

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués.

THÈME

**Création d'une interface graphique pour la
simulation et la conception de capteur de
pression micro-électromécanique.**

Présenté par : BAGHDACHE Nadia.
MOSTEFAOUI Fatima Zohra.

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
A.Ghellab	MCB	Président
Y.Belhadji	MCB	Examineur
R.Otmani	MAA	Encadreur

Année Universitaire : 2018-2019

Remerciements

Nous remercions ALLAH, le tout puissant de nous avoir aidé et donné la volonté de mener à terme ce travail.

Un grand merci à nos parents pour l'éducation qu'ils ont nous offerts et leurs appuis inconditionnels le long de notre cycle de formation.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur R. OTMANI qui, en tant que directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nos sincères remerciements vont également aux membres de jury qui nous avoir fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.

Et finalement, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous apportés leur aide de ce mémoire.

Dédicaces

« A conscience tranquille tout est accessible

Quand il y a la soif d'apprendre

Tout vient à point à qui sait attendre »

Je dédie ce travail

À celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère A mon père, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que dieu les gardes et les protège.

A mes chers et adorable sœur et frères. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que dieu, le tout puissant, vous protégé et vous garde.

À tous mes amis Sachez que vous m'êtes très chers. Je suis juste très reconnaissant pour tout l'amour, le soutien et la confiance dont vous faites preuve à mon égard ;

À tous ceux qui nous aiment.

Du fond du cœur MERCI.

Baghdache Nadia

Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, A mon binôme Nadia.

Mostefaoui Fatima

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Problématique de modélisation des MEMS	3
1.1. Introduction aux MEMS	3
1.2. Simulation multi-domaines	3
1.2.1. Méthode des éléments finis	4
1.2.1.1. Principe de la méthode des éléments finis	4
1.2.1.2. Type d'éléments	5
1.2.1.3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	6
1.2.2. Méthode Analytique	6
1.2.2.1. Les Types de modèle Analytique	7
1.2.3. Modélisation descriptive	8
1.3. Introduction aux VHDL-AMS	8
1.3.1. Organisation d'un modèle VHDL-AMS	8
1.3.1.1. L'entité	8
1.3.1.2. Architecture	9
1.3.1.3. Les quantité(Quantity)	9
1.3.2. Les avantage de VHDL-AMS	9
1.4. Conclusion	10
Chapitre 2 : Modèle analytique de capteur de pression piézorésistif	11
2.1. Introduction	11
2.2. Structure du capteur de pression piézorésistif	11
2.3. Réponse mécanique du capteur	12
2.3.1. Modélisation de la membrane	12
2.3.2. Résolution du modèle mathématique	14
2.3.3. Evaluation de la pression maximale d'utilisation	15
2.3.4. Variations des paramètres mécaniques du Silicium en fonction des directions cristallographiques	16
2.3.5. Variations des coefficients piézorésistif du Silicium en fonction des directions cristallographiques	17
2.4. Réponse électrique du capteur	17

2.4.1. Etude des différentes configurations de jauges	17
2.4.1.1. Configuration à une seule jauge	17
2.4.1.2. Configuration à deux jauges	18
2.4.1.3. Configuration à quatre jauges montées en pont de Wheatstone	20
2.5. Influence de la température sur la réponse du capteur	21
Chapitre 3 : Résultats de Simulation du capteur	22
3.1. Introduction	22
3.2. Résultats de simulation	22
3.2.1. Réponse mécanique	22
3.2.1.1. Déflexion de la membrane	22
3.2.1.2. Répartition des contraintes	22
3.2.1.3. La pression maximale	24
3.2.1.4. Variations des paramètres mécaniques du Silicium en fonction des directions cristallographiques	27
3.2.1.5. Variations des coefficients piézorésistif du Silicium en fonction des directions cristallographiques	28
3.2.1.6. Conclusion	30
3.2.2. Réponse électrique	31
3.2.2.1. Configuration à une seule jauge	31
3.2.2.2. Configuration à deux jauges	31
3.2.2.3. Configuration à quatre jauges montées en pont de Wheatstone	32
3.2.2.4. Conclusion	33
3.2.3. Réponse thermique	34
3.2.3.1. Modélisation du comportement thermique des piezorésistances en silicium	34
3.2.3.2. Dérive thermique de la tension de décalage	37
3.2.3.3. Comportement thermique du capteur sous une pression uniforme	38
3.2.3.4. Conclusion	41
Chapitre 4 : Présentation de l'interface.....	42
4.1. Introduction	42
4.2. L'outil « Guide » de MATLAB	42
4.3. Organigramme de l'interface	45
4.4. Présentation de l'interface	46
4.4.1. Les boutons	47
4.5. Résultats	47

4.5.1. Génération de maillage	47
4.5.2. Déflexion de la membrane	48
4.5.3. La contrainte normalisé sigma-1	48
4.5.4. La contrainte normalisé sigma-2	49
4.5.5. La contrainte de cisaillement.....	49
4.5.6. La valeur de la Résistance	50
4.5.7. La valeur de P44 en fonction de la température	50
4.5.8. Les valeurs de caractéristique de sorties	51
4.5.9. Les résultats graphiques	51
4.5.9.1. L'erreur de linéarité	51
4.5.9.2. La tension de sortie en fonction de pression	52
4.5.9.3. La sensibilité en fonction de la température et dopage	52
4.6. Conclusion	53
Conclusion générale	54
Annex A	56
Annex B	58
Liste des figures	59
Liste des tableaux	61
Liste des abreviations.....	62
Bibliographie	65

La pression est une grandeur physique qui joue un rôle extrêmement important dans la plus part des applications industrielles modernes .C'est pourquoi il existe aujourd'hui de nombreux moyens pour mesurer ce paramètre tel que les capteurs de pression.

A partir des années 1970 l'utilisation du silicium comme matériau de base à bouleversé les méthodes de conception de réalisation des capteurs de pression, ces capteurs sont retrouvés dans de nombreux domaines comme étant le premier maillon d'un système de contrôle ou de mesure.

Les capteurs de pression dont le fonctionnement est basé sur l'effet piézorésistif du silicium mono cristallin nous permet d'obtenir des capteurs de petites dimensions de sensibilité et un facteur de jauge élevé et de coût modéré.

Les jauges semi-conductrices sont très sensibles à la température, ce qui impose de modéliser le comportement thermique des capteurs à base de semi-conducteurs.

L'objectif de ce mémoire est la création d'une interface pour la simulation d'un capteur de pression piézorésistifs. Pour cela nous avons divisé notre travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre concerne la problématique de modélisation des MEMS où nous présentons les trois types de modélisations (la modélisation par éléments finis, la modélisation analytique, la modélisation descriptive).

Le deuxième chapitre sera consacré, en première partie, pour les bases théorique régissant le comportement mécanique de la membrane soumise à une pression, nous rappellerons la résolution de cette équation par la méthode de Galerkin ce qui permettra d'obtenir la déflexion. La deuxième partie concerne l'étude de la réponse électrique du capteur pour différentes types de configuration de jauges (une seule jauge, deux jauges, et quatre jauges montées en pont de Wheatstone). La troisième partie présente la réponse thermique, influence de la température sur la réponse du capteur.

Dans le troisième chapitre, nous intéressons à présenter les résultats de simulation. Nous avons présenté la déflexion de la membrane et la répartition des contraintes, la principale caractéristique du capteur (linéarité et sensibilité) pour différentes types de configuration de jauges, le comportement thermique du demi-pont et de pont -complet en basant sur le comportement thermique au 2^{ème} ordre des piezorésistances, et le

Introduction générale

comportement thermique du demi-pont et de pont –complet au repos et sous une pression uniforme.

Enfin, le dernier chapitre concerne la conception de l'interface graphique nous présentons notre implémentation logicielle ainsi que les résultats de simulation d'un capteur de pression implémentées dont l'étude qui a été faite précédemment.

1.1. Introduction aux MEMS :

Un microsystème est un ensemble de dispositifs hautement intégrés, comprenant des transducteurs (capteurs et actionneurs) avec leurs interfaces électroniques de traitement/processeurs pouvant exécuter des tâches dites intelligentes en réponse à un ensemble de commandes. Avec l'avènement de la technologie microélectronique, les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) peuvent atteindre aujourd'hui des niveaux de miniaturisation submicronique. On peut également distribuer, ou mettre en réseau, un grand nombre de ces composants de très petite taille pour obtenir des fonctionnalités d'ensemble différentes de celles d'origine. On peut aussi combiner, sur un même substrat, des éléments d'un microsystème incluant des parties processeurs, ouvrant ainsi des perspectives considérables dans le domaine des microsystèmes.

Le futur de ces dispositifs est aussi d'être distribué à travers l'environnement en étant embarqués dans des objets de tous les jours pour créer des systèmes appliqués à la perception et au raisonnement. Ainsi, demain ces composants se permettront de réagir au monde physique, qui les entoure, sur une échelle encore jamais atteinte auparavant.

Cependant, la complexité croissante de ces structures à base de MEMS ne va pas de pair avec une méthode de description orientée vers une seule physique. Elle implique que de tels systèmes aient des caractéristiques multi-physiques et multi-technologiques, lesquelles nécessitent des moyens de description et de modélisation relevant encore du défi technologique [1].

1.2. Simulation multi-domaines :

Aujourd'hui, les concepteurs ont la possibilité d'améliorer les simulations au niveau système en intégrant des modèles plus réalistes des composants électroniques. Les concepteurs des systèmes complexes à base de MEMS doivent donc effectuer des simulations pertinentes pour obtenir des conceptions justes. Ces simulations, pour être fiables, nécessitent une modélisation fine des composants mais également la prise en compte des interactions entre les différents éléments du système et de son environnement.

Les phénomènes dans les composants MEMS sont par nature multi-domaines (multi-physiques et multi-technologiques). En effet, aux comportements principaux qui mêlent la mécanique à l'électronique, s'ajoutent plusieurs effets physiques comme la chaleur, les ondes

et les champs (électrostatique, électromagnétique, etc.), les fluides (liquides, écoulement d'air, etc.).

Comment d'écrire de tels modèles multi-domaines en vue de leur simulation et leur réalisation industrielle ? Nous présentons ici trois types de modélisations qui sont les plus représentatifs de la démarche de modélisation des concepteurs [1]:

- La modélisation par éléments finis.
- La modélisation analytique.
- La modélisation descriptive.

1.2.1. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie. La MEF est une technique de discrétisation qui permet de transformer une théorie continue conduisant à des problèmes mathématiques insolubles analytiquement, en une théorie discrète conduisant à de simples systèmes d'équations que l'on sait résoudre numériquement. Cette transformation repose sur des hypothèses fortes, qui réduisent le domaine de validité de la théorie et qui doivent donc être bien comprises. Les logiciels de simulation par éléments finis sont de plus en plus utilisés dans le domaine des sciences de l'ingénieur [2].

Elle est devenue un outil de travail, de calcul et de conception dans des domaines aussi variés que l'analyse des structures, le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, les écoulements souterrains, la combustion ou encore la diffusion des polluants [3].

1.2.1.1. Principe de la méthode des éléments finis :

Etudier une structure (donc un domaine continu) par la méthode des éléments finis consiste d'abord à effectuer une discrétisation géométrique de ce domaine. La structure est subdivisée en sous-domaines de forme géométrique simple appelés « éléments » et interconnectés en des points appelés « nœuds » [4]. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou sommation de tous les éléments [5].

Comme toute simulation, la simulation par éléments finis repose sur une théorie, c'est-à-dire un ensemble de lois, hypothèses, théorèmes... permettant d'exprimer un résultat en fonction de données de départ c'est dans le cadre de cette théorie que les modèles et les résultats sont définis, et il est donc important d'en avoir au moins une vue d'ensemble.

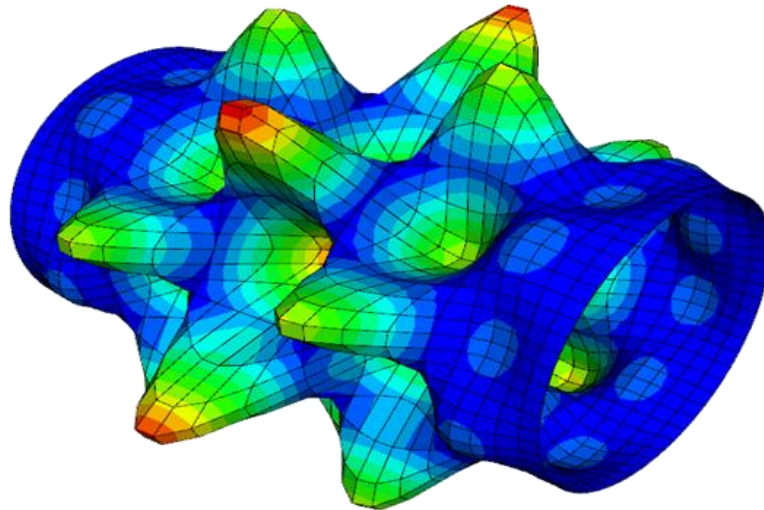


Figure 1.1 : Un exemple de champ de contraintes calculé dans une simulation par éléments finis [6].

1.2.1.2. Type d'éléments :

La sélection de l'élément sera fonction du type de problème à résoudre, donc on distingue plusieurs classes d'éléments finis suivant leur géométrie :

➤ **Les éléments unidimensionnels (1D) :**



Linéaire (2)

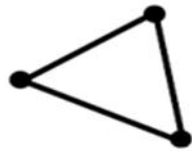


Quadratique (3)



Cubique (4)

➤ Les éléments bidimensionnels (2D) :



Linéaire (3)



Quadratique (8)



Cubique (12)

➤ Les éléments tridimensionnels (3D) :



Linéaire (8)



Quadratique (15)



Cubique (32)

1.2.1.3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis :

La MFE est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique, qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, donc on peut présenter un grand nombre de formes de structure à base du modèle analytique générale. Ainsi que la faculté de définir des maillages très irréguliers qui assure un bon découpage de frontière des objets. L'avantage majeur de cette méthode est la garantie d'une grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

1.2.2 Méthode Analytique :

Pour résoudre le problème de temps de calcul très long, des modélisations dites « analytiques » ont été aussi menées, ce type de modélisation consiste à, en moyennant quelques simplifications, d'utiliser directement les équations mathématiques représentant le

comportement du système dans les différents domaines physiques. Les équations à dérivées partielles sont remplacées par des équations différentielles ordinaires.

Pour résoudre ces équations (qui sont également utilisées dans les modélisations aux éléments finis), des outils de résolution mathématique, tels que Matlab®, sont utilisés. Par rapport aux modélisations aux éléments finis, ce nouveau type de modélisation permet l'obtention beaucoup plus rapide des résultats [7].

