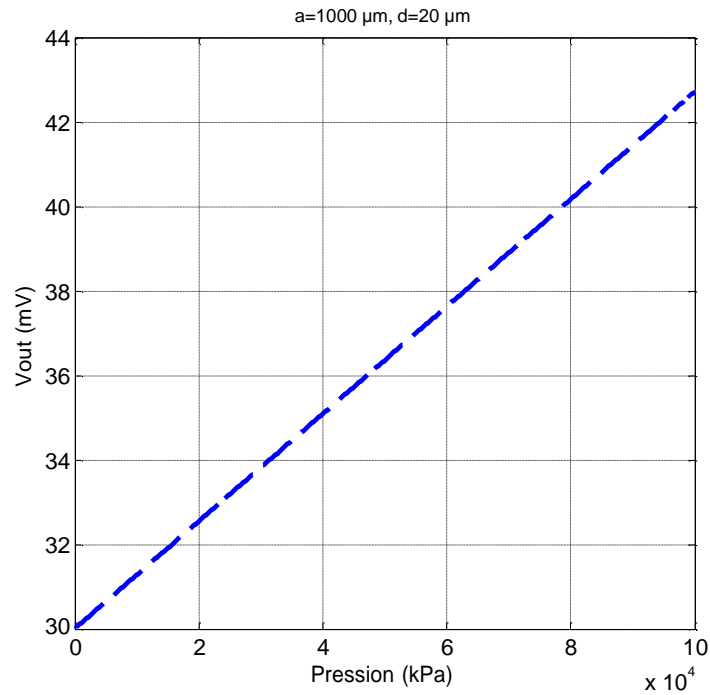


Figure II. 11 : Tension de sortie en fonction de P .

L'expression de la sensibilité à la pression S_p en fonction de la concentration des dopants pour une température donnée est obtenue à partir de l'équation II.25 :

$$S_p = \frac{\pi_{44}}{2P} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad (\text{II.25})$$

que l'on peut la mettre sous la forme suivante :

$$S_p = 0.1352 * \pi_{44} \left(\frac{a}{d} \right)^2 \quad (\text{II.26})$$

Cette expression sera utilisée par la suite pour la détermination de la sensibilité à la pression en fonction de la durée de fonctionnement du capteur et de sa tension d'alimentation, permettant ainsi d'évaluer la fiabilité et l'optimisation des caractéristiques de sortie du dispositif étudié.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principaux fondements théoriques nécessaires à la compréhension du capteur de pression piézo-resistif et son principe de fonctionnement ainsi que ses principales caractéristiques. Nous avons exposé plusieurs modèles théoriques pour la résolution de l'équation de Lagrange, qui nous ont servi d'éléments de comparaison, permettant ainsi la validation du modèle établi sous environnement COMSOL.

Après validation de notre modèle, nous avons fait un paramétrage de notre modèle numérique sous environnement COMSOL. Ce dernier, nous permet de déterminer les variations de la déflexion de la membrane, en fonction de la pression.

Etant donné que la réponse en sortie est fortement influencée par la température, nous allons consacrer le troisième chapitre à l'étude des dérives thermiques provoquées par l'effet Joule dans les capteurs de pression piézo-resistifs à membrane de forme carrée.

Références bibliographiques

- [1] Stephane Vittoz, "Modelisation et caracterisation de capteurs mecaniques integres a base d'heterostructures AlGaIn/GaN pour les environnements hostiles". These de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [2] Chauffleur, X. (1998). Modélisation par la méthode des éléments finis du comportement thermomécanique de capteurs de pression capacitifs et piézo-resistifs en silicium. PhD dissertation, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [3] Ingelin Clausen, Ola Sveen, Die separation and packaging of a surface micromachined piezoresistive pressure sensor, *Sensors and Actuators A* 133 (2007) 457–466.
- [4] Xin Li , Qin Liu, Shixin Pang, Kaixian Xu, Hui Tang, Chensong Suna, High-temperature piezoresistive pressure sensor based on implantation of oxygen into silicon wafer, *Sensors and Actuators A* 179 (2012) 277– 282.
- [5] Fouad Kerrour. « Etude et Modélisation de Capteur de Pression Piezorésistifs et Capacitifs au Silicium ». Thèse Doctorat de l'université Mentouri Constantine 2008.
- [6] Philippe Menini. « Faisabilité d'un Capteur de Pression Capacitif Miniature sur Silicium». Thèse doctorat de l'université P. Sabatier Toulouse. 1998.
- [7] Ras lain Mohamed. « Contribution à L'identification des Paramètres de non Idéalité dans des Capteurs de Pression Piézo-resistifs au Silicium ». Thèse doctorat de l'université Mentouri Constantine 2008.
- [8] Pierre Allain. « Etude des Propriétés Electro-Thermo-Mécaniques de Nano fils en Silicium pour leur Intégration dans les Microsystèmes».Thèse Doctorat de l'université paris-sud 2012.
- [9] M. Olszacki et al, A multi-domain piezoresistive pressure sensor design tool based on analytical models, Euro Sim E 2007, Freiburg, Germany, Avril 2008.
- [10] Veikko Lindroos, Markku Tilli, Ari Lehto and Teruaki Motooka : « Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies» William Andrew 2010 page 12-16.
- [11] Mohamed Gad-el-Hak. «MEMS Design and Fabrication». © 2006 by Taylor & Francis Group, LLC page3-29 - 3-33.
- [12] Dean Deng, Influence of deposition sequence on welding residual stress and deformation in an austenitic stainless steel J-groove welded joint, *Materials and Design* 49 (2013) 1022–1033.
- [13] Cheng-Chun Leea, Qing Guoa, Effect of electrode size and silicon residue on piezoelectric thin-film membrane actuators, *Sensors and Actuators A* 147 (2008) 279–285.

- [14] J. Wortman, R. Evans, „Young’s modulus, Shear modulus and Poisson ratio in Silicon and Germanium” *Journal of Applied Physics*, vol. 36, no. 1, Jan 1965, pp. 153-156.
- [15] A. Boukabache. «Conception, Modélisation et Réalisation d’un Capteur de Pression Piezoresistif à Faible Dérivée Thermique», Doctorat d’état, Février 1993, Université de Constantine.
- [16] F. Kerrou and al, A new numerical approach for modeling of silicon piezoresistive sensors, *Sciences & Technologie B – N°26*, 7-12, Décembre 2007.
- [17] Mohamed Gad-el-Hak « MEMS_Applications »© 2006 by Taylor & Francis Group, LLC page 3-6 -3-11.
- [18] Ahmed A. S. Mohammed, Walied A. Moussa and Edmond Lou, High-Performance Piezoresistive MEMS Strain Sensor with Low Thermal Sensitivity. *Sensors* 2011, 11, 1819-1846.
- [19] S. Timoshenko, J. Gere, *Theory of elastic stability McGraw-Hill* (New York, 1963).
- [20] J.J. Vlassak, W.D. Nix A new bulge test technique for the determination of Young's modulus and Poisson's ratio of thin films *Journal of Materials Research*, vol. 7, no. 12, pp. 3242-3249.
- [21] Michal Olszacki. «Modelling and optimization of piezoresistive pressure sensors», Thèse doctorat de l’université de Toulouse. 2009.
- [22] T. Guillaume, « Influence des contraintes mécaniques non-intentionnelles sur les performances des transistors MOS à canaux ultra-courts », thèse doctorat de l’INPG, 2005.
- [23] C. S. Smith, “Piezoresistance effect in germanium and silicon,” *Phys. Rev.*, vol. 94, pp. 42-49, 1954.
- [24] Kanda, Y. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon, *IEEE Trans. Electron Dev.* 29, 64-70, 1982.
- [25] Abdelaziz, Beddiaf., Fouad, Kerrou., and Salah Kemouche. Thermo mechanical Modeling of Piezoresistive Pressure Sensor. *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.M.O.S.)*, Vol. 7, N°. 3 (2014).
- [26] D. Maier-Schneider A new analytical solution for the load-deflection of square membranes *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 238-241, 1995.
- [27] Y. Naciri, *Contribution à l’étude de capteurs de pression capacitifs miniaturisés*, PhD dissertation, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1986.
- [28] Introduction to COMSOL Multiphysics, December 2013 [Online] available at: <http://www.comsol.com/products/tutorials/introduction/>

- [29] K.Y.Madhavi et al "Design of a Piezoresistive Micropressure Sensor using Finite Element Analysis" International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 70– No.3, May 2013 20
- [30] Ali BOUKABACHE, Philippe MENINI et Patrick PONS "Microcapteurs de pression". Techniques de l'Ingénieur
- [31] F. Kerrou et al. "Modeling of Silicon Piezoresistive Pressure Sensor: Application to Prevent Some Diabetes Complications", Proceeding of the 2012 COMSOL conference in Milan
- [32] Ningqi Luo et All "Flexible Piezoresistive Sensor Patch Enabling Ultralow Power Cuffless Blood Pressure Measurement". Advanced Functional Materials, V.26, (8), 1178–1187, 2016.