Avant de se lancer dans un modèle analytique, il faut donc définir quelles sont les variables intéressantes et pertinentes qu'on veut modéliser et celles qui ne le sont pas et que l'on néglige. Mais il faut aussi remarquer que le choix des variables se fait en référence à une théorie. Lorsque le cadre théorique est connu et le modèle défini, on cherche à résoudre les équations du phénomène étudié [8].

1.2.2.1. Les Types de modèle Analytique :

En distingue trois types de modèle Analytique sont :

- **Les modèles d'approche** : simples mais assez grossiers, ils ont pour objet de dégrossir le problème en choisissant une représentation simplifiée, "au premier ordre" par exemple, en vue de se faire une idée des principales tendances du comportement du système, et d'identifier les principaux paramètres qui le régissent. Il n'est pas toutefois toujours possible de les établir a priori, du moins avec une précision suffisante en pratique.
- **Les modèles de connaissance** : très détaillés mais souvent lourds et coûteux d'emploi, se situent à l'autre bout de l'échelle. Basés sur une analyse physique fine des phénomènes en jeu, leur avantage est la précision, mais leur inconvénient est la complexité et la lourdeur de mise en œuvre.
- **Les modèles réduits** : constituent en quelque sorte le compromis entre la simplicité de mise en œuvre des modèles d'approche et la précision des modèles de connaissance dont ils sont algorithmiquement issus. Ils traduisent le fait que le comportement d'ensemble d'un système, même complexe, est parfois relativement simple. Les procédures de réduction permettent ainsi de faire le lien théorique entre les lois de la physique (modèles de connaissance) et le comportement d'ensemble des systèmes (modèles identifiés) [9]

1.2.3. Modélisation descriptive :

Le troisième type de modélisation multi-domaines est en train de connaître le plus grand succès, il s'agit de la modélisation descriptive, et elle s'appuie sur des langages dédiés à la modélisation multi-domaines.

Ces langages permettent non seulement de développer des modèles de système électriques mixtes (analogique et numérique), mais aussi des systèmes non électriques (mécanique, magnétique, thermique, etc.). Parmi ces langages les plus utilisés, nous pouvons citer la VHDL-AMS.

1.3. Introduction aux VHDL-AMS :

Le langage VHDL-AMS (VHSIC-Hardware Description Language - Analog and Mixed Systems) permet la modélisation et la simulation de circuits et de systèmes logiques, analogiques et mixtes [1].

Le VHDL-AMS permet la description et la simulation des systèmes multi-technologiques grâce à des terminaux dont les grandeurs physiques associées respectent les lois de conservation lorsqu'ils sont interconnectés, mais grâce aussi à une déclaration de variables ou quantités analogiques dont la nature physique peut être quelconque.

L'écriture d'un modèle en VHDL-AMS est directe et la difficulté de résolution des équations reste transparente pour le programmeur. En effet, l'écriture d'une équation physique complexe (équation différentielle non linéaire avec éventuelle discontinuité) ne nécessite qu'une instruction simultanée (une seule ligne de code en VHDL-AMS) [10].

1.3.1. Organisation d'un modèle VHDL-AMS :

1.3.1.1. L'entité :

La déclaration d'entité contient ses spécifications d'interface. Le nom de l'entité et ses ports sont les moyens qu'on a pour la configurer et l'appeler depuis l'extérieur.

1.3.1.2. Architecture :

L'architecture signifie l'organisation interne d'une entité ou sa description. L'architecture a une partie déclarative et une partie instruction, qui peuvent être vides mais séparées par le mot clé « Begin » qui n'est pas optionnel.

1.3.1.3. Les quantités(Quantity):

Les signaux ou les grandeurs mises en jeu dans les entités peuvent être de nature physique électrique, mécanique, thermique, etc. Les quantités peuvent être :

- **Des quantités libres :** Les quantités libres sont déclarées à l'intérieur d'une architecture.
- **Des quantités sources :** Les quantités sources permettant de définir les signaux utilisés pour les analyses en fréquence AC et NOISE.
- **through ou across :** attachées à un terminal.

1.3.1.4. Terminaux (terminal) :

Bien que ce ne soient pas des « porteurs de valeurs », plutôt des transmetteurs, les terminaux sont les objets du monde analogique qui définissent les connexions, les nœuds. Les terminaux sont définis par leur nature liée au domaine physique dont ils appartiennent.

1.3.2. Les avantages de VHDL-AMS :

Lorsque VHDL-AMS a été créé, il existait de nombreux langages de conception propriétaires pour chaque fondeur ou fournisseur. Ceci était un obstacle à la communication entre domaines scientifiques et posait de graves problèmes aux sociétés lorsqu'un intervenant de la chaîne venait de disparaître ou à être remplacé, car le portage des modèles était alors très délicat et nécessitait de nombreuses heures de travail supplémentaires.

VHDL-AMS est quant à lui un produit non propriétaire et normalisé par l'IEEE qui tend à être reconnu par le plus grand nombre. L'utilisation généralisée de ce langage facilite la communication entre les différents domaines scientifiques grâce à son approche multi-domaines native qui permet aussi bien à un électronicien qu'à un mécanicien ou même un chimiste de modéliser la partie d'un dispositif qui le concerne directement sans problèmes de dialogue avec les autres parties.

La grande force de ce langage est de permettre la simulation mixte en autorisant aussi bien les modélisations à temps continu (analogiques) qu'à évènements discrets (logiques) ou mélangeant les deux. A cette flexibilité d'emploi s'ajoute la possibilité pour les concepteurs d'aborder leurs modèles à différents niveaux d'abstraction. En effet, VHDL-AMS propose des mécanismes permettant de gérer aussi bien les abstractions comportementales (c'est la fonction réalisée par le système qui est modélisée et non sa physique), que les abstractions structurelles (le système est divisé en sous-ensembles qui peuvent eux-mêmes être modélisés au moyen de différentes abstractions, ...) ou bien de type work-flow (enchaînement de blocs fonctionnels dont les entrées n'ont pas d'influence sur les sorties des blocs précédents). Les modèles créés avec VHDL-AMS peuvent donc aussi bien être descriptifs que prédictifs [11].

1.4. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour la présentation des différents outils de conception des MEMS et leurs intérêts suivant leurs types de modélisation (Elément fini, Analytique, Descriptive).

Nous avons commencé par la méthode des éléments finis qui permet d'approximer un problème continu par un problème discret facile à résoudre. Le problème que pose par cette méthode est la lourdeur du modèle qui a un impact sur le temps de résolution.

Ensuite, la méthode analytique qui est basée sur l'utilisation directement des équations mathématiques représentant le comportement des systèmes dans les différents domaines physiques. Il permet d'obtenir beaucoup plus rapidement les résultats. Il reste de nombreux problèmes en suspens. Par exemple, la réduction de l'ordre des systèmes non-linéaires à grande échelle.

La troisième partie concerne le langage de description matérielle VHDL-AMS qui a spécialement été conçue pour la description de ce type de modèles multi-physique et multi-technologique. Il permet la multi-abstraction des modèles : des modèles plus ou moins détaillés (fonctionnels, comportementaux, ou physiques) peuvent être décrits, mixés et simulés. Ceci facilite la conception hiérarchique des systèmes complexes.

2.1. Introduction

Les capteurs de pression connaissent, depuis les années 80, un essor de plus en plus important. Qui est surtout ressenti depuis le développement des capteurs miniatures sur silicium, exploitant les techniques microélectroniques. L'étude et la modélisation des capteurs de pression restent toujours d'actualité, puisqu'ils sont et resteront toujours un élément indispensable dans la conception de tous microsystèmes [12].

Ce chapitre consiste à modéliser le comportement et la réponse du capteur de pression piézorésistif (réponse mécanique, réponse électrique et dérive thermique).

Nous commençons ce chapitre par la description de la structure du capteur. On étudiera le comportement mécanique en utilisant l'équation différentielle régissant le mouvement d'une membrane soumise à une pression. La résolution de cette équation permettra d'obtenir la déflexion $W(x,y)$ en tout point de la membrane ainsi que les contraintes engendrées sur cette dernière.

La deuxième partie du chapitre concerne l'étude de la réponse électrique du capteur pour différents types de configuration de jauges (une seule jauge, deux jauges, et quatre jauges montées en pont de Wheatstone).

Les capteurs piézorésistifs sont extrêmement sensibles à la température, la dernière partie concernera alors l'étude du dérivé thermique du capteur et de ses caractéristiques (sensibilité, linéarité, tension d'offset, etc.).

2.2. Structure du capteur de pression piézorésistif :

La plupart des capteurs de pression piézorésistif sont réalisés par micro usinage de silicium par un agent chimique anisotropique. Un capteur de pression piézorésistif est un dispositif composé d'une membrane micro usinée dans une plaquette de silicium constituant le corps d'épreuve qui se déforme sous l'effet d'une pression appliquée. Des jauges piézorésistives en polysilicium implantées en surface du corps d'épreuve forment un conditionneur passif qui transforme la déformation en une variation de résistance (Fig.2.1).

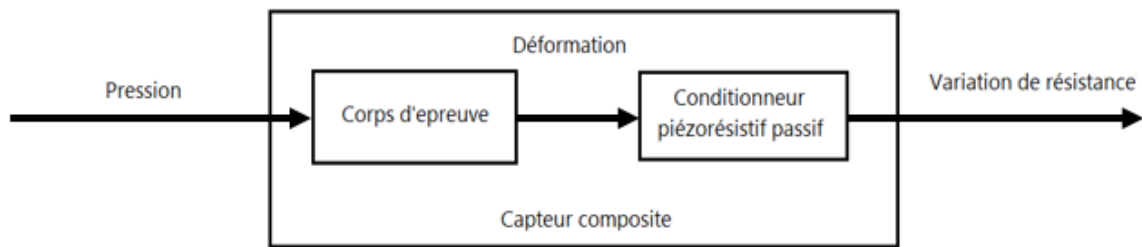


Fig.2.1 : Principe d'un capteur de pression piézorésistif à membrane [13].

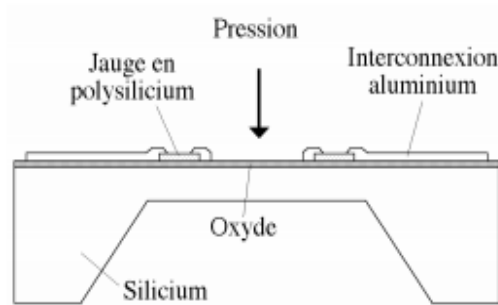


Fig.2.2 : Schéma en coupe d'un capteur piézorésistif à membrane de type Silicium sur un isolant [14].

2.3. Réponse mécanique du capteur :

2.3.1. Modélisation de la membrane :

La loi qui gouverne la déflexion d'une membrane fine, dans le cas des faibles perturbations, est régie par l'équation de Lagrange qui est une équation à dérivées partielles d'ordre 4 (équation 2.1).

La (Fig.2.3) représente une membrane de forme rectangulaire. Ses dimensions sont la longueur "a" suivant l'axe OX, la largeur "b" suivant l'axe OY et la hauteur "h" suivant l'axe OZ, en supposant cette membrane comme plaque mince ($h \ll a$ et b). Nous définissons le facteur de forme : $R=a/b$ [15].

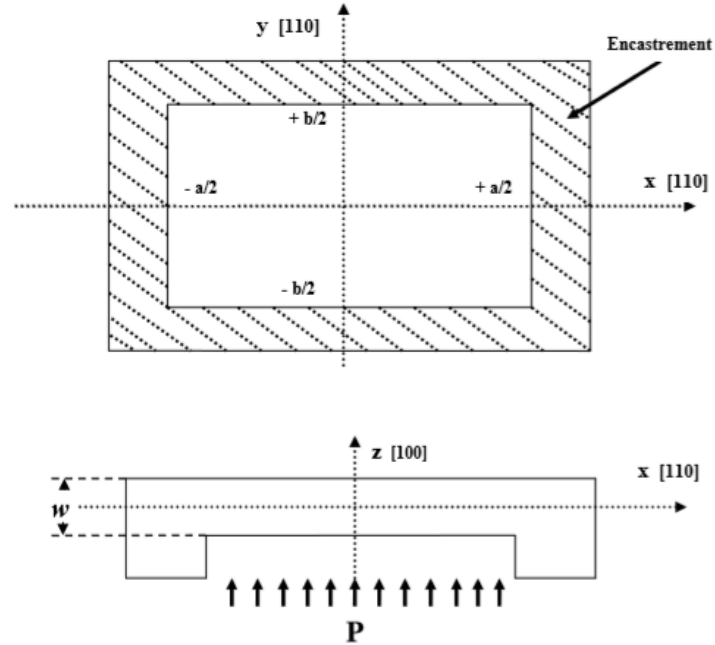


Fig.2.3 :Vue en coupe et de dessus de la membrane [16].

$$\frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial x^4} + 2\alpha_{Si} \frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial y^2 \cdot \partial x^2} + \frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (2.1)$$

Avec :

$W(x, y)$: représente la déformation en tout point de la membrane.

P: Pression appliquée.

D : Coefficient de rigidité du Silicium exprimée par :

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.2)$$

α_{Si} : Constante du silicium traduisant l'anisotropie de ses propriétés mécanique. Donnée par[12] :

$$\alpha_{Si} = \nu + \frac{2G(1-\nu)^2}{E} \quad (2.3)$$

Où :

h est l'épaisseur de la membrane. ν , G , E sont respectivement le coefficient de POISSON, les modules de COULOMB et d'YOUNG du silicium.

La relation (2.4) traduit les équations des contraintes normales (longitudinale et transversale) et de la contrainte de cisaillement. Le calcul de ses contraintes passe d'abord par la détermination de la déflexion $W(x, y)$ de la membrane.

$$\begin{cases} \sigma_1 = -\frac{h}{2} \frac{Y_1}{1-\nu_1^2} \left(\frac{\partial^2 W(x,y)}{\partial x^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 W(x,y)}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_2 = -\frac{h}{2} \frac{Y_1}{1-\nu_1^2} \left(\frac{\partial^2 W(x,y)}{\partial y^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 W(x,y)}{\partial x^2} \right) \\ \sigma_6 = -hG_1 \left(\frac{\partial^2 W(x,y)}{\partial x \partial y} \right) \end{cases} \quad (2.4)$$

2.3.2. Résolution du modèle mathématique :

Lorsque la membrane en silicium monocristallin est soumise à une pression P , elle fléchit (Fig.2.4). Dans ce qui suit, il est admis que les hypothèses suivantes sont vérifiées [17]:

- La pression est telle que la théorie d'élasticité reste applicable.
- La membrane est assimilable à une plaque mince ($h \ll a$).
- La théorie des faibles déflexions reste valable ($W \ll h$).
- Toutes les forces extérieures, autres que celles dues à la pression, sont négligeables.
- La membrane est totalement encastree sur ses bords.