III.1. Introduction

L'exemple le plus courant mettant en jeu un transfert de chaleur est le système constitué de deux corps en contact et ayant des températures différentes. Le corps le plus chaud cède une partie de son énergie sous forme de chaleur au corps le plus froid. Il y a donc un transfert thermique entre ces deux corps. Ce transfert de chaleur peut être perçu positivement ou négativement, tout dépend de l'objectif visé. Les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante dans l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, ...etc., mais aussi les capteurs de pression piézo-resistifs.

De nombreux paramètres physiques, électriques ou géométriques peuvent provoquer la non idéalités des capteurs de pression piézo-resistifs, on peut citer, la température générée par effet Joule lors de l'alimentation de ces dispositifs par une source de tension comme un paramètre physique et électrique. Ces paramètres influent d'une manière considérable sur la précision de mesure en minimisant la sensibilité à la pression du capteur. Le présent chapitre met l'accent sur l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques de sortie du capteur lors de l'application d'une tension d'alimentation, ceci pour optimiser ses performances.

Pour ce faire, nous consacrons en premier lieu une partie aux généralités sur le transfert thermique et ses trois modes de transfert. Par la suite, une deuxième partie est réservée aux interprétations des résultats obtenus concernant les dérives thermiques provoquées par le chauffage par effet Joule dans les capteurs de pression piézo-resistifs.

III.1.2 Transfert thermique

On définit le transfert thermique comme étant l'énergie thermique en déplacement due à une différence de température dans un même milieu ou entre deux milieux. On rencontre ces phénomènes de transfert de chaleur dans la vie quotidienne (chauffage central à domicile à l'aide des échangeurs à eau, procédés utilisés dans le milieu industriel, ...). L'étude de ces transferts s'effectue par l'intervention de trois types de mécanisme simultanés ou isolés, la conduction, la convection et le rayonnement.

a) Conduction

Elle est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux ou encore entre deux milieux en contact physique.

Au niveau microscopique, elle représente le processus de propagation de la chaleur par contact direct entre les particules d'un corps ou entre des corps ayant deux niveaux d'énergie donc des températures différentes en raison du mouvement de ces particules élémentaires [1-12]. Dans les gaz, le transfert de chaleur par conduction est le fait de la diffusion moléculaire, par contre dans les liquides et les solides diélectriques, il s'effectue par ondes élastiques. Dans le cas où le solide est conducteur, le transfert thermique par conduction est essentiellement dû à la diffusion des électrons libres des zones plus chaudes vers les zones plus froides, c'est le cas du chauffage par l'effet Joule [13-26]. Le transfert thermique par conduction peut être utilisé dans divers applications technologiques, il est régi par l'équation suivante [1, 11] :

$$\Delta \left(k(x, y, z, t) \cdot T(x, y, z, t) \right) + q = \rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

Où $k(x, y, z, t)$, sont les conductivités thermiques de matériaux exprimées en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, pour le silicium $k= 150$, q le débit volumétrique de chauffage par effet Joule exprimé en W.m^{-3} , ρ est la masse volumique en kg.m^{-3} , pour le silicium $\rho=2320$, C_p la capacité calorifique du matériau exprimée en $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, pour le silicium $C_p = 712$, $T(x, y, z, t)$ est le champ de température dans le solide exprimée en $^{\circ}\text{C}$ et t le temps en seconde (s). Pour simplifier les calculs nous considérons que la conductivité thermique est indépendante de la température que l'on note k , l'équation de chaleur s'écrit alors comme suit :

$$\Delta T(x, y, z, t) + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

Où $\alpha (= k / \rho C_p)$ est la diffusivité thermique en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, pour le silicium $\alpha = 0.9 \cdot 10^{-4}$.

b) Convection

Le phénomène de convection est le mode de transmission qui implique le

déplacement des particules élémentaires du fluide, liquide ou gaz entre des zones ayant des

températures différentes, ce mélange génère des échanges de quantité de mouvement et d'énergie thermique [17-19].

Ce phénomène désigne le transfert thermique qui a lieu entre une surface solide et un fluide non stationnaire lorsqu'ils sont à des températures différentes. A la surface d'un solide, le flux de chaleur convectif est proportionnel à la différence de température entre la surface du solide et la température du fluide et il est donné par la loi de Newton suivante [3]:

$$\phi_{conv} = h(T_s - T_f) \quad (III.3)$$

Où ϕ_{conv} est le flux convectif exprimé en W/m² et $h=2.219\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ est le coefficient de convection du silicium.

c) Rayonnement

Le phénomène de rayonnement thermique constitue un mode particulier de transfert thermique dans laquelle le porteur d'énergie n'est plus composé par des particules. Ce mode de transfert de chaleur ne nécessite pas de support matériel, l'énergie de rayonnement est transportée par les ondes électromagnétiques [1, 3]. Ce type de transfert de chaleur est produit par l'émission et l'absorption de ces ondes, il est caractérisé par son efficacité dans le vide.

Pour un transfert de chaleur par rayonnement d'une surface à une température T_s , l'émittance totale E est gouvernée par la loi de Stefan-Boltzmann [1, 3] :

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_s \cdot T_s^4 \quad (III.4)$$

Où l'émittance totale E est exprimée en W.m⁻¹, σ_s est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma_s=5,67.10^{-8}\text{W/m}^2.\text{K}^4$) et ε est le coefficient d'émissivité de la surface ($0 \leq \varepsilon \leq 1$).

III.2. Modélisation de l'effet Joule dans les capteurs de pression

Les capteurs de pression piézo-resistifs au silicium, ont trouvé une large application dans divers domaines, tels que l'automobile, l'aérospatiale et les instruments biomédicaux. Ils ont l'avantage d'une sensibilité S_p élevée, une excellente linéarité de réponse électrique, une bonne compatibilité technologique, une petite taille, une faible puissance, une production en masse etc. [20, 25-36]. Néanmoins, ils souffrent souvent de l'influence de la température sur

leur réponse. Il est donc nécessaire d'effectuer une étude de leur comportement thermique afin de déterminer les paramètres qui provoquent ces dérives dans leur caractéristique de sortie.

Zahid *et al.* [11], ont étudié les dérives thermiques dans les microcantilevers piézo-resistifs causées par le chauffage par effet Joule. Ils ont présenté une approche qui se concentre sur les techniques analytiques et numériques pour caractériser le transfert de chaleur par conduction dans ces dispositifs. Par la suite, ces mêmes auteurs ont développé un autre modèle précis qui tient compte de la conduction et de la convection pour prédire le comportement thermique dans ces microcantilevers piézo-resistifs [12].

Etant donné que, l'origine des dérives thermiques dans les capteurs de pression sont dues non seulement aux contraintes thermiques du processus technologique de fabrication, mais aussi aux mécanismes de transfert de chaleur entre les différentes couches du capteur [37-41].

Nous allons consacrer ce chapitre à l'étude de l'élévation de la température générée par le chauffage interne dans les capteurs de pression piézo-resistifs lors de la polarisation du pont par une source de tension. Ces capteurs alimentés par une tension de 3 à 10 V [42], impliquent des dérives thermiques qui, altèrent énormément leur réponse.

Afin de déterminer la manière dont la température influe sur ce genre de capteurs, nous avons établi l'expression de la variation du champ de température engendrée par le chauffage interne de sa piézo-résistance pour les différents paramètres géométriques du dispositif, ainsi que pour différents moments de son fonctionnement. L'évolution du facteur de piézo-résistance, le coefficient de piézo-résistivité, la sensibilité à la pression en fonction du temps et de la tension de l'alimentation V_0 pour les différents paramètres géométriques sont aussi analysés. Cette étude nous permet d'améliorer la fiabilité du capteur et l'optimisation de sa réponse.