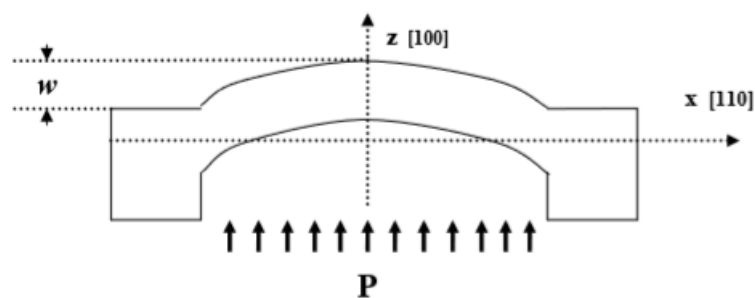


Fig.2.4 : Déflexion de la membrane lors de l'application de la pression [16].

L'encastrement parfait de la membrane sur ses bords impose les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{cases} W \left(x = \pm \frac{a}{2}, \forall y \right) = 0 \\ W \left(\forall x, y = \pm \frac{b}{2} \right) = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

La solution analytique exacte de ce système équations n'est pas connue ! Cependant, une solution approchée à ce problème, par la méthode de Galerkin, est donnée dans l'équation (2.6) [17].

L'application de la méthode de Galerkin au cas d'une membrane rectangulaire dont les bords sont parfaitement encastés, aboutit à une solution semi-analytique qu'on peut mettre sous la forme suivante :

$$W_N(u, v) = (1 - u)^2 \cdot (1 - v)^2 \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n K_{ij} u^i v^j \right] \quad (2.6)$$

2.3.3. Evaluation de la pression maximale d'utilisation:

La pression maximale admissible a été définie comme étant celle qui engendre au sein de la membrane une contrainte maximale égale à la contrainte de limite élastique du silicium σ_e (Fig.2.5).

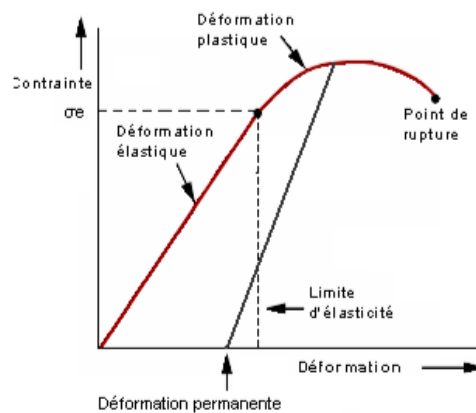


Fig.2.5 : courbe d'élasticité [18]

On définit la relation (2.7) qui fait intervenir plusieurs constantes mécaniques du silicium. Le module de rigidité à la déflexion D et le coefficient du tenseur de rigidité C_{11} sont connus avec une bonne précision. Les valeurs de limite d'élasticité σ_e varie de $1.75 \cdot 10^8$ à $7 \cdot 10^9$ Pa. Nous avons utilisé une valeur intermédiaire de 10^9 [18].

$$P_{\max} = \sigma \frac{h^2 D}{b^2 C_{11}} \left[\frac{1}{K_{00(R)} + K_{20(R)}} \right] \quad (2.7)$$

Pour avoir une sensibilité maximale du capteur, il faut fonctionner au voisinage de sa pression maximale admissible. Cependant, les déflexions de la membrane causée par cette pression ne sont plus négligeables devant épaisseur h , c'est-à-dire qu'on s'écarte du domaine de validité de notre modèle basé sur la théorie de faibles déflexions [9]. De plus le fonctionnement du capteur autour de sa pression maximale entraîne des risques de rupture à la fatigue, des non linéarités énormes et un vieillissement prématuré du dispositif.

Pour cela, on fera fonctionner le dispositif à des pressions plus faibles, l'ordre du demi de la pression maximale admissible. Dans notre cas, nous avons adopté :

$$P_{U_{\max}} = \frac{1}{2} P_{\max} \quad (2.8)$$

Ainsi, la sensibilité à la pression sera deux fois plus faible que la sensibilité maximale, mais les autres caractéristiques du dispositif, notamment la linéarité, en seront améliorées [18].

2.3.4. Variations des paramètres mécaniques du Silicium en fonction des directions cristallographiques :

Les paramètres mécaniques étant définis uniquement par les coefficients de la matrice d'élasticité $[S]$, le calcul des nouvelles valeurs des paramètres mécaniques pour les différentes directions se fait par la matrice de transformation définie dans l'annexe B. Les relations du module de Young et du coefficient de Poisson se définissent comme suite :

$$E_i = \frac{1}{s'_{ii}} \quad (2.9)$$

$$\nu_{ji} = -\frac{s'_{ji}}{s'_{ii}} \quad (2.10)$$

$$s'_{ij} = a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} \cdot S_{mnop} \quad (2.11)$$

Ainsi, en utilisant la relation (2.11), présentée en (Annexe B), on peut calculer pour n'importe quelle direction cristallographique les différents paramètres mécaniques du Silicium. Le tableau ci-dessous donne les valeurs trouvées dans la littérature des paramètres principaux de la matrice d'élasticité.

S_{11}	S_{12}	S_{44}
$7.6609.10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$	$-2.142.10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$	$12.577.10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$

Tab.2.1 : Valeurs des coefficients d'élasticité du silicium <100> [19].

2.3.5. Variations des coefficients piézorésistif du Silicium en fonction des directions cristallographiques :

Dans le même cas précédent, nous calculerons les coefficients de piézorésistivité π_{ij} longitudinal et transversal pour les différentes directions cristallographiques et pour le silicium de type N et le silicium de type P.

2.4. Réponse électrique du capteur :

En choisissant les jauges de la forme rectangulaires et orientées suivant la direction 1(Fig.2.6) avec les contacts électriques pris dans le sens de la longueur.

La variation relative de la résistivité devient :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t + \pi_c \sigma_c \quad (2.12)$$

2.4.1. Etude des différentes configurations de jauges :

2.4.1.1. Configuration à une seule jauge :

Dans le montage en quart de pont, on ne dispose que d'une jauge et trois résistances viennent en complément avec l'électronique associée [20].

Deux cas de figures se présentent pour la configuration à une seule jauge. Cette dernière peut être diffusée parallèlement aux bords de la membrane (Fig.2.6. a) ou bien perpendiculairement à ces bords (Fig.2.6. b).

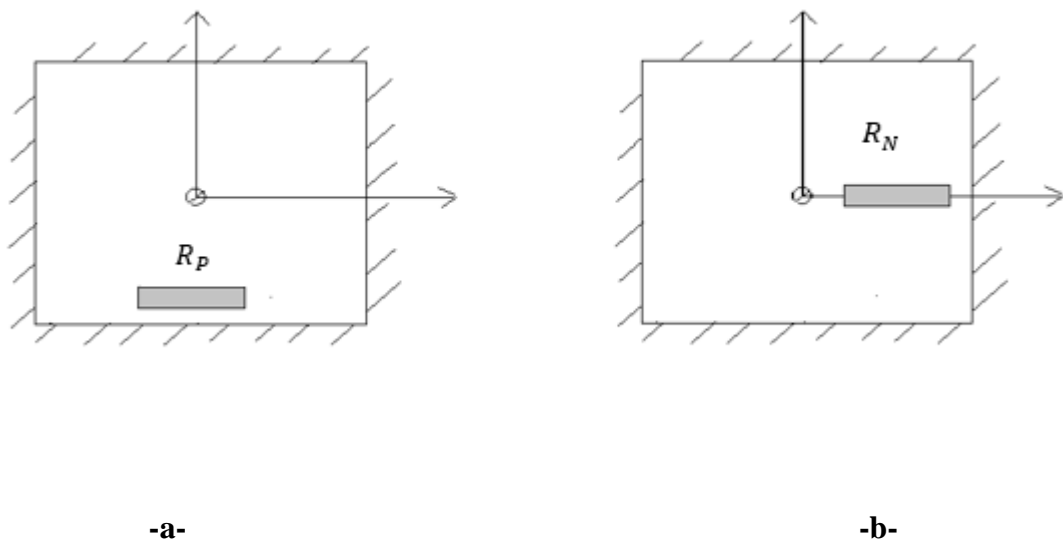


Fig.2.6 : Représentation schématique de la disposition de la jauge sur la membrane [21].

L'équation (2.1) permet d'écrire :

- Pour la jauge diffusée parallèlement aux bords de la membrane :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_P = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.13)$$

- Pour la jauge diffusée perpendiculairement aux bords de la membrane :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_N = \pi_l \sigma_t + \pi_t \sigma_l \quad (2.14)$$

2.4.1.2. Configuration à deux jauges :

L'utilisation d'une combinaison de deux jauges dans un même pont résulte en ce qu'on dénomme un demi-pont [22], monté en circuit potentiométrique et orientées comme le montre la figure (2.7). La tension de sortie dans ce cas est :

$$V_{SO} = \frac{R_N}{R_N + R_P} V_e \quad (2.15)$$

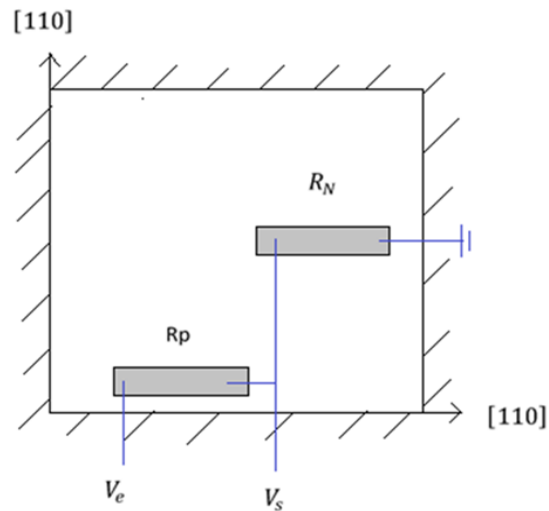


Fig.2.7 : Représentation schématique de la disposition de deux jauges sur la membrane [21].

En faisant l'hypothèse que les valeurs des deux piezorésistances R_N et R_P sont égales, et que la variation des résistances est faible devant leurs valeurs nominales, la relation précédente se réduit en [21] :

$$\frac{\Delta V_S}{V_e} = \frac{1}{4R} (\Delta R_N - \Delta R_P) \quad (2.16)$$

En cas de changement de comportement thermique, la sensibilité est moins élevée que celle obtenue avec une seule jaugue, puisqu'il peut y avoir compensation totale ou partielle des coefficients de température des deux jauges [21].

Le coefficient de non linéarité est donné par :

$$\eta = 1 - \left[1 + \left(1 + \frac{R_P}{R_N} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta R_N}{R_N} + \frac{R_P}{R_N} \frac{\Delta R_P}{R_P} \right) \right]^{-1} \quad (2.17)$$

2.4.1.3. Configuration à quatre jauges montées en pont de Wheatstone :

Le pont de Wheatstone (Fig.2.8) est le circuit le mieux adapté pour la mesure des petites variations de résistances électriques (maximum 10%) telles que rencontrées lors de l'utilisation de jauge de déformations [23].

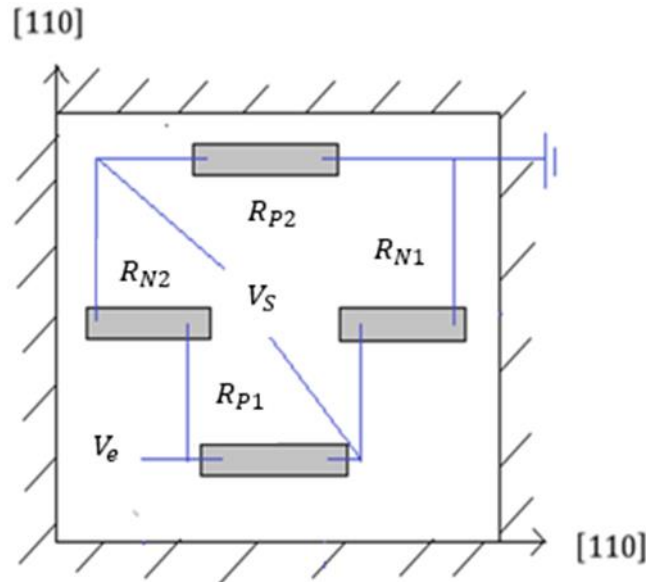


Fig.2.8 : Représentation schématique de la disposition de quatre jauges sur la membrane [21].

La tension de sortie est écrite :

$$V_{SO} = \left(\frac{R_{N1}}{R_{P1} + R_{N1}} - \frac{R_{P2}}{R_{N2} + R_{P2}} \right) V_e \quad (2.18)$$

Considérons le cas plus général dans lequel les quatre résistances peuvent changer deux à deux ($R_{P1} = R_{P2}$) et ($R_{N1} = R_{N2}$). Dans ce cas, la tension de sortie en fonction de quatre résistances et de la tension d'alimentation est donnée par :

$$\frac{\Delta V_{SL}}{V_e} = \left[\left(R_{N1} \left(1 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) - R_{P1} \left(1 + \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \right) / \left(R_{N1} \left(1 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) - R_{P1} \left(1 + \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \right) \right] \quad (2.19)$$

Le coefficient de non linéarité η est :

$$\eta = \frac{V_{SL} - V_S}{V_{SL}} = \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \left[\left(\frac{R_{N1}}{R_{P1}} + \left(\frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} / \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) \right) / \left(1 + \frac{R_{N1}}{R_{P1}} \right) \right] \quad (2.20)$$

2.5. Influence de la température sur la réponse du capteur

Les capteurs de pression piézorésistifs à base de silicium ont une grande dérive thermique en raison de leur grande sensibilité à la température. L'étude du comportement thermique de ces capteurs est essentielle pour définir les paramètres à l'origine de la dérive des caractéristiques de sortie [25].

Une telle étude fait beaucoup plus appel au moyens expérimentaux de mesure et de ses caractérisations qu'à la modélisation théorique que nous allons adopter ici pour manque de moyens pratiques. Néanmoins, nous aurons l'occasion de comparer nos résultats théoriques avec ceux trouvés expérimentalement dans d'autres travaux, et pour valider et indiquer les insuffisances de la démarche théorique que nous avons adoptée depuis le début de notre travail [21].

Nous modélisons le comportement thermique d'un micro-capteur de pression piézorésistif à base de monocristal de silicium. Notre formulation repose sur un modèle analytique simple et précis. Ce qui nous permet de calculer l'effet thermique sur les caractéristiques du capteur en très peu de temps et avec une très bonne précision.

Nous avons adopté deux modèles différents de mobilité des électrons et des trous dans le silicium. Le modèle de mobilité Arora basé sur l'interaction des porteurs avec le réseau cristallin et les impuretés ionisées, et le modèle de mobilité de Dorckel basé sur l'interaction des porteurs avec le réseau cristallin, avec les impuretés ionisées et sur les collisions charge-charge [25].

3.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à présenter les résultats de simulation obtenus par la réponse du capteur (réponse mécanique, électrique, thermique). La première partie, nous avons présenté la déflexion de la membrane et la répartition des contraintes. Dans la deuxième partie nous étudions les principales caractéristiques du capteur (linéarité et sensibilité) pour différentes types de configuration de jauges (une seule jauge, deux jauges, et quatre jauges montées en pont de Wheatstone). Dans la troisième partie nous avons étudié le comportement thermique du demi-pont et du pont complet en se basant sur le comportement thermique au 2^{ème} ordre des piezorésistances.

3.2. Résultats de simulation :

3.2.1. Réponse mécanique :

3.2.1.1. Déflexion de la membrane :

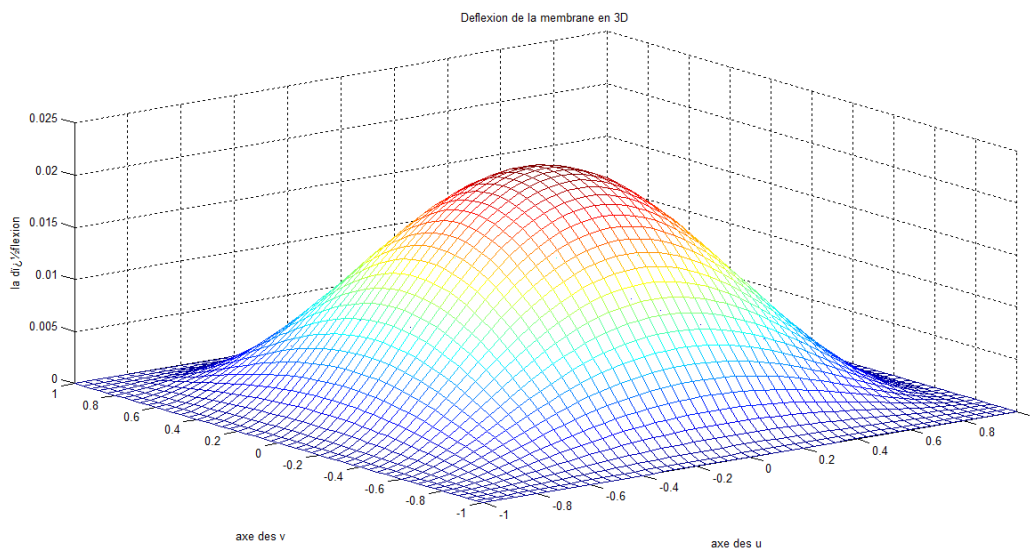
On peut tracer la déflexion de la membrane carré (R=1). On remarque que la déflexion est maximale au centre de la membrane et nulle à ces bords (Fig.3.1).

3.2.1.2. Répartition des contraintes :

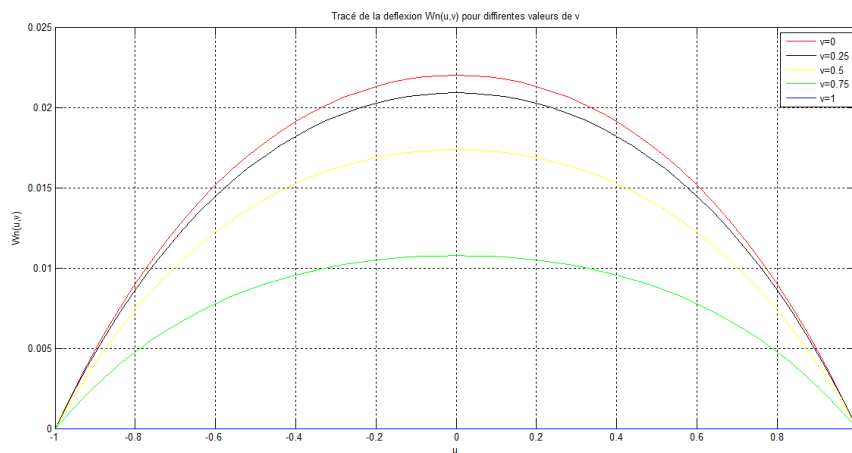
Nous avons vu précédemment que la réponse optimale du capteur dépendait de l'emplacement des piezorésistances. Pour obtenir ce résultat, il est donc important de connaître la répartition des contraintes à travers la membrane.

Une fois que la déflexion W_N en tout point de la membrane est déterminée, les relations des contraintes normalisées (3.1) nous permettent de tracer la répartition de ces dernières (Fig.3.2).

$$\begin{cases} \sigma_1 = -\frac{3}{2} \left(\frac{\partial^2 W_N(u,v)}{\partial u^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 W_N(u,v)}{\partial v^2} \right) \\ \sigma_2 = -\frac{3}{2} \left(\frac{\partial^2 W_N(u,v)}{\partial v^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 W_N(u,v)}{\partial u^2} \right) \\ \tau_6 = (1 - \nu^2) \left(\frac{\partial^2 W(x,y)}{\partial x \partial y} \right) \end{cases} \quad (3.1)$$



-a-



-b-

Fig.3.1 : déflexion de la membrane –a- Représentation en 3-D et –b- Représentation de la déflexion $W_N(u)$ paramétré en v [21].

La figure (3.2) permet de visualiser la distribution des contraintes à la surface de la membrane lorsqu'une pression lui est appliquée. Une analyse détaillée de ces résultats montre que la contrainte maximale se trouve en surface de la membrane, aux points de coordonnées $(u=\pm 1, v=0)$ quel que soit le rapport de rectangularité. Les jauges seront alors placées sur les bords de la membrane pour avoir le maximum de sensibilité.

Cependant pour une utilisation pratique de ces résultats, nous avons relevé les valeurs numériques des contraintes longitudinale et normale normalisées [9] :

$$\bar{\sigma}_l = 0.0148 \quad (3.2)$$

$$\bar{\sigma}_t = 0.2308 \quad (3.3)$$

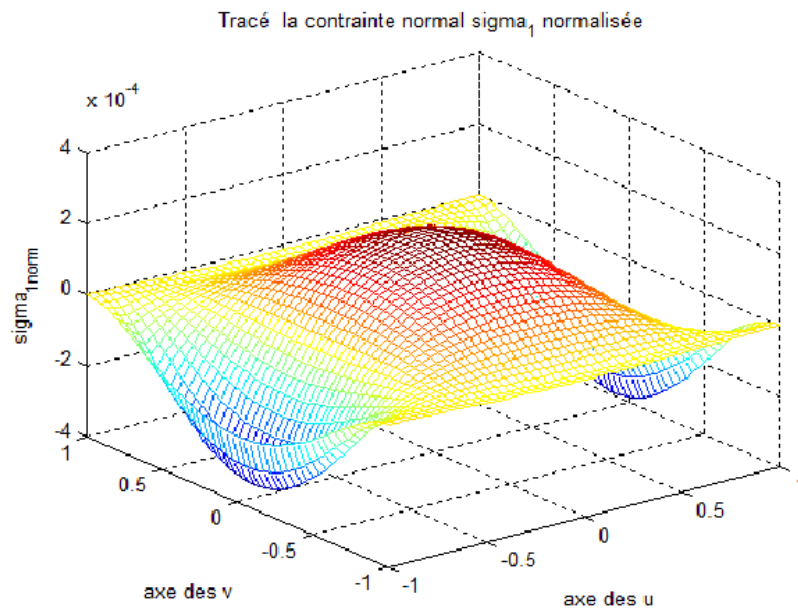
$$\sigma = \bar{\sigma}_l \left(\frac{a}{h}\right)^2 P \quad (3.4)$$

$$\sigma = \bar{\sigma}_t \left(\frac{a}{h}\right)^2 P \quad (3.5)$$

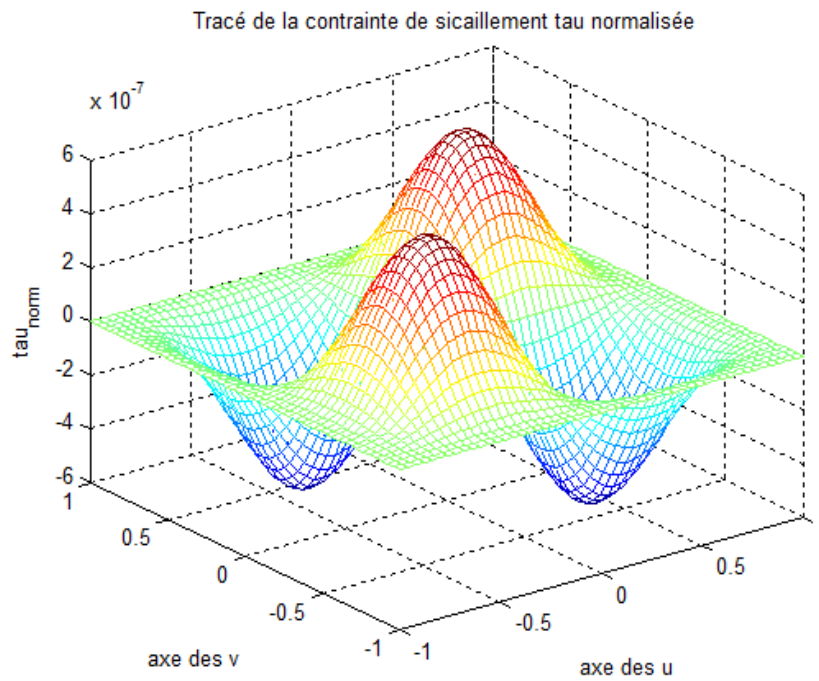
3.2.1.3. La pression maximale :

La relation (2.7) montre que la pression maximale d'utilisation dépend aussi du rapport de rectangularité R . Pour mettre en évidence cette dépendance, nous considérons trois membranes possédant la même surface (4 mm^2). Une forme carrée, une deuxième de forme rectangulaire avec $R=2$ et la troisième de forme rectangulaire avec $R=3$.

Nous avons tracé la variation de $P_{U_{\max}}$ pour les trois membranes (Fig.3.3.b) et nous avons remarqué que les membranes rectangulaires présentent une pression maximale d'utilisation plus élevée que la membrane carrée. Ceci permet de déduire que plus le rapport R est élevé plus l'étendue de la mesure est grande [9].

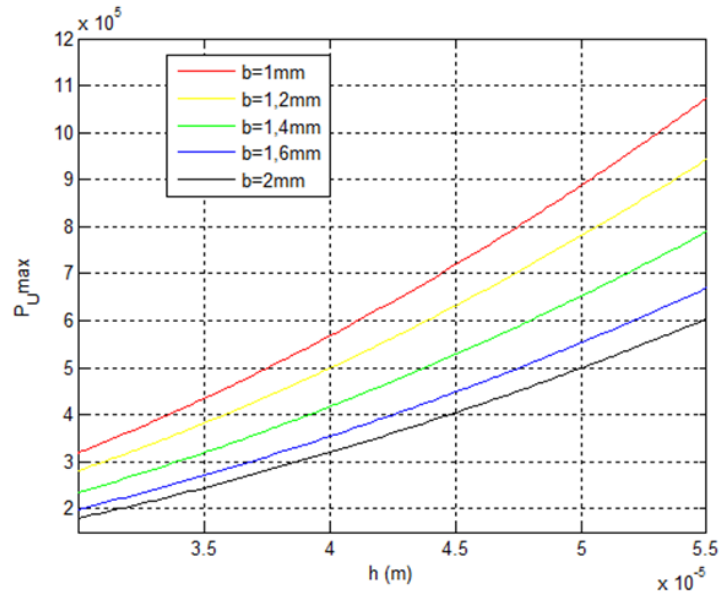


-a-

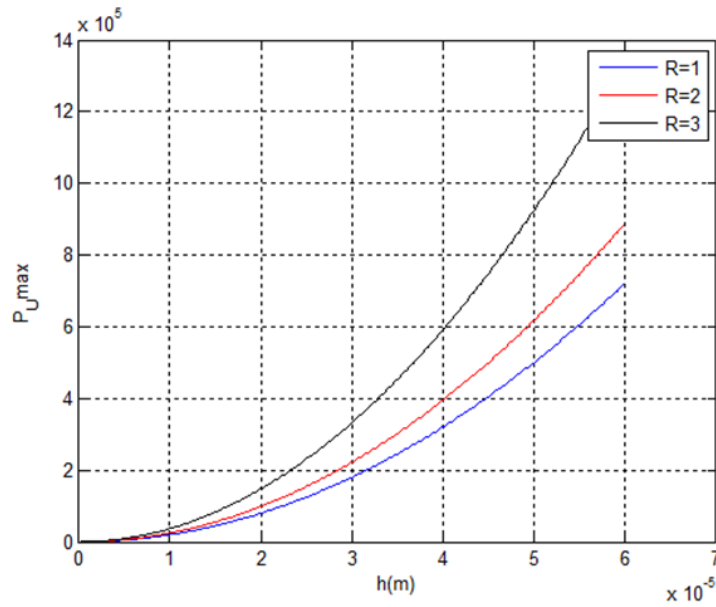


-b-

Fig.3.2 : -a- Contrainte normale σ_1 et -b- Contrainte de cisaillement τ_6 [21].



-a-



-b-

Fig.3.3 : La variation de P_{Umax} par rapport aux paramètres géométriques de la membrane [21].

3.2.2.4. Variations des paramètres mécaniques du Silicium en fonction des directions cristallographiques :

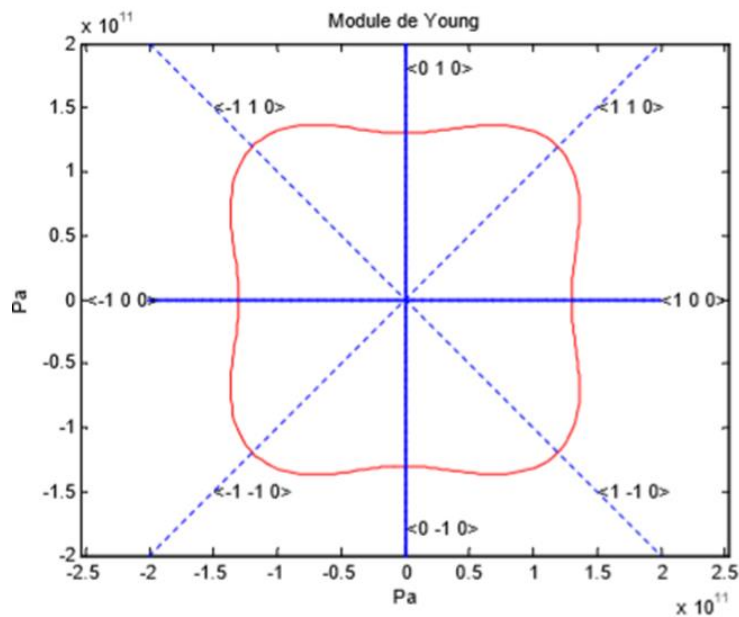


Fig.3.4 : Module de Young du silicium (100) en fonction des directions cristallographiques [19].