Dans ce travail on néglige les autres modes de transfert de chaleur, et on ne considère que la conduction comme seule mode de transfert d'énergie thermique comme cela est montré sur la figure III.1. Où d est l'épaisseur de la membrane en μm , a est le côté d'une membrane de forme carrée donnée en μm .

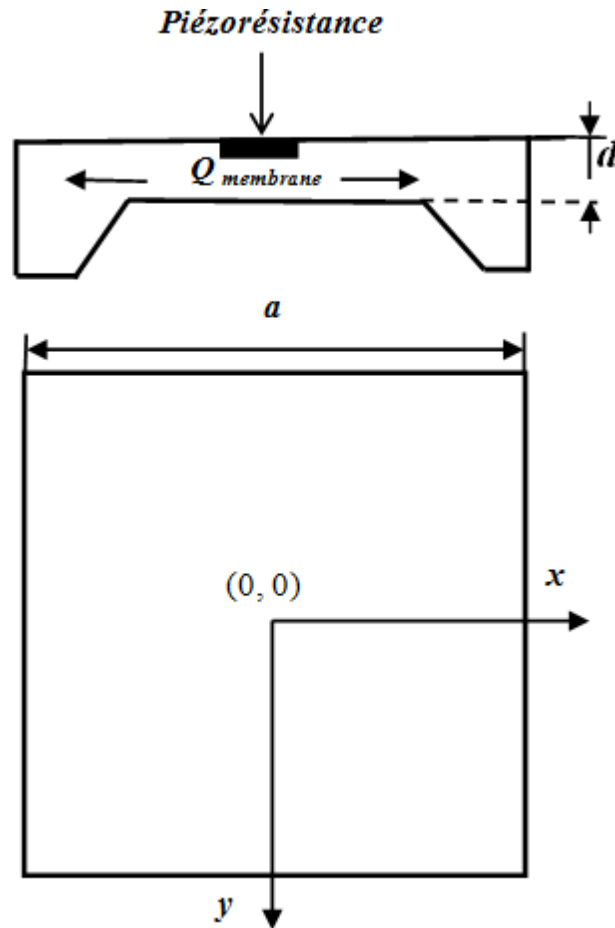


Figure III.1 : Structure de capteur de pression piézoresistif à membrane de forme carrée

Dans ce chapitre, une solution $2D$ de l'équation de conduction de la chaleur est développée en coordonnées cartésiennes pour le régime variable par la méthode des différences finies (FDM). Nous allons coupler la variation de la température dans la résistance générée par l'effet Joule et celle dans la membrane par conduction. Pour cela, nous résolvons un système couplé constitué de deux équations différentielles. Tout en négligeant la variation de température le long de la direction perpendiculaire, l'équation de transfert de chaleur dans la résistance est donnée comme suit :

$$\Delta T_1(x, y, t) + \frac{q_1}{k_1} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{\partial T_1(x, y, t)}{\partial t} \quad (\text{III.5})$$

Alors que, l'équation de transfert de chaleur dans la membrane s'écrit :

$$\Delta T_2(x, y, t) + \frac{q_2}{k_2} = \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{\partial T_2(x, y, t)}{\partial t} \quad (\text{III.6})$$

III.2.1. Méthode des différences finies

La méthode des différences finies est une technique de recherche de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles au moyen de développement de Taylor. Elle consiste à résoudre un système de relations liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres appelés nœuds.

La première étape de cette méthode consiste à subdiviser la structure en cellules rectangulaires, dont les lignes et les colonnes sont respectivement parallèles aux axes ox et oy , la position d'un point de la structure est indiquée par les indices ' i ' et ' j ' (i est la position du point sur l'axe ox et j note la position du point sur l'axe oy).

La figure III.2 illustre le maillage de la résistance et de la membrane par cette méthode.

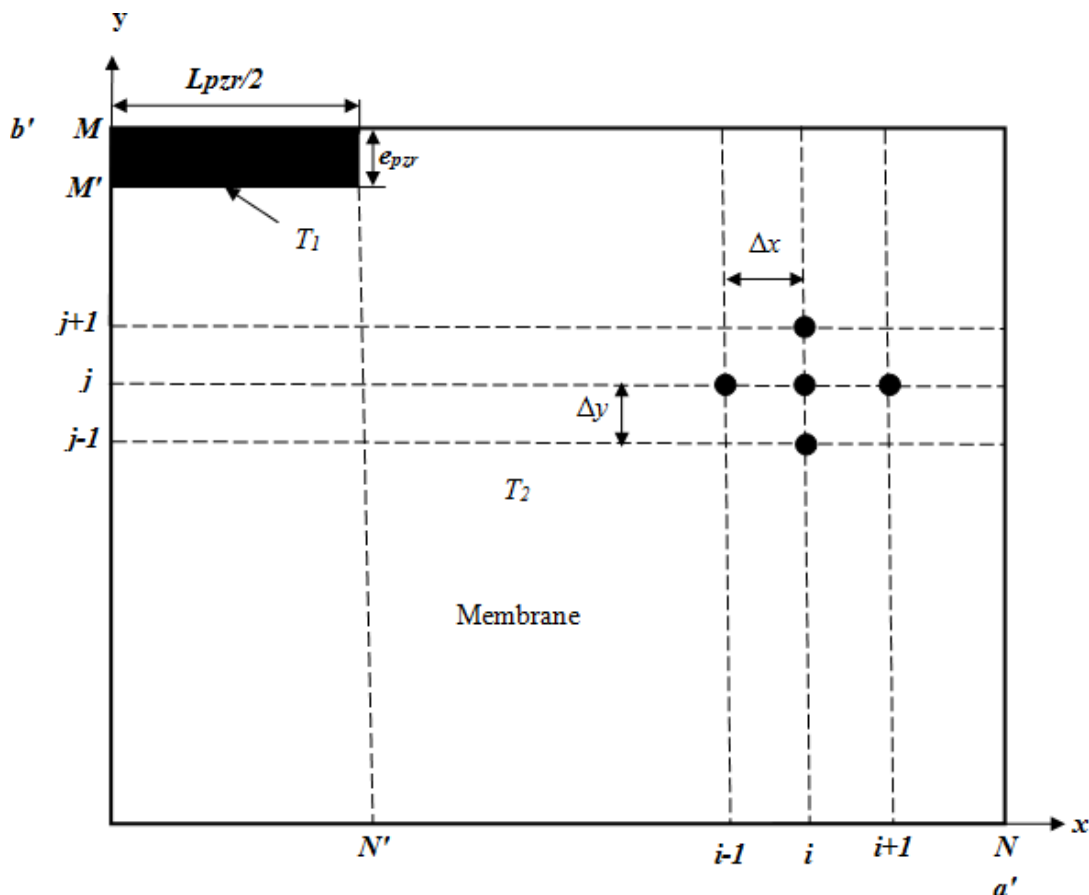


Figure III.2 : Maillage de la structure.

Où L_{pzt} et e_{pzt} représentent respectivement la longueur de la piézorésistance et sa largeur, T_1 est la température dans la piézorésistance provoquée par le chauffage électrique, quant à T_2 elle décrit la température dans la membrane dûe à la conduction.

Les conditions aux limites applicables dans la résistance et la membrane (figure III.2) sont :

Par symétrie on a :

$$\begin{cases} x=0 \rightarrow \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \\ y=0 \rightarrow \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En plus :

$$x=a', \quad -k \frac{\partial T_2}{\partial x} = h(T(a', y) - T_0) \quad (\text{III.8})$$

$$y=b' \text{ et } 0 < x < L_{pzt}/2 \quad -k \frac{\partial T_1}{\partial y} = h(T(x, b') - T_0) \quad (\text{III.9})$$

$$y=b' \text{ et } L_{pzt}/2 < x < a' \quad -k \frac{\partial T_2}{\partial y} = h(T(x, b') - T_0) \quad (\text{III.10})$$

Conduction selon l'axe ox :

$$y=b'-e_{pzt} \text{ et } 0 < x < L_{pzt}/2 \quad -k \frac{\partial T_1}{\partial y} = -k \frac{\partial T_2}{\partial y} \quad (\text{III.11})$$

Conduction selon l'axe oy :

$$x=L_{pzt}/2 \text{ et } b'-e_{pzt} < y < b' \quad -k \frac{\partial T_1}{\partial x} = -k \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (\text{III.12})$$

Les conditions de continuité des températures selon l'axe ox sont :

$$0 < x < L_{pzt}/2 \quad T_1(x, b'-e_{pzt}) = T_2(x, b'-e_{pzt}) \quad (\text{III.13})$$

Quant à la continuité des températures selon l'axe oy impose :

$$b'-e_{p_zr} < y < b' \quad T_1(L_{p_zr}/2, y) = T_2(L_{p_zr}/2, y) \quad (\text{III.14})$$

Le taux de génération d'énergie q_I dans la résistance est donné par :

$$q_I = \frac{V_0^2}{Rda^2} \quad (\text{III.15})$$

Où R est la résistance diffusée en Ω donnée par l'expression suivante [11, 12] :

$$R = \rho_e \frac{L_{p_zr}}{A_{p_zr}} \quad (\text{III.16})$$

Avec ρ_e désigne la résistivité électrique et A_{p_zr} la section de la résistance.

La condition initiale dans toute la structure est :

$$T_1(x, y, t) \Big|_{t=0} = T_2(x, y, t) \Big|_{t=0} = T_0 \quad (\text{III.17})$$

Discrétisation du système d'équation (MDF)

La deuxième étape de cette méthode est l'étape de discrétisation, qui consiste à transférer les équations différentielles aux dérivées partielles en un système d'équation algébrique, qui décrit les mêmes phénomènes physiques aux différents nœuds du domaine, utilisant le schéma implicite parce qu'il ne nécessite pas une condition de stabilité sur les pas d'espace et le pas de temps [43].

Dans notre cas, on fait une discrétisation dans l'espace et dans le temps de l'équation de la chaleur. Pour ce faire, il faut générer un découpage spatial en deux zones, le temps est aussi découpé en période discrète, que l'on appelle le pas temporel.

Les pas d'espace sont Δx et Δy , et le pas de temps est Δt , on a donc $a' = (N-1)\Delta x$, $b' = (M-1)\Delta y$ et $t_k = k \Delta t$.

On pose $T(x_i, y_j, t_k) = T(i, j, k)$ avec $i = 1, \dots, N$ et $j = 1, \dots, M$, alors la discrétisation par la différence finie est donnée comme suit :

$$\frac{T_n(i+1, j, k) - 2T_n(i, j, k) + T_n(i-1, j, k)}{\Delta x^2} + \frac{T_n(i, j+1, k) - 2T_n(i, j, k) + T_n(i, j-1, k)}{\Delta y^2} + \frac{q_n}{k_n} = \frac{1}{\alpha_n} \frac{T_n(i, j, k) - T_n(i, j, k-1)}{\Delta t} \quad (\text{III.18})$$

Où $n=1$ pour la résistance et $n=2$ pour la membrane.

$$\text{Posons : } \begin{aligned} A_1 &= \frac{\alpha_1 \Delta t}{\Delta x^2}, & B_1 &= \frac{\alpha_1 \Delta t}{\Delta y^2}, & C_1 &= \frac{q_1 \alpha_1 \Delta t}{k_1} \\ A_2 &= \frac{\alpha_2 \Delta t}{\Delta x^2}, & B_2 &= \frac{\alpha_2 \Delta t}{\Delta y^2}, & C_2 &= \frac{q_2 \alpha_2 \Delta t}{k_2} \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

On remplace les expressions de A_n , B_n et C_n à partir de l'équation III.19 dans III.18 on obtient :

$$\begin{aligned} & \frac{B}{n} T(i, j-1) + \frac{A}{n} T(i-1, j) - \left(\frac{2A}{n} + \frac{2B}{n} + \frac{1}{\alpha_n \Delta t} \right) T(i, j) + \frac{A}{n} T(i+1, j) + \frac{B}{n} T(i, j+1) = \\ & - \frac{1}{\alpha_n \Delta t} T(i, j, k-1) - C_n \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Les nœuds intérieurs sont :

$i=1, \dots, N'-1$ et $j=M'+1, \dots, M-1$ pour résistance et $i=2, \dots, N-1$ et $j=2, \dots, M'-1$ pour membrane.

Lorsqu'on applique les conditions aux limites et initiale dans toute la structure, et en effectuant tous les calculs, nous obtenons ainsi un système d'équations linéaires sous la forme matricielle $[A] [T] = [B]$ à résoudre numériquement par l'algorithme de Thomas [43] à l'aide de Matlab.

III.3. Paramètres d'influence sur la génération de la température

Dans cette section nous allons étudier l'augmentation de la température due au chauffage interne lors de l'application d'une tension de polarisation pour différentes durées de fonctionnement du capteur ainsi que pour ses divers paramètres géométriques. Les propriétés du matériau de silicium utilisées dans ce travail sont indiquées dans le tableau III.1.

Paramètres	Valeurs
Masse volumique, ρ (kg / m ³)	2320
Coefficient de transfert de chaleur, h (Wm ⁻² K ⁻¹)	2.219
Résistivité électrique, ρ_e (Ω .m)	10 ⁻³
Conductivité thermique, K (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	150
Coefficient spécifique de chaleur, C (J / kgK)	712
Diffusivité thermique, α (m ² / s)	0.9*10 ⁻⁴

Tableau III.1 : Propriétés du Silicium [11, 12]

III.3.1 Effet de la tension de polarisation

Les courbes de la figure III.3, représentent les variations de la température en fonction de la tension établies par le modèle numérique à $t=100$ min et de celui de l'analytique [1]. Nous observons que, l'évolution de la température est proportionnelle à la tension appliquée, ce qui est conforme à la théorie.

Sachant qu'à partir de 100 min nous sommes en régime permanent et que la courbe de la variation de la température se stabilise et devient indépendante du temps (voir les figures III.10 à III.12). Afin de mieux entamer cette partie, nous allons commencer par la validation du modèle établi. Pour cela nous avons comparé les résultats obtenus par notre modèle avec ceux du modèle analytique [1]. A partir de cette figure, on peut constater que les résultats sont en bon accord sur la plage de tension de 3 à 7 V. Cependant, au delà de 7 V il y a une certaine divergence qui peut être due au maillage qui est une source d'erreur des modèles numériques.

Les dérives thermiques provoquées par cet effet dans ces capteurs affectent énormément leurs caractéristiques de sortie [22, 23]. Afin de réduire l'effet de ces dérives, nous nous sommes concentrés sur l'étude de l'influence de leurs paramètres géométriques.

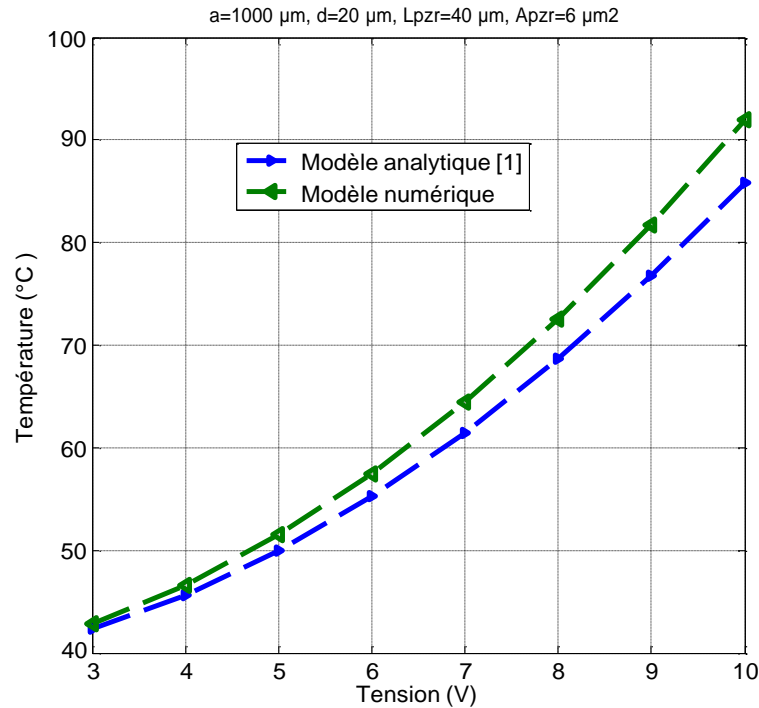


Figure III.3 : Variations de la température en fonction de la tension appliquée

Pour voir l'effet de la tension appliquée et l'influence des paramètres géométriques du capteur sur la génération de la température nous avons fait varier de nombreux paramètres tels que : les dimensions de la résistance, le côté de la membrane ainsi que son épaisseur.