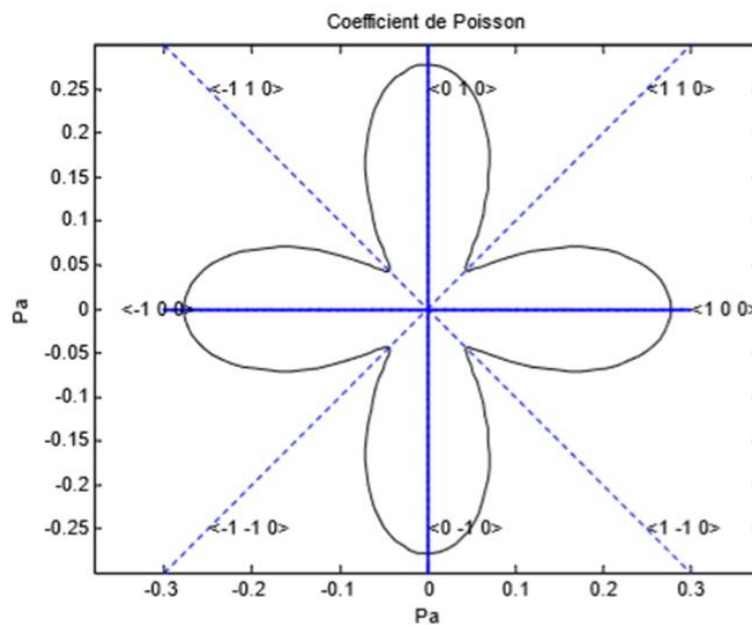


Fig. 3.5 : Coefficients de Poisson du silicium (100) en fonction des directions cristallographiques [19].

Dans la direction $\langle 110 \rangle$, le coefficient de Poisson atteint une valeur minimale d'alors que le module de Young atteint une valeur maximale. Par contre, dans la direction [100], le coefficient de Poisson est à son maximum alors que le module de Young prend la valeur minimale. Ces remarques seront prises en considération lors de la conception du capteur pour optimiser sa réponse.

3.2.2.5. Variations des coefficients piézorésistif du Silicium en fonction des directions cristallographiques :

Pour le silicium de type N, on remarque que la direction [100] est la plus intéressante à exploiter car les deux coefficients π_{11} et π_{12} sont à leurs maximum. Par contre, pour cette même direction dans un silicium de type P, les trois coefficients de piézorésistivité sont à leurs minimum. Dans la direction [110], les propriétés piézorésistifs du silicium de type N sont loin de leurs valeurs potentielles alors que pour un silicium de type P dans cette direction, les deux coefficients π_{11} et π_{12} prennent des valeurs très proches entre elles et de signes opposées.

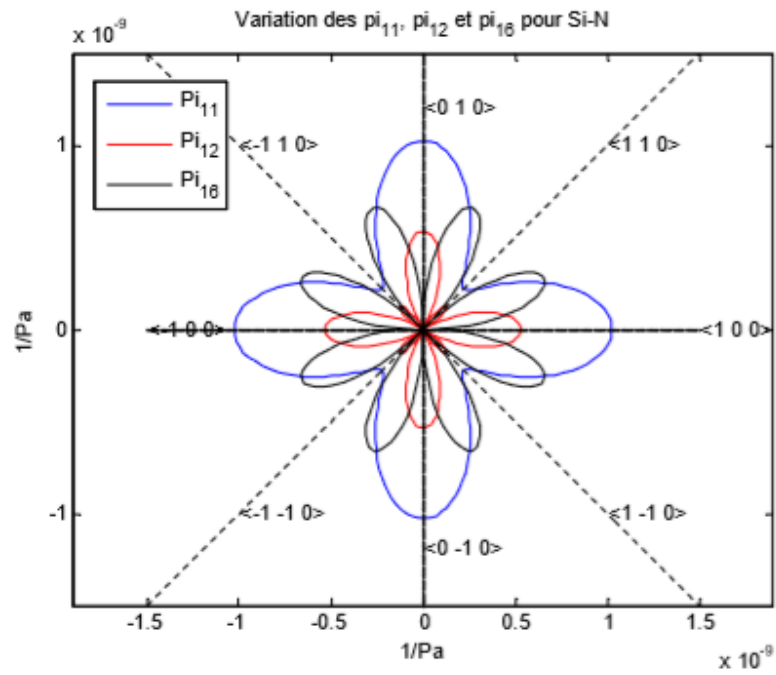


Fig.3.6 : Courbe de variation des coefficients de piézorésistivité du Si-N (100) en fonction des directions cristallographiques [19].

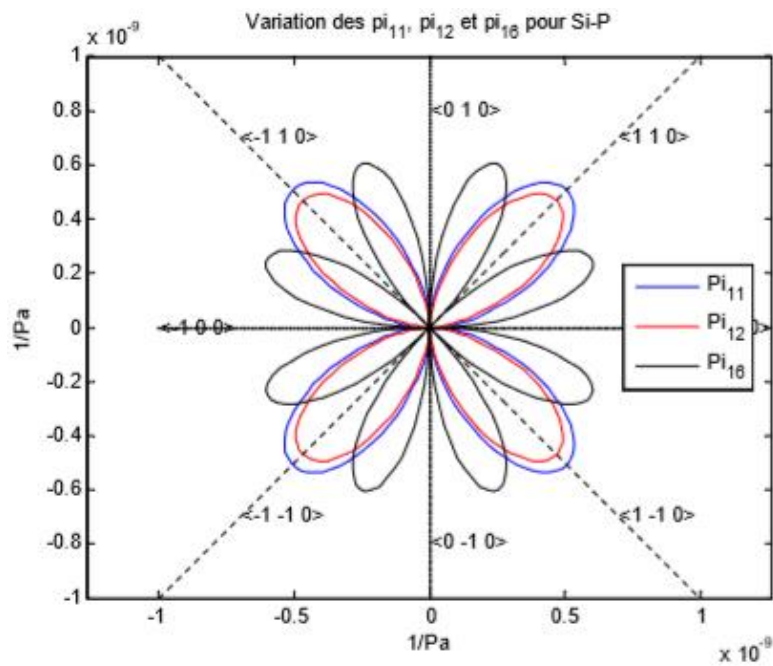


Fig.3.7 : Courbe de variation des coefficients de piézorésistivité du Si-P (100) en fonction des directions cristallographiques [19].

3.2.2.6. Conclusion :

En modélisant le comportement mécanique d'une membrane fine au silicium, parfaitement encastrée aux bords, de formes rectangulaire soumise à une pression uniforme et constante, dans le cas faibles déformations, et en mettant en évidence son anisotropie, nous sommes arrivés à une formulation globale qui nous permettra, par le biais de choix bien définis. Ces choix touchent essentiellement l'emplacement des piezorésistances diffusées, la géométrie de la membrane et le type du matériau utilisé.

L'analyse des résultats obtenue montre que la déflexion maximale au centre de la membrane est directement proportionnelle à la pression appliquée et l'emplacement idéal des jauges et sur les bords de la membrane, c'est là où les contraintes et maximale.

Le choix du plan (100) étant imposé par des considérations d'ordre technologique. On optera donc pour une membrane dopée en atomes donneurs et suivant la direction [110]. Les jauges diffusées seront de type P et orientée suivant la même direction cristallographique. Cette configuration est une bonne option pour optimiser la réponse du capteur puisque les coefficients π_{11} et π_{12} prennent des valeurs maximales. Aussi, pour cette direction cristallographique, le module de Young prend une valeur supérieure à celle de l'orientation (100).

3.2.2. Réponse électrique :

3.2.2.1 Configuration à une seule jauge :

Ces jauges seront implantées au milieu des bords de la membrane pour avoir une meilleure sensibilité. Les sensibilités des deux jauges seront égales et opposées en signe :

$$S_N = -S_P = \frac{15}{2} \pi_{44} \bar{\sigma}_l \left(\frac{a}{h}\right)^2 \quad (3.6)$$

La réponse du capteur dans ce cas est strictement linéaire et proportionnelle à la contrainte appliquée. Ce montage est le plus simple et le moins cher mais présente un inconvénient majeur. C'est la présence d'un courant inverse circulant à travers la ZCE de la jonction PN.

3.2.2.2. Configuration à deux jauges :

La sensibilité de cette configuration est :

$$S = \frac{15}{4} \pi_{44} \bar{\sigma}_l \left(\frac{a}{h}\right)^2 \quad (3.7)$$

Cette configuration fournit une sensibilité deux fois inférieure que celle du montage à une seule jauge. Ainsi que le signal utile est porté par une tension continue qui lui est beaucoup supérieure et donc toutes les fluctuations de cette dernière se retrouvent dans le signal recueilli.

Le coefficient de non linéarité est donné par :

$$\eta = \frac{V_{SL} - V_S}{V_{SL}} = 1 - \left[1 + \left(1 + \frac{R_P}{R_N} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta R_N}{R_N} + \frac{R_P}{R_N} \frac{\Delta R_P}{R_P} \right) \right]^{-1} \quad (3.8)$$

Si on remplace le rapport des résistances normale et parallèle par q et le rapport de leurs variations relatives par Δq :

$$q = \frac{R_N}{R_P} \quad (3.9)$$

$$\Delta q = \frac{\frac{\Delta R_N}{R_N}}{\frac{\Delta R_P}{R_P}} \quad (3.10)$$

La relation (3.8) devient alors :

$$\eta = 1 - \left[1 + \left(q + \frac{1}{\Delta q} \right) \left(\frac{1}{q+1} \frac{\Delta R_N}{R_N} \right) \right]^{-1} \tag{3.11}$$

Nous allons donc voir l'évolution du coefficient η en fonction de q et Δq .

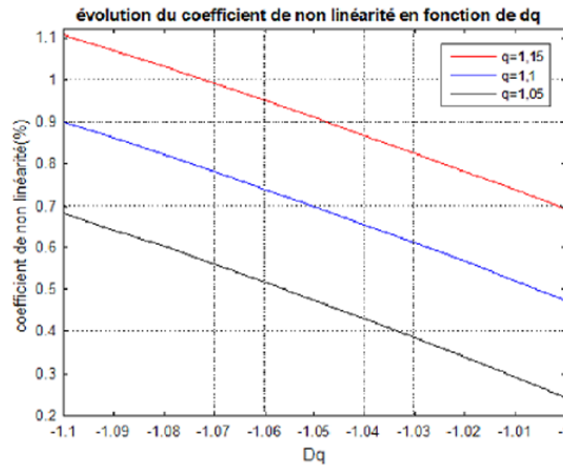
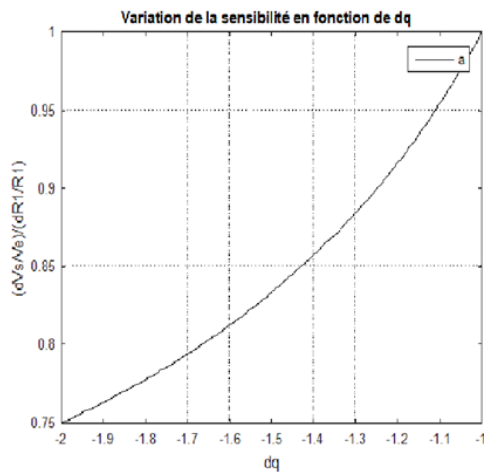


Fig.3.8: Evolution du coefficient de non linéarité en fonction de Δq [21].

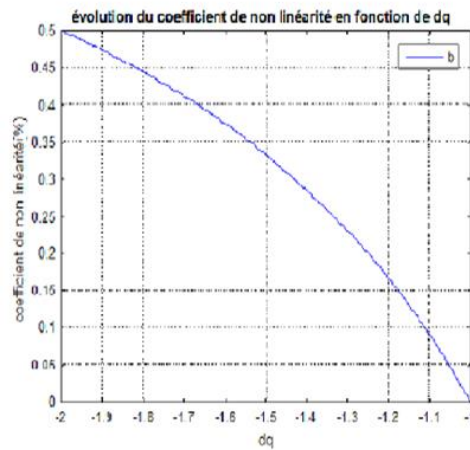
3.2.2.3. Configuration à quatre jauges montées en pont de Wheatstone :

Le coefficient de non linéarité η en fonction de q et Δq :

$$\eta = \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \left[\left(q + \frac{1}{\Delta q} \right) / 1 + q \right] \tag{3.12}$$



-a-



-b-

Fig.3.9 : -a- Sensibilité et -b- L'erreur de non linéarité du capteur en fonction de Δq [21].

Ce montage est un peu plus coûteux que les deux montages précédents, mais il permet de donner des valeurs plus précises (sensible aux faibles déformations). Sa sensibilité est deux fois élevée que celle de montage à deux jauges, et évidemment il permet une meilleure correction de température et bien sûr une suppression plus complète des efforts qu'on veut éliminer.

3.2.2.4. Conclusion :

Nous avons d'abord étudié le comportement électrique des différentes configurations possibles. Nous avons commencé par la réponse d'une seule jauge diffusée à la surface de la membrane on a vu que la variation de cette dernière est strictement linéaire. L'inconvénient de cette configuration est la présence du courant inverse circulant à travers la ZCE de la jonction PN.

Ensuite, le comportement de la deuxième configuration est celle du montage potentiométrique à deux jauges qui donne une sensibilité deux fois inférieure que celle du montage à une seule jauge, par contre il offre une meilleure immunité contre les dérives thermiques.

La troisième configuration, présente la structure du pont de Wheatstone qui fournit une sensibilité deux fois supérieure que celle du montage potentiométrique et de la bonne linéarité, une meilleure immunité contre les effets de température.

3.2.3. Réponse thermique :

3.2.3.1. Modélisation du comportement thermique des piezorésistances en silicium :

Nous modélisons le comportement thermique d'un micro-capteur de pression piézorésistif à base de monocristal de silicium. Notre formulation repose sur un modèle analytique simple et précis. Ce qui nous permet de calculer l'effet thermique sur les caractéristiques du capteur en très peu de temps et avec une très bonne précision.

Nous avons adopté deux modèles différents de mobilité des trous dans le silicium: le modèle de mobilité Arora basé sur l'interaction des porteurs avec le réseau cristallin et les impuretés ionisées, et le modèle de mobilité de Dorckel basé sur l'interaction des porteurs avec réseau cristallin, avec impuretés ionisées et sur collisions charge-charge.

Les variations relatives des jauges de type P dans les deux modèles de mobilité sont présentées par les figures (3.10) et (3.11). Ces courbes montrent que la variation relative de la résistance en fonction de la température est une parabole. Il peut donc être modélisé par l'expression (3.13) [25].