Notons que le choix des dimensions géométriques utilisées est pris à partir de la littérature [28, 33].

III.3.2 Influence de la durée de fonctionnement

Afin de connaître l'évolution de la température créée par le chauffage interne en fonction de la durée de fonctionnement du capteur, nous allons analyser l'augmentation de la température pour plusieurs dimensions de la structure. Comme nous pouvons le voir dans les figures III.4 à III.5, et après avoir fait fonctionner le dispositif pour une période allant jusqu' à 180 min et sous une tension de 5 V, la température prend une valeur d'état stationnaire au-delà de 100 min et se rend indépendante du temps.

On peut remarquer également sur les figures III.4 et III.5 respectivement, que la variation de T en fonction de dimensions de la membrane est décroissante. Selon ces figures, les deux paramètres à savoir la longueur du diaphragme et son épaisseur ont un énorme

impact sur la génération de la température. Par conséquent, pour réduire la montée en température on a recouru à la dualité grande épaisseur et grande largeur de la membrane (figure III.4 et III.5). Cependant, il est important de rappeler que cette dualité peut avoir des conséquences néfastes sur le comportement mécanique et technologique du capteur, notamment sur sa sensibilité à la pression d'une part et de sa taille d'autre part. Les formes de ces courbes (figures III.4 et III.5) sont analogues à la réponse d'un circuit du premier ordre. Ce dernier est caractérisé par une constante du temps de l'ordre de 3τ à partir de laquelle s'établit le régime permanent.

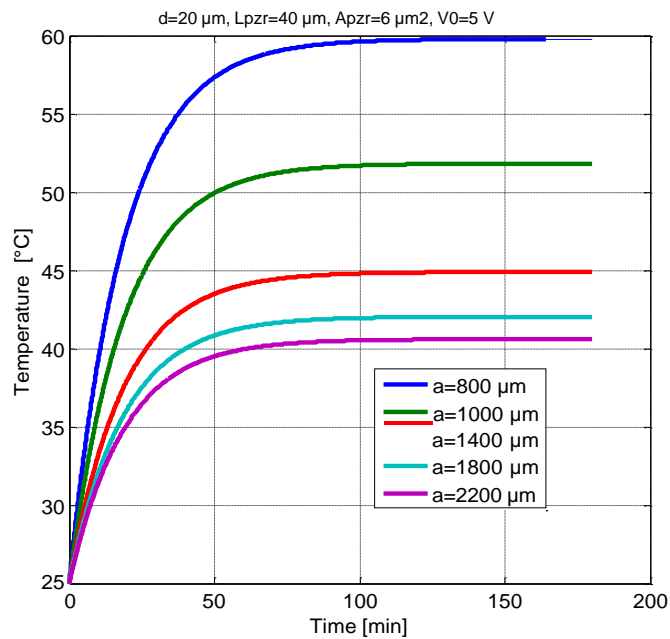


Figure III.4. Variations de la température en fonction du temps pour différente « a ».

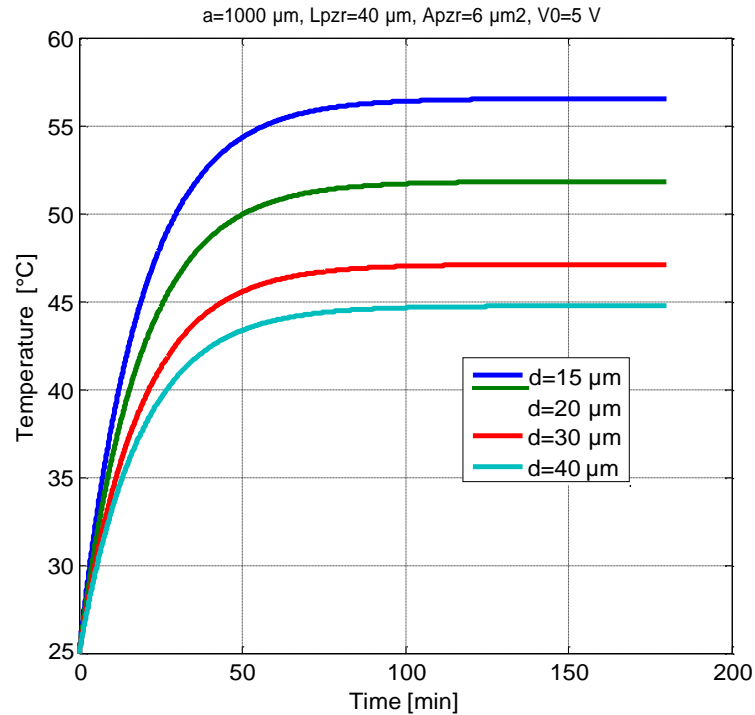


Figure III.5. Variations de la température en fonction du temps pour différentes épaisseurs « d »

Nous constatons sur la figure III.4 que l'élévation de la température continue à diminuer et prend une valeur d'état stationnaire à mesure que la largeur de la membrane en silicium augmente. Cela indique que la constante thermique du temps de la structure décroît en augmentant le côté de la membrane, dans ce cas, le temps mis par la température pour atteindre sa valeur en régime permanent sera plus petit.

On rappelle que, l'allure de la température en fonction du temps a une forme exponentielle est régit par un circuit du premier ordre qui est donnée par l'équation suivante :

$$E_c(t) = E_c(1 - e^{-t/\tau}) + E_0 e^{-t/\tau} \quad (\text{III.21})$$

En partant de cette équation, on peut faire une correspondance entre la température T et le potentiel E_c , on peut donc obtenir une relation liant la montée en température et le temps de fonctionnement du capteur, en identifiant les paramètres de cette équation à celles obtenues à partir des figures III.4, III.5 et III.6. On obtient alors la relation suivante :

$$T(t) = T_{f_i} (1 - e^{-t/\tau_i}) + T_0 e^{-t/\tau_i} \quad (\text{III.22})$$

III.4. Influence de la durée de fonctionnement Sp

A partir de la relation établie par Kanda [41], on observe bien la forte dépendance des coefficients de piézo-résistivité à la température dans les capteurs de pression piézo-resistifs. Cette influence se manifeste comme une variation de la tension de décalage de zéro de la tension de sortie en fonction de la température et l'altération éventuelle de la réponse du capteur dans le temps. L'augmentation de la température causée par l'auto échauffement dans les jauges affecte énormément les coefficients de piézo-résistivité π_{44} , cela conduit à des erreurs dans la réponse du dispositif.

Dans le cadre de cette étude, nous allons choisir une jauge de type P orientée selon la direction cristallographique $[110]$ dans le plan (100) . Parce que ce plan et cette direction cristallographique sont les plus favorables pour le silicium dopé en atomes accepteurs (type P), pour avoir un effet piézo-résistif maximal [20], susceptible d'être utilisé dans les capteurs de pression.

Pour ce faire, nous allons étudier dans un premier temps l'influence de la température générée par effet Joule sur le coefficient de piézo-résistivité pour une concentration du dopage de $N=3*10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Pour cela, nous examinons l'évolution du coefficient de piézo-résistivité π_{44} en fonction du temps et de la tension pour différents paramètres géométriques de la structure. En second temps, nous allons également analyser l'évolution de la sensibilité à la pression en fonction de la durée de fonctionnement du capteur et de sa tension d'alimentation pour ses diverses dimensions. Cela nous permet de quantifier et de minimiser les dérives en température en optimisant ses paramètres géométriques.

L'expression du facteur de piézo-résistivité $P(N,T)$ en fonction du temps est obtenue en couplant l'équation III.7 décrivant l'évolution de la température en fonction du temps établie par le modèle de différences finies avec celles (Eq.II.18 et Eq.II.19) obtenues par Kanda [41], nous aurons alors le système ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P(N, T(t)) = \frac{300}{T} \frac{1}{\left(1 + \exp\left[-\frac{E_f}{K_b T} \right] \right) \ln \left(1 + \exp\left[\frac{E_f}{K_b T} \right] \right)} \quad (a) \\
 \pi_{44}(N, T(t)) = \pi_{44}(N_0, 300K) \cdot P(N, T(t)) \quad (b) \\
 T(t) = T_f (1 - e^{-t/\tau_i}) + T_0 e^{-t/\tau_i} \quad (c)
 \end{array} \right. \quad (\text{III.23})$$

Il est important de signaler que le facteur de piézorésistance $P(N, T)$ a la même tendance que celle du coefficient de piézorésistivité $\pi_{l,t}$ et présente presque la même allure. La différence entre leurs courbes réside dans le fait que l'ordre de grandeur de $P(N, T)$ et de celui de $\pi_{l,t}$ en fonction du temps est différent pour chaque paramètre géométrique. Ceci implique que leur analyse et leur interprétation se fait de la même manière. Pour cette raison, dans toute la suite de ce chapitre on se limite qu'à l'étude du coefficient de piézorésistivité $\pi_{l,t}$. L'évolution de ce dernier en fonction du temps est obtenue en couplant les relations eq.III.23.a, eq.III.23.b et eq.III.23.c.