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (3.13)$$

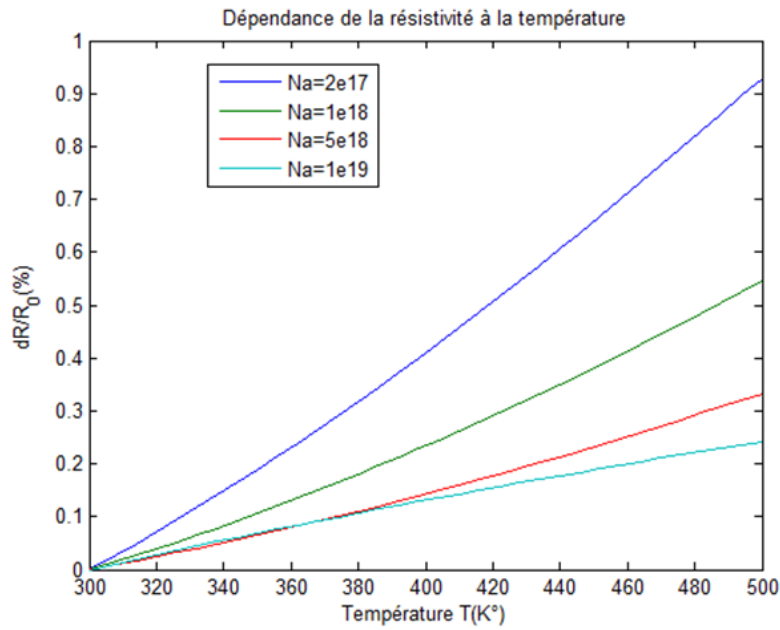


Fig.3.10: Variation de résistivité des jauges en fonction de la température (Arrora) [21].

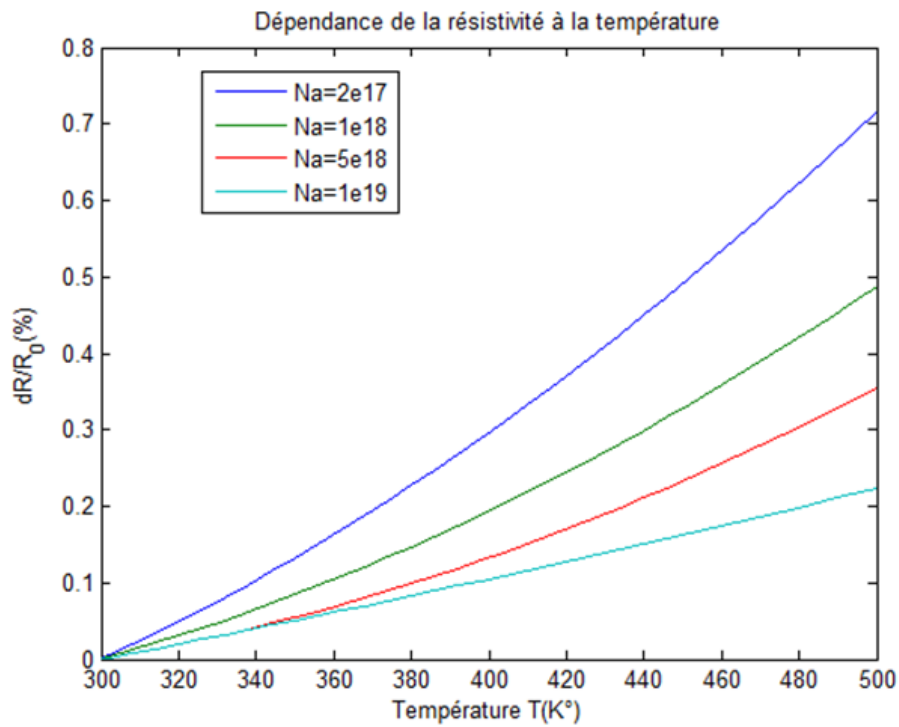


Fig. 3.11: Variation de résistivité des jauges en fonction de la température (Dorkel) [21].

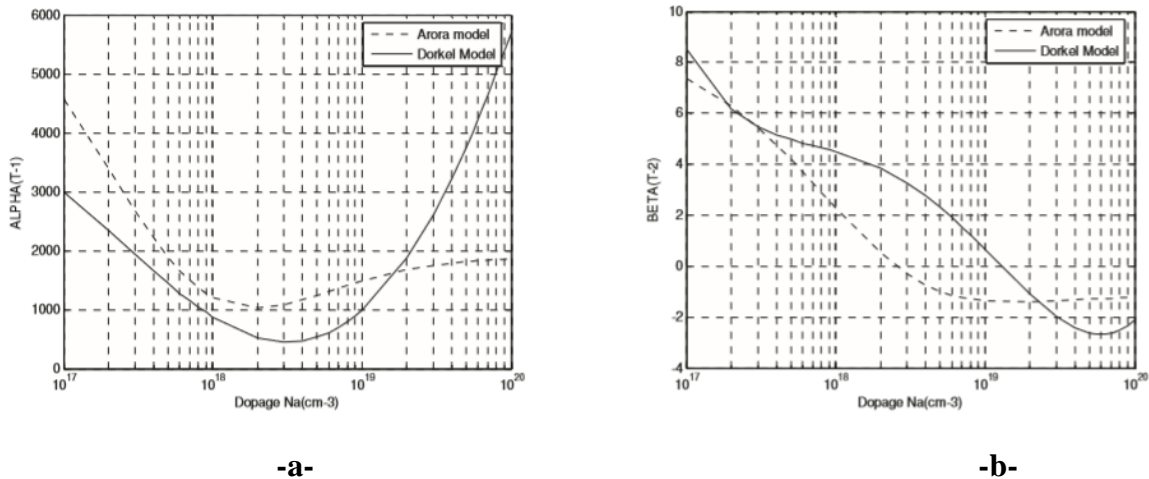


Fig.3.12: coefficient de la température en fonction du dopage suivant le modèle d'Arora et de Dorckel [25].

Les paramètres α et β peuvent être obtenus en interpolant les courbes des figures (3.10), (3.11) avec l'expression (3.13). Ensuite, α et β sont extraits des deux modèles de mobilité et tracés en fonction de la concentration de dopage sur la figure (3.12).

Nous remarquons qu'il existe une nette différence de valeurs et de manière d'évolution des coefficients obtenus à partir des deux modèles (Arora et Dorckel) en fonction de la concentration de dopage. Pour choisir le modèle approprié, nous avons comparé ces résultats théoriques avec le résultat expérimental obtenu sur des jauges à différentes concentrations de dopage.

Cette comparaison, indiquée dans le tableau (3.1), montre que le modèle de mobilité de Dorckel basé sur l'interaction des porteurs avec le réseau cristallin, avec les impuretés ionisées et sur les collisions charge-charge donne des valeurs plus proches des résultats expérimentaux que le modèle de mobilité Arora qui repose sur l'interaction des porteurs avec le réseau cristallin et les impuretés ionisées.

	$10^{17}(\text{cm}^{-3})$		$2.10^{18}(\text{cm}^{-3})$		$5.10^{18}(\text{cm}^{-3})$		$10^{19}(\text{cm}^{-3})$	
	Alpha (ppm/C)	Beta (ppm/C°)	Alpha (ppm/C°)	Beta (ppm/C°)	Alpha (ppm/C°)	Beta (ppm/C°)	Alpha (ppm/C°)	Beta (ppm/C°)
Arrora	4600	7.4	1000	0.51	1200	-0.99	1500	-1.36
Dorckel	3000	8.5	522	3.86	532	2.32	983	0.67
Expér	820	4.5	516	3.6	400	3.2	905	1.2

Tab. 3.1 : Comparaison entre les valeurs de coefficient de température théorique et expérimentales [25].

3.2.3.2. Dérive thermique de la tension de décalage :

Dans un pont de Wheatstone en équilibre parfait et au repos, la tension de sortie doit être égale à zéro. Sous l'effet de la température, les valeurs de ses quatre résistances vont changer et une tension de décalage est créée à la sortie du pont. Cette tension de décalage est la différence entre les tensions de sortie des deux demi-ponts données par (3.14) et (3.15).

$$\frac{\Delta V_{S10}}{V_e} = \frac{1}{4} [(\alpha_1 - \alpha_2)T + (\beta_1 - \beta_2)T^2] \quad (3.14)$$

$$\frac{\Delta V_{S20}}{V_e} = \frac{1}{4} [(\alpha_4 - \alpha_3) + (\beta_4 - \beta_3)T^2] \quad (3.15)$$

Les variations relatives des tensions de sortie des deux demi-ponts en fonction de la température ont une forme parabolique, comme illustré à la (Fig. 3.13).

La variation relative de la tension de sortie du pont complet au repos sera donnée par (3.16) et représentée à la (Fig. 3.13.b). Il a aussi une forme parabolique. Dans le (Tab.2.4), nous comparons les résultats de notre modélisation théorique avec ceux obtenus expérimentalement. Cette comparaison confirme la validité de la modélisation basée sur le comportement thermique au 2^{ème} degré des jauges de silicium.

$$\frac{\Delta V_{S0}}{V_e} = \frac{\Delta V_{S10}}{V_e} - \frac{\Delta V_{S20}}{V_e} \quad (3.16)$$

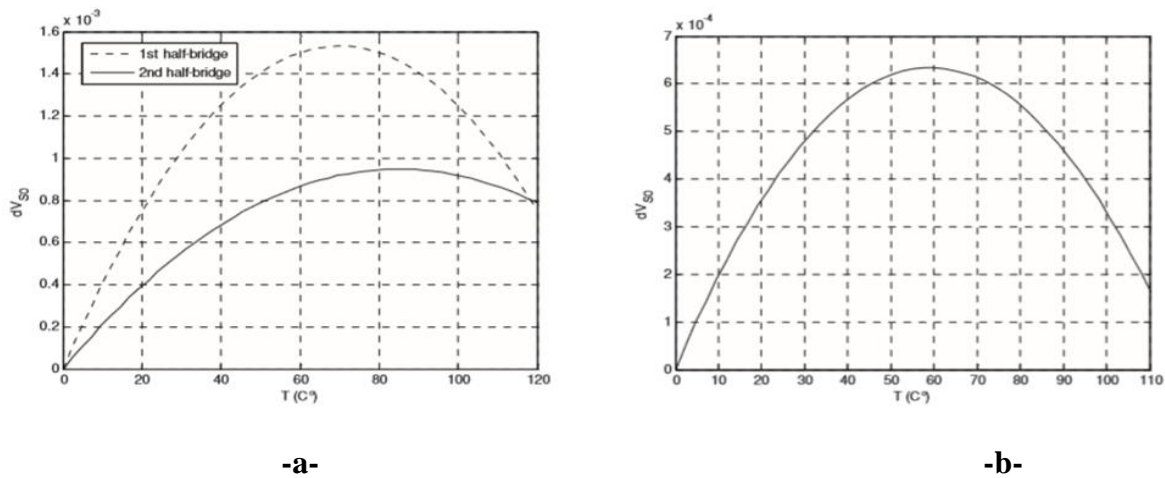


Fig. 3. 13: -a- les variations thermiques des tensions Vs des deux demi-points –b- Variation thermique de la tension de décalage du pont complet [25].

	1er demi-pont		2éme demi-pont		Pont complet	
	Tm ₁ (°C)	ΔV _{S10} (mV)	Tm ₁ (°C)	ΔV _{S20} (mV)	Tm (°C)	ΔV _{S0} (mV)
Résultats Théo.	75	1.58	83.3	0.95	60.3	0.63
Résultats Epx.	74	1.95	86	1	100	0.95

Tab.3.2 : Variations maximales, théorique et expérimentales, des tensions de décalage des deux demi-points en fonction de la température [25].

3.2.3.3. Comportement thermique du capteur sous une pression uniforme :

Si nous appliquons une pression constante et uniforme P sur la membrane, les valeurs de quatre résistances changeront et une tension de sortie sera créée à la sortie du pont. Sous l'effet de la température, cette tension variera et sa loi de variation est donnée par l'expression (3.17) qui décrit la tension de la sortie du capteur (Fig. 3.14).

$$\frac{\Delta V_e}{V_e} = \frac{\pi_{44}}{2} P \left(\frac{a}{h}\right)^2 (\bar{\sigma}_l - \bar{\sigma}_t) \tag{3.17}$$

Le terme π_{44} traduit la loi de variation des coefficients piézorésistifs en fonction de la température et de la concentration de dopage donnée par Kanda et simplifiée par Plantier [25].

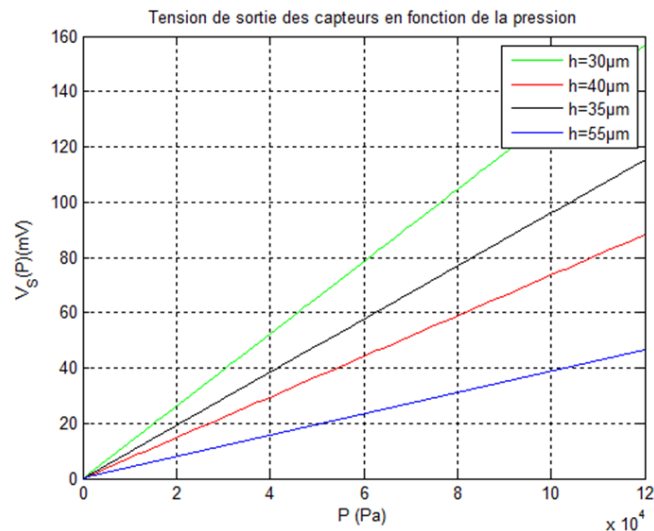


Fig.3.14 : Variation de la tension de sortie des capteurs en fonction de la pression [21].

La figure ci-dessus montre que la réponse du capteur à la pression dans la plage utilisée est linéaire. Nous avons tracé ces caractéristiques de sortie pour plusieurs valeurs de h (épaisseur de la membrane). Le capteur est d'autant plus sensible que l'épaisseur de la membrane est petite. La tension d'alimentation est de 2.5 volts.

Un autre facteur qui influe grandement sur la sensibilité des capteurs de pression piézorésistifs est la concentration de dopage. L'expression (3.18) nous permet de tracer sur la figure (3.15) l'évolution de la sensibilité en fonction de la concentration de dopage et des paramètres géométriques.

$$S(T, N_A) = \frac{\pi_{l,t}(10^{16}, 300)}{2} \left(\frac{a}{h}\right)^2 (0.216)P(N_A, 300) \quad (3.18)$$

Il est à noter que l'augmentation du dopage dégrade la sensibilité du capteur à la pression. Ainsi, on remarque une diminution d'environ 28% de la sensibilité lorsque le dopage varie de 10^{18} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3} . L'épaisseur de la membrane affecte également la sensibilité. Le capteur est plus sensible lorsque h va plus petit.

L'équation (3.19) permet également de tracer la variation de cette sensibilité en fonction de la température.

$$S(T) = \frac{\pi_{lt}(N_A, 300)}{2} \left(\frac{a}{h}\right)^2 (0.216)[1 + \gamma T] \tag{3.19}$$

Le coefficient γ qui décrit la dérivé thermique des coefficients de piézorésistivité a été déduit à partir des courbes expérimentales. Ces courbes (Fig.3.16) montrent que la sensibilité est une fonction monotone de la température et que sa valeur dépend fortement de l'épaisseur de la membrane. Plus la membrane est fine, plus le capteur est sensible à la pression.