Sachant que, dans notre cas on s'intéresse au coefficient de piézorésistivité π_{44} , car c'est le coefficient le plus pondérant pour le silicium de type P . Ce coefficient représente l'effet piézorésistif dû à l'application d'une contrainte. Il permet de quantifier les variations des grandeurs électriques induites par les contraintes appliquées. La forte dépendance de ce coefficient en fonction de la température nous a incité à déterminer ses variations en fonction du temps, afin de réduire au maximum l'effet de la température dû au chauffage interne des jauges lors de l'utilisation du capteur sur une longue période.

III.4.1. Influence de la durée de fonctionnement sur la sensibilité S_P

La source d'alimentation du pont de Wheatstone est un paramètre électrique qui provoque la non idéalité des capteurs de pression. Il peut ainsi causer une augmentation de la température qui, à son tour, influe sur la précision de la mesure en réduisant sa sensibilité.

On rappelle que la sensibilité à la pression d'un capteur S_P est l'une de ces performances essentielle, et que l'on doit optimiser pour améliorer sa réponse. Pour cela, nous utilisons son expression Eq.II.24 établie au chapitre précédent qui est donnée par :

$$S_p = 0.1352\pi_{44} \left(\frac{a}{d} \right)^2 \quad (\text{III.24})$$

A partir de cette expression on voit bien les variations de la sensibilité S_p est fonction des variations du coefficient de piézorésistivité π_{44} . Dans la mesure où ce coefficient est fortement dépendant de la température, la sensibilité S_p en dépendra aussi. Dans ce cas de figure, l'examen de l'expression III.22 obtenue par notre modèle montre que la sensibilité, à travers le coefficient π_{44} pourra être influencée par le temps d'utilisation du capteur et de la tension de polarisation du pont.

La sensibilité à la pression S_p du dispositif, pour une valeur donnée de la pression, détermine l'évolution de la réponse à la sortie du capteur. Comme la sensibilité thermique du π_{44} est importante, cela va provoquer des dérives dans la réponse en pression du capteur.

Nous allons voir, dans les graphes qui suivent, comment varie la sensibilité en fonction du temps, ainsi que la manière dont les paramètres géométriques de la structure influent sur elle. Pour cela, nous avons couplé d'une part, l'expression eq.III.22 représentant la variation de la température en fonction du temps obtenue précédemment, avec celle de $\pi_{44}(N, T)$ établie par Kanda pour un dopage $N=3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, l'équation résultante est couplée de sa part avec l'équation eq.III.24 obtenant alors la sensibilité en fonction du temps.

D'après les figures III.7, III.8 et III.9 représentant les variations de la sensibilité à la pression en fonction de la durée de fonctionnement du dispositif, on peut distinguer deux intervalles du temps, le premier intervalle est $t < 100 \text{ min}$ où la sensibilité est décroissante, quant au deuxième, la sensibilité est indépendante du temps au-delà de $t = 100 \text{ min}$ (stationnaire). Etant donné que les dimensions de la structure peuvent en effet avoir une influence sur la sensibilité à la pression du capteur, nous avons analysé différentes conceptions de la membrane et de la piézorésistance, afin d'optimiser la sensibilité des capteurs. Ces derniers souffrent par conséquent d'une sensibilité très réduite lors de leur fonctionnement pour une longue période.

Afin d'obtenir un signal exploitable avec une haute sensibilité et de rendre négligeable l'influence de l'effet du chauffage interne, il est nécessaires de prendre de grande longueur de la membrane comme il est montré en figure III.7. En outre, nous constatons sur la figure III.8 que la réduction de l'épaisseur de la membrane permet d'augmenter la sensibilité,

mais cela va augmenter la déviation de la membrane et pousse ce dernier à pénétrer dans la zone non linéaire. Par conséquent, une valeur appropriée de l'épaisseur du diaphragme doit être choisie de telle sorte que la sensibilité maximale est obtenue sans compromettre la linéarité du capteur.

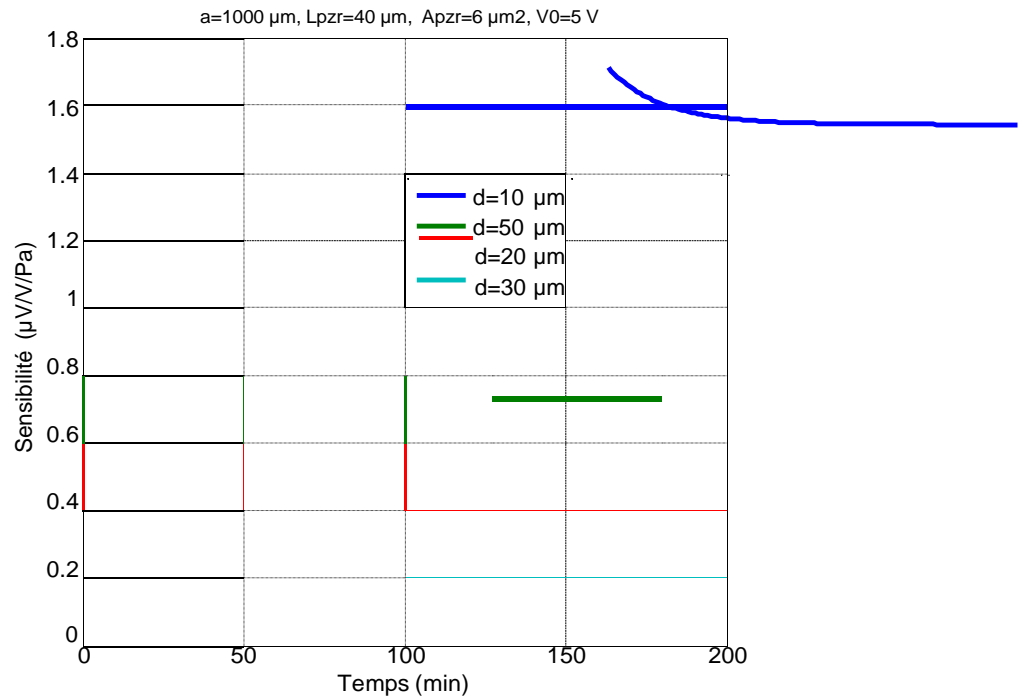


Figure III.8 : Variations de S_p en fonction de temps pour différentes valeurs de « d »

III. 4.2. Influence de la tension sur la sensibilité S_p

A l'instar de la démarche entreprise précédemment pour la détermination de la sensibilité en fonction du temps pour divers paramètres géométriques de la structure, nous avons établi l'évolution de la sensibilité en fonction de la tension pour une variété des dimensions de la membrane. A partir de ces courbes (III.10 à III.12) on peut conclure que l'effet de la tension appliquée est très important et on constate bien que le chauffage par effet Joule dû à cette source de tension réduit considérablement la sensibilité à la pression S_p .

On peut remarquer sur la figure III.10 que la sensibilité diminue d'une façon quasi linéaire avec la tension de polarisation. Par ailleurs, sa variation en fonction du côté de la membrane est en nette augmentation. Néanmoins, elle est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la membrane comme cela est illustré sur la figure III.11. Notons que l'impact de ce dernier paramètre dimensionnel peut être négligeable pour les faibles tensions et la valeur de la sensibilité est autour de $0.432 \mu\text{V/V/Pa}$ pour des dimensions de la membrane $1000*1000*20 (\mu\text{m}^3)$.

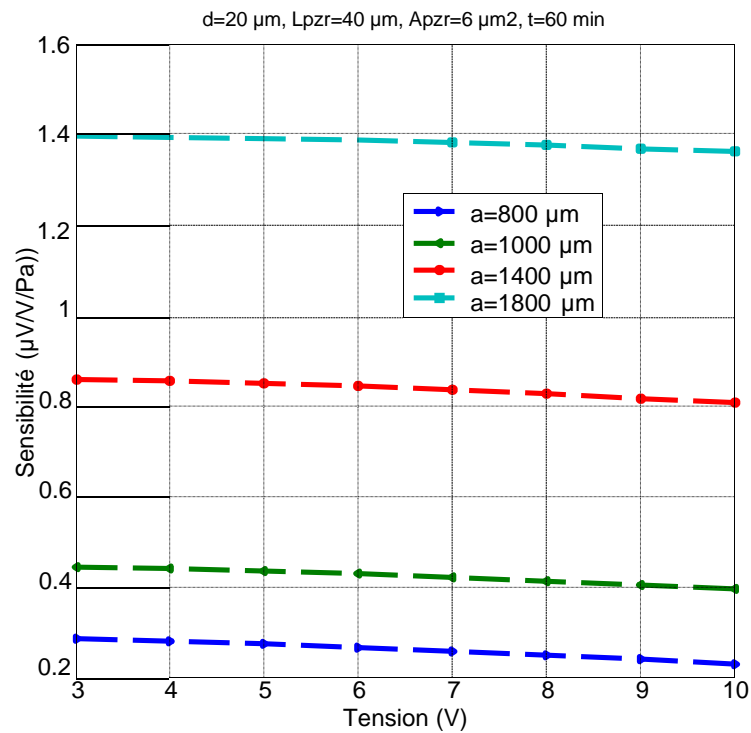


Figure III.10 : Variations S_p en fonction de la tension pour différentes valeurs de « a »

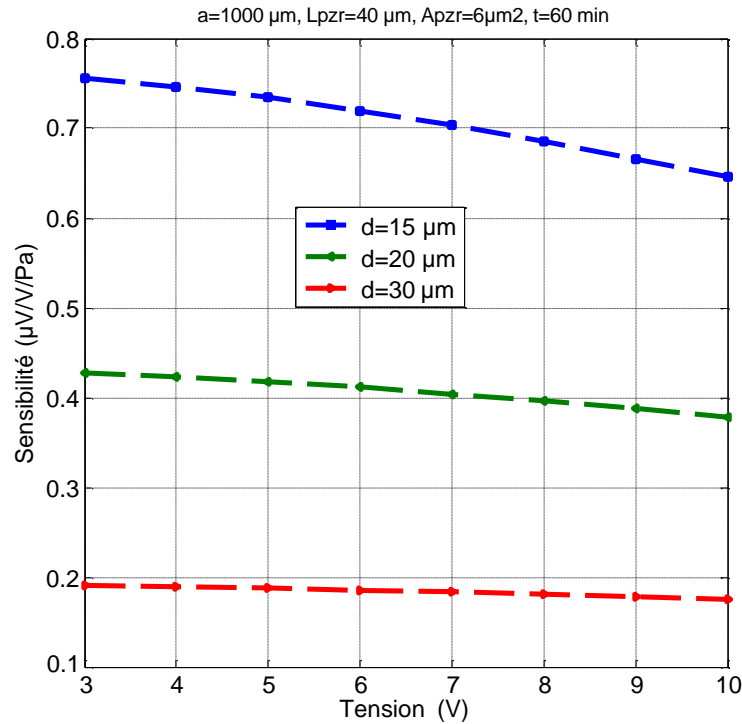


Figure III.11 : Variation de la sensibilité en fonction de la tension pour différentes épaisseurs

La sensibilité du capteur à la pression S_p est une fonction croissante de la longueur du côté de la membrane. Donc, pour augmenter la sensibilité, il est nécessaire d'avoir une grande longueur de la membrane. Cette option est facile à mettre en œuvre, toutefois, elle affecte la taille du dispositif. L'optimisation des paramètres géométriques du capteur permet d'optimiser considérablement la sensibilité du capteur. Les résultats ont montré également que la faible tension de polarisation doit être appliquée pour augmenter la sensibilité à la pression du dispositif.

III.5. Conclusion

La modélisation de l'effet Joule dans les capteurs de pression piézo-resistifs permet de prévoir leurs dérives thermiques. De ce fait, nous avons développé un modèle numérique pour réduire cet effet en utilisant la méthode des différences finies. Nous avons ainsi examiné les effets de la tension de polarisation, de la durée de fonctionnement du capteur et des paramètres géométriques sur la génération de la température.

Les résultats montrent que les variations thermiques sont proportionnelles à la tension appliquée, et que l'on doit utiliser la plus petite tension possible pour réduire l'effet Joule.

D'autre part, pour mettre en évidence l'effet de la durée de fonctionnement du dispositif, différents paramètres géométriques ont été variés. Les résultats ont montré que l'autoéchauffement est réduit sensiblement pendant un court temps de fonctionnement. Au delà de cet instant la valeur de la température devient constante et est indépendante du temps conformément à la théorie. Par ailleurs, pour connaître l'influence de la tension d'alimentation sur la sensibilité à la pression, plusieurs dimensions géométriques de la structure ont été étudiées pour divers temps de fonctionnement du capteur. Les résultats obtenus ont montré que les valeurs de ces paramètres dimensionnels sont inversement proportionnelles à la tension d'alimentation.

Enfin, cette étude nous a permis d'optimiser les performances du capteur en fonction de l'application pour laquelle il est dédié.

References bibliographiques

- [1] Aboubacar Chaehoi. «Conception et Modelisation de MEMS monolithique CMOS en technologie FSBM : Application aux accelerometres».Thèse Doctorat de l'université Montpellier II, 2005.
- [2] Ali Assy Development of two techniques for thermal characterization of materials : Scanning Thermal Microscopy (S_{Th}M) and 2! method». Thèse Doctorat, INSA de Lyon, 2015.
- [3] Najma Laaroussi. « Contribution a la simulation numerique des transferts de chaleur par conduction, rayonnement et convection thermosolutale dans des cavités». Thèse Doctorat, Université Paris-Est, 2008.
- [4] Simona-Mihaela Epure. « Etudes analytiques et numeriques du procédé de Bridgman d'emouillage: capillarité, transfert de chaleur et stabilité». Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [5] F. Vitillo. « Experimental and numerical contribution to heat transfer enhancement in compact plate heat exchangers». Thèse Doctorat, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2014.
- [6] Hamid Belghazi. « Modelisation analytique du transfert instationnaire de la chaleur dans un materiau bicouche en contact imparfait et soumis a une source de chaleur en mouvement». Thèse Doctorat de l' Université de Limoges, 2008.
- [7] Bernard M., et al., "Impact of Self-Heating and Thermal Coupling on Analog Circuits in SOI CMOS" *IEEE Journal of solid-state circuits*, VOL. 33, NO. 7, JULY 1998.
- [8] Oleg Semenov., et al., "Impact of Self-Heating Effect on Long-Term Reliability and Performance Degradation in CMOS Circuits" *IEEE Transactions On Device And Materials Reliability*, Vol. 6, No. 1, March 2006.
- [9] Pierre Allain. « Etude des Propriétés Electro-Thermo-Mécaniques de Nanofils en Silicium pour leur Intégration dans les Microsystèmes».Thèse Doctorat de l'université paris-sud 2012.
- [10] Mathieu Legay. « Intensification des processus de transfert de chaleur par ultrasons, vers un nouveau type d'échangeur de chaleur: l'échangeur vibrant». Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [11] Mohd Zahid Ansari and Chongdu Cho, " An Analytical Model of Joule Heating in Piezoresistive Microcantilevers " *Sensors* 2010, 10, 9668-9686; doi:10.3390/s101109668