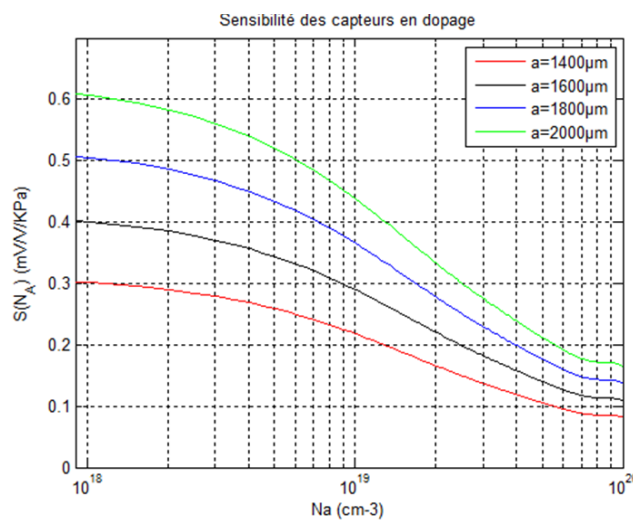


Fig.3.15 : Variation de la sensibilité en fonction du dopage [21].

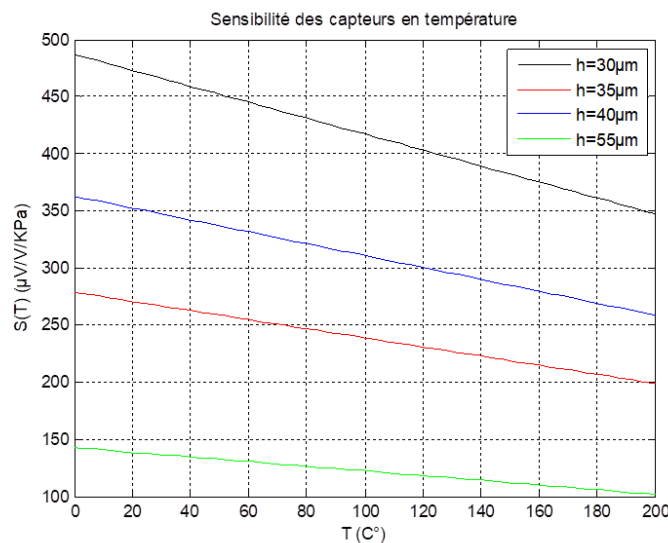


Fig.3.16 : Variation de la sensibilité en fonction de la température [21].

3.2.3.4. Conclusion :

Il est possible de modéliser avec une bonne précision le comportement thermique du micro-capteur piézorésistif en adoptant une approche simple basée sur le comportement thermique de la piezorésistances au 2eme degré et sur la dérive thermique des coefficients piézorésistifs π_{ij} .

Nous avons d'abord mis en évidence l'effet de température sur la résistivité des jauges à silicium de type P , lorsque ces dernières sont au repos, à travers deux modèles de mobilités :le modèle de mobilité Arora basé sur l'interaction des porteurs avec le réseau cristallin et les impuretés ionisées, et le modèle de mobilité de Dorckel basé sur l'interaction des porteurs avec réseau cristallin, avec impuretés ionisées et sur collisions charge-charge. L'interpolation des courbes R(T) permis d'extraire les coefficients de la température du 1er et 2ème ordre qui ont été comparé avec les résultats avec les valeurs expérimentales pour choisir le modèle le plus adapté à notre cas.

Ensuite, le comportement thermique du pont des demi-pont et du pont complet a été établi pour voir l'influence de la température sur la tension de sortie des deux demi-pont et la tension de décalage du pont.

Pour l'étude en pression, nous avons étudié le comportent du pont complet, nous avons vu la variation de la tension de sortie des capteurs en fonction de la pression, 'influence de températures et de concentration de dopage et des paramètres géométriques du capteur (coté et épaisseur) sur la sensibilité du capteur.

4.1. Introduction :

Le travail consiste à optimiser le processus de simulation et conception par une interface graphique qui va rendre ce processus plus simple et plus rapide et interactif avec l'utilisateur. Nous allons présenter notre implémentation logicielle ainsi que les résultats de simulation d'un capteur de pression dont l'étude théorique a été faite précédemment.

4.2. L'outil « Guide » de MATLAB :

Les interfaces graphiques sont appelées **GUI** pour (**G**raphical **U**ser **I**nterface). Ce sont des constructeurs d'interface graphique qui regroupe tous les outils dont le programmeur a besoin pour créer une interface graphique de façon intuitive. Il s'ouvre, quand en tapant **guide** dans le Command Window de MATLAB [26].

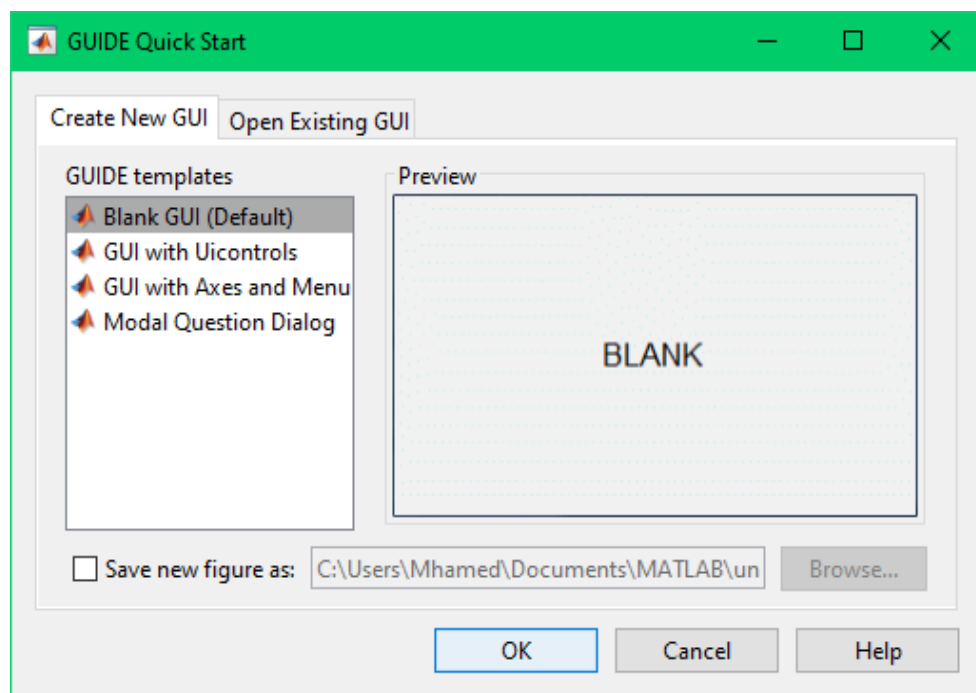


Fig.4 .1 : GUIDE Quick Start.

Le placement des objets est réalisé par sélection dans une « component palette ». Leur mise en place et leur dimensionnement se font à l'aide de la souris.

Un double-clic sur un objet permet de faire apparaître le « property inspector » où les propriétés des objets sont facilement éditables. Leurs modifications et la visualisation de ces modifications sont immédiates [26].

Une fois l'interface graphique terminée, son enregistrement donne deux fichiers portant le même nom mais dont les deux extensions sont (.fig) et (.m). Le fichier (.fig) contient la définition des objets graphiques (positions et propriétés). Ce fichier peut être ouvert ultérieurement avec le GUIDE pour modifier les objets graphiques. Le fichier (.m) contient les lignes de code qui assurent le fonctionnement de l'interface graphique (actions des objets). Ce fichier peut être édité dans le MATLAB Editor pour y ajouter des actions à la main. C'est ce fichier qui doit être lancé pour utiliser l'interface graphique.

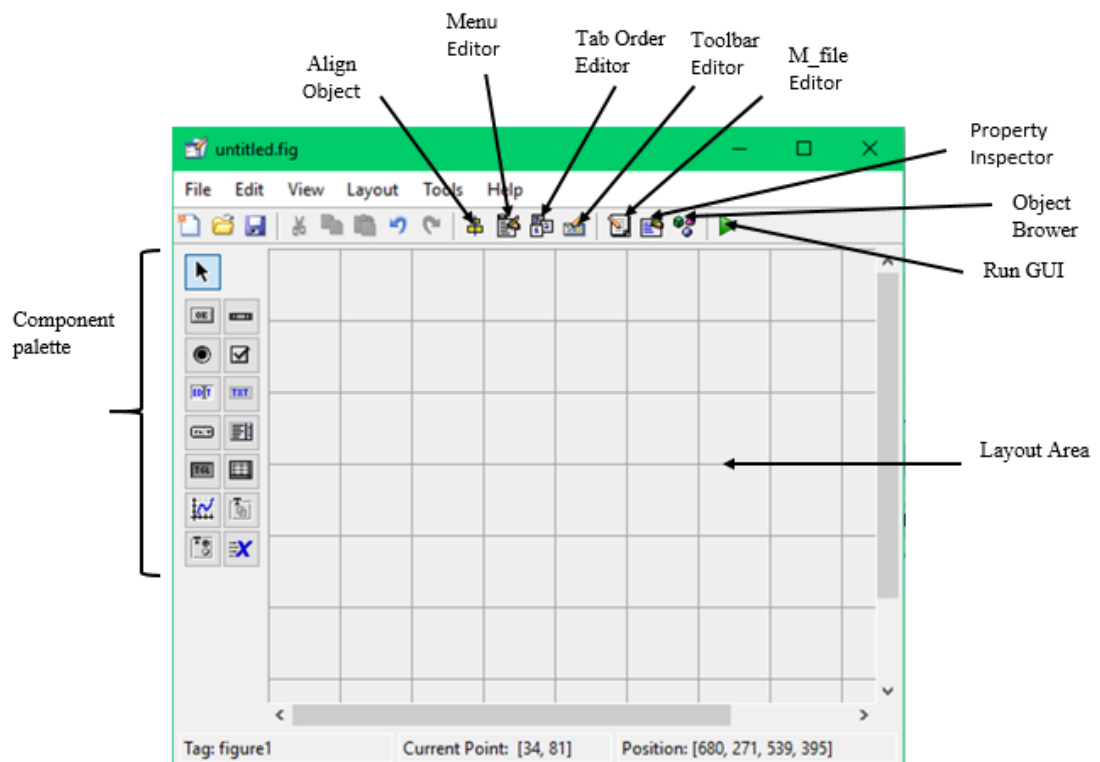


Fig.4 .2 : Fenêtre principale GUIDE.

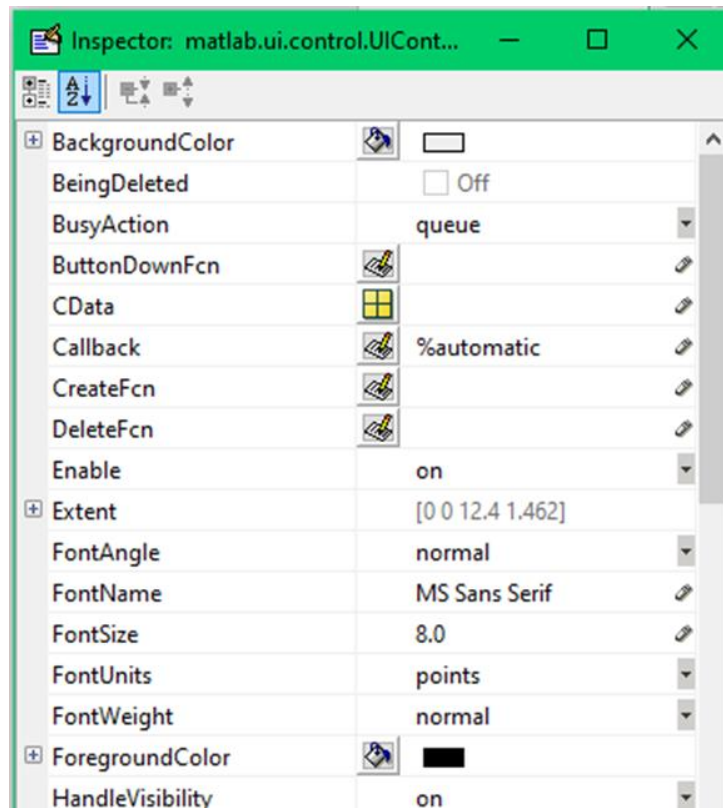
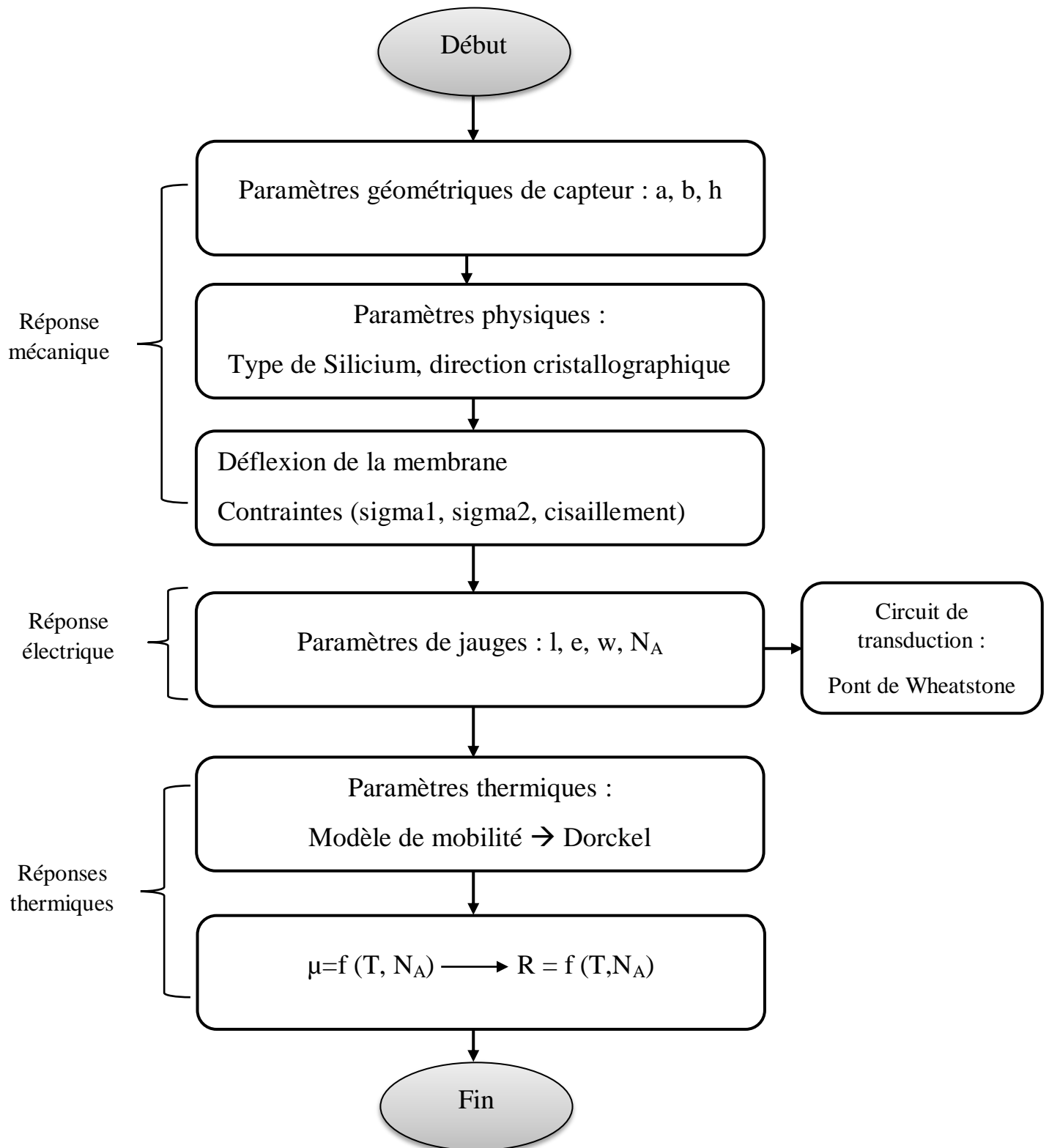


Fig.4 .3 : Property Inspector.