- [12] Mohd Zahid Ansari and Chongdu Cho, "A conduction–convection model for self-heating in piezoresistive microcantilever biosensors," *Sensors and Actuators A*, vol. 175, pp.19–27, 2012.
- [13] Mounira Bouarroudj-Berkani. « Etude de la fatigue thermo-mecanique de modules électroniques de puissance en ambiance de temperatures elevees pour des applications de traction de vehicules electriques et hybrides».Thèse Doctorat. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, France, 2008.
- [14] Malou Zahra. « Etude de la rupture du verre sous des contraintes thermiques». Thèse Doctorat de l'Université Ferhat Abbas Sétif, 2009.
- [15] P. Fauchais. « Modélisation du Développement des Contraintes Résiduelles au Sein de Dépôts Plasma de Zircon et d'Acier». Thèse Doctorat de l'Université de Technologie de Troyes, 2005.
- [16] Nicolas Tessier-Doyen. «Etude expérimentale et numérique du comportement thermomecanique de materiaux refractaires modeles». Thèse Doctorat de l'Université de Limoges, 2003.
- [17] Benmeddour Amor. «Etude et simulations numériques des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque». Thèse Doctorat de l'Université de Constantine, 2010.
- [18] Roland Baviere. « Etude de l'Hydrodynamique et des Transferts de Chaleur dans des Microcanaux». Thèse Doctorat de l'Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005.
- [19] Didier Vallin. « Catalyse enzymatique en phase hétérogène. Transfert de chaleur et de matière sous champ électrique. Application aux capteurs et à l'optimisation des réacteurs». Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1984.
- [20] A. Boukabache. «Conception, Modélisation et Réalisation d'un Capteur de Pression Piezoresistif à Faible Derive Thermique», Doctorat d'état, Février 1993, Université de Constantine.
- [21] A. D.Teja et al "Thermal Analysis by Conduction Convection and Radiation in a Power Cable" *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Volume 9, Issue 3 (2014), PP 51-56.
- [22] Abdelaziz, Beddiaf., Fouad, Kerrou., and Salah Kemouche. "A Numerical Model of Joule Heating in Piezoresistive Pressure Sensors.", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol.6, No.3, (2016).

- [23] C.Pramanik, *et al.*, "Development of SPICE Compatible Thermal Model of Silicon MEMS Piezoresistive Pressure Sensor for CMOS- MEMS Integration," *IEEE Sensors, Korea*, October 22-25, 2006.
- [24] Ingelin Clausen, *et al.*, "Die separation and packaging of a surface micromachined piezoresistive pressure sensor," *Sensors and Actuators A* vol. 133, pp. 457–466, 2007.
- [25] Xin Li, *et al.*, "High-temperature piezoresistive pressure sensor based on implantation of oxygen into silicon wafer," *Sensors and Actuators A* vol. 179, pp. 277– 282, 2012.
- [26] Abdelaziz, Beddiaf, *et al.* "Optimization of the thermal drift caused by Joule heating in piezoresistive pressure sensor". 12th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME 2016 Lisbon), 978-1-5090-0493-5/16/\$31.00 ©2016 IEEE.
- [27] Chauffleur, X, "Modélisation par la méthode des éléments finis du comportement thermomécanique de capteurs de pression capacitifs et piézorésistifs en silicium," *PhD dissertation*, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1998.
- [28] Shuang Chen, *et al.*, "Design and Optimization of a Micro Piezoresistive Pressure Sensor. *Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* China, January 6-9, 2008.
- [29] F. Schilling, *et al.*, "Analysis Simulation of Thermally Induced Package Effects with Regard to Piezoresistive Pressure ," *Sensor and Actuators, A* vol. 60, pp.37-39, 1997.
- [30] R.Othmani, *et al.*, "The thermal drift characteristics of piezoresistive pressure sensor," *Physics procedia* vol. pp. 21 47-52, 2011.
- [31] A. R Mohammadi, *et al.*, "Development of a combined piezoresistive pressure and temperature sensor using a chemical protective coating for Kraft pulp digester process monitoring," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 21, pp. , 2011.
- [32] M. Olszacki et al, A multi-domain piezoresistive pressure sensor design tool based on analytical models, Euro Sim E 2007, Freiburg, Germany, Avril 2008.
- [33] Yicai Sun, *et al.*, "Electric drift of the bridge offset for pressure sensors and its utilization," *Sensors and Actuators A* , vol. 58 249–256, 1997.
- [34] Yicai Sun, et al., "Modelling of the reverse current and its effects on the thermal drift of the offset voltage for piezoresistive pressure sensors," *Sensors and Actuators A* 116 (2004) 125–132.
- [35] Aljancic, U, *et al.*, "Temperature effects modeling in silicon piezoresistive pressure sensor," *IEEE Melecon*, Egypt, May 7-9, 2002.

- [36] Abdelaziz, Beddiaf, *et al.*, "Thermo mechanical Modeling of Piezoresistive Pressure Sensor," *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.M.O.S.)*, Vol. 7, pp. 517-522, 2014.
- [37] Abdelaziz, Beddiaf, *et al.*, "Thermal drift characteristics of capacitive pressure sensors," *Journal of Engineering Science & Technology*, Vol.11, No.6, (2016).
- [38] Liwei Lin, Member, IEEE, Huey-Chi Chu, and Yen-Wen Lu, " A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors", *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 8, no. 4, december 1999.
- [39] Xiawei Meng and Yulong Zhao, "The Design and Optimization of a Highly Sensitive and Overload-Resistant Piezoresistive Pressure Sensor". *Sensors* 2016, 16, 348; doi:10.3390/s16030348
- [40] Saloni Chaurasia, B.S. Chaurasia« Analytical Models for Low Pressure Square Diaphragm Piezoresistive MEMS Sensor». *Engineering and Systems (SCES)*, 2012 Students Conference.
- [41] Kanda, Y. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon, *IEEE Trans. Electron Dev.* 29, 64-70, 1982.
- [42] Young-Tae Lee, *et al.*, "Compensation method of offset and its temperature drift in silicon piezoresistive pressure sensor using double wheatstone bridge configuration" *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*. Stockholm, Sweden, June 25- 29, 1995.
- [43] Jacques Rappaz, Marco Picasso «Introduction à l'analyse numériques », *Presses Polytechniques et universitaire de Romandes*, Ch1015, Lausanne , Suisse ,2000.
- [44] Abdelaziz Beddiaf And Fouad Kerrou (in press) "Study of the impact of thermal drift on reliability of pressure sensors". *Journal of Engineering Science & Technology*.

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à la modélisation et la simulation thermomécanique des capteurs de pression piézo-resistifs au silicium. Nous avons porté notre attention sur la contribution à l'amélioration des performances des capteurs de pression piézo-resistifs, en proposant des modèles qui permettent de prédire le comportement mécanique et thermique de ces dispositifs et minimisant l'influence de la température en optimisant leurs paramètres géométriques.

Dans un premier lieu, l'étude des principaux fondements théoriques nécessaires à la compréhension de leur principe de fonctionnement ainsi que leur principales caractéristiques a été établie. Ensuite, un modèle des éléments finis sous COMSOL Multiphysics consiste à étudier le comportement thermomécanique du capteur de pression piézo-resistive à membrane de forme carrée. Ce modèle a permis d'étudier la contrainte maximale exercée sur les bords de la membrane et la deflexion maximale au centre en fonction de la pression et de la température au repos. L'effet du dopage et de la température ainsi que l'influence de la configuration des jauges sur la tension de sortie du capteur ont été également étudiés.

En second lieu, dans le but de réduire les dérives thermiques de l'auto-échauffement, une modélisation du chauffage par effet Joule dans les capteurs de pression piézo-resistifs à membrane carrée a été proposée. A cet effet, un modèle numérique pour la résolution de transfert de chaleur en coordonnées cartésiennes et en régime variable, utilisant la méthode des différences finies (*FDM*) a été établie.

Le modèle établi donne l'occasion d'étudier l'augmentation de la température causée par l'auto-échauffement sur les caractéristiques de ces capteurs. Nous avons analysé l'influence de leurs paramètres géométriques pour optimiser leurs performances. Les résultats obtenus montrent que la variation de la température est une fonction croissante de la tension appliquée. Les résultats ont confirmé aussi que la faible tension de polarisation devrait être appliquée pour réduire l'effet de Joule.

Par ailleurs, pour connaître l'influence de la tension d'alimentation sur la sensibilité à la pression, plusieurs dimensions géométriques de la structure ont été étudiées pour divers temps de fonctionnement du capteur. Les résultats obtenus ont montré que les valeurs de ces paramètres dimensionnels sont inversement proportionnelles à la tension d'alimentation.



Université ABBES Laghrour KHENCHELA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie Industriel



Khenchela le :

AUTORISATION DE SOUTENANCE (Master)

Je soussigné Mr(Mme/Mlle) :

Chargé de l'encadrement des étudiants :

1.
2.

Etudiants en : 2^{ème} année Master

Thème de travail :

.....
.....

Autorise les candidats cités ci-dessus à déposer leur mémoire de fin d'étude.

Encadreur