4.3. Organigramme de l'interface :



4.4. Présentation de l'interface :

The screenshot shows a software interface for configuring a sensor simulation. The interface is divided into several sections:

- Top Section:** Contains dropdown menus for "Type de silicium" (Silicon type) and "Direction cristallographique" (Crystallographic direction).
- Parameters de capteur (Sensor Parameters):** Includes input fields for "a(n)", "b(n)", and "h(n)".
- Paramètres de maillage (Meshing Parameters):** Includes a "Générateur maillage" (Mesh generator) button.
- Conditions externes (External Conditions):** Includes input fields for "Valeur de la Température" (Temperature value) and "Valeur de la Pression(Pa)" (Pressure value).
- Paramètres de gauges (Gauge Parameters):** Includes a "Afficher la valeur" (Show value) button.
- Graphique (Graph):** A 3D surface plot showing a complex, multi-lobed shape. The axes range from -1 to 1. The plot is titled "Calculer l'une l'autre graphique pour la simulation et la conception d'un capteur de pression piézoélectrique".
- Calculs (Calculations):** Includes a "Calculer" (Calculate) button and a section for "Caractéristiques de sortie" (Output characteristics) with input fields for "Valeur(Pa)", "Valeur(V)", and "Valeur(A)".

Annotations with arrows point to various parts of the interface:

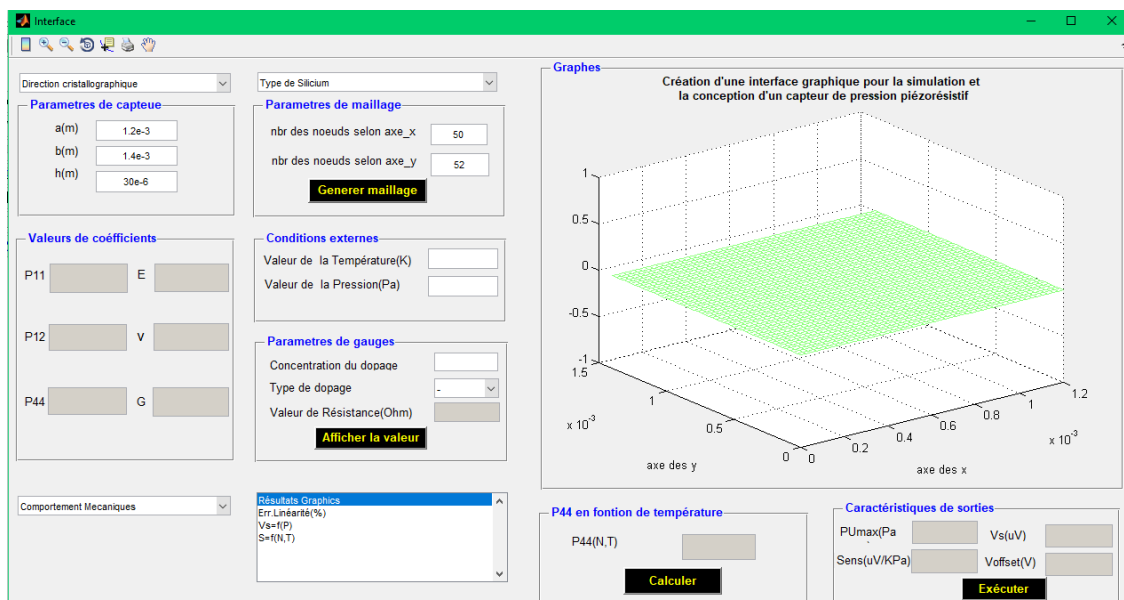
- Ajouter les paramètres de capteur** (Add sensor parameters)
- Définir le nbr de nœuds pour tracer le maillage** (Define the number of nodes for meshing)
- L'affichage de valeurs coefficients** (Display of coefficient values)
- Conditions externes** (External conditions)
- Ajouter les paramètres de la gauge** (Add gauge parameters)
- Résultats graphique de comportement mécanique** (Mechanical behavior graphical results)
- Résultats graphique de comportement électrique** (Electrical behavior graphical results)
- La sélection de direction cristallographique** (Selection of crystallographic direction)
- La sélection de type de silicium** (Selection of silicon type)
- Le calcul de coefficient p_{14}** (Calculation of coefficient p_{14})
- Le calcul de différentes caractéristiques de sorties** (Calculation of different output characteristics)
- Endroit pour l'affichage des résultats** (Place for displaying results)

4.4.1. Les boutons :

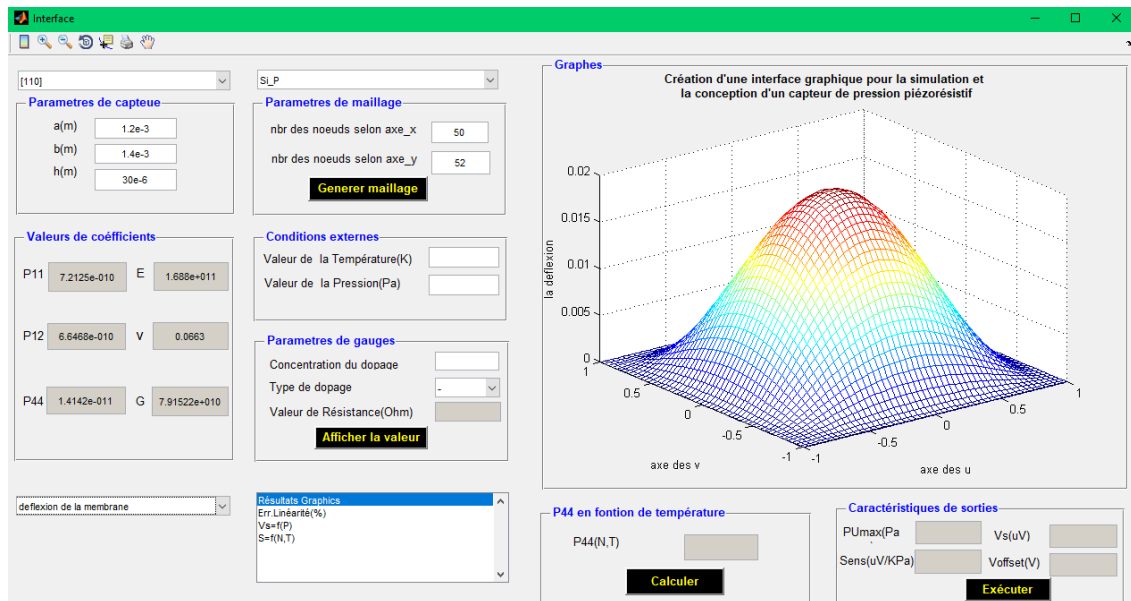
- **Bouton 'Générer maillage'** : pour tracer le maillage de la membrane.
- **Bouton 'Afficher la valeur'** : pour afficher la valeur de la résistance calculable.
- **Bouton 'Calculer'** : sert à calculer la valeur de coefficient P_{44} en fonction de température et le dopage.
- **Bouton 'Exécuter'** : pour afficher les valeurs de sorties calculables.

4.5. Résultats :

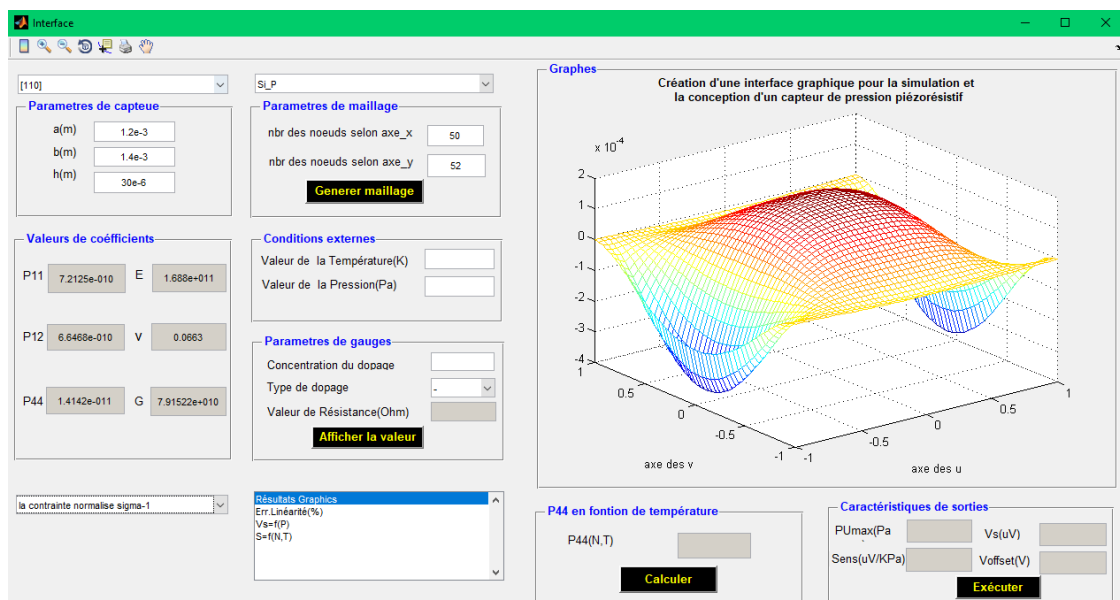
4.5.1. Génération de maillage :



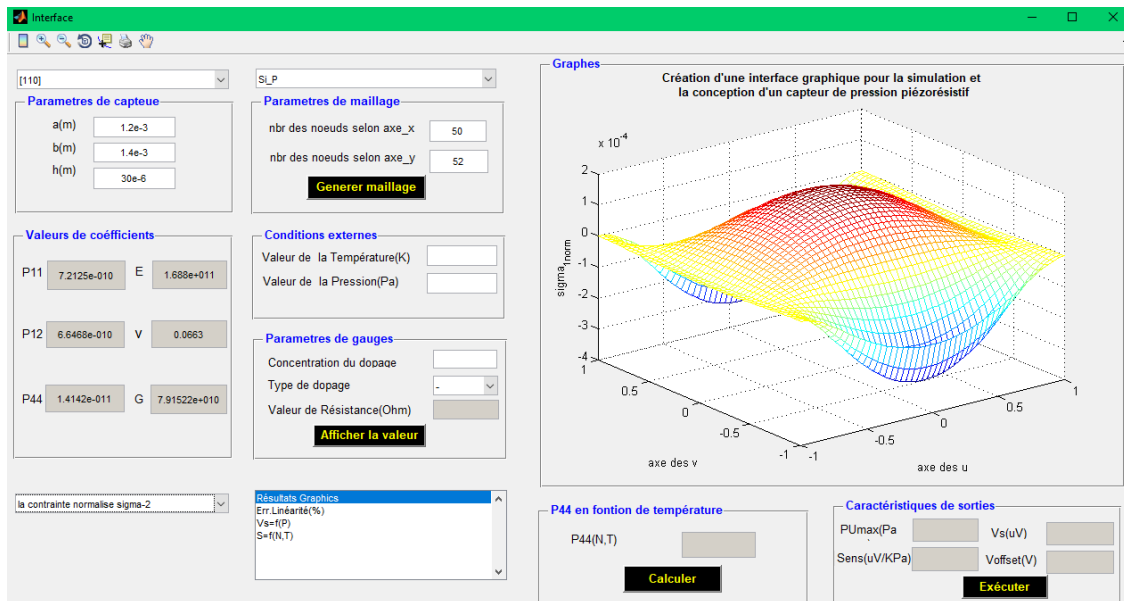
4.5.2. Déflexion de la membrane :



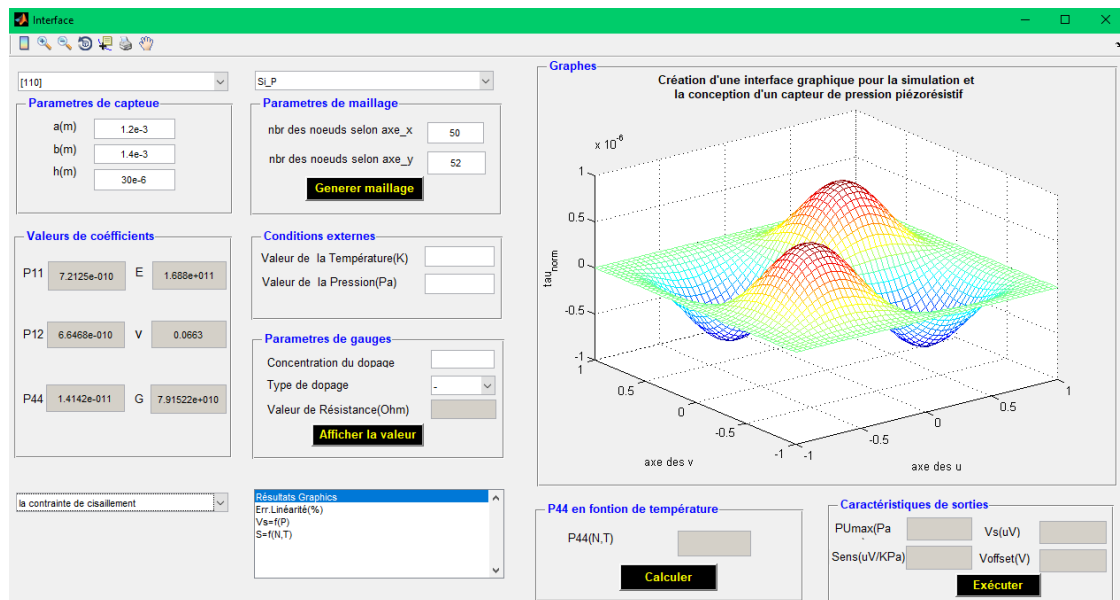
4.5.3. La contrainte normalisé sigma-1 :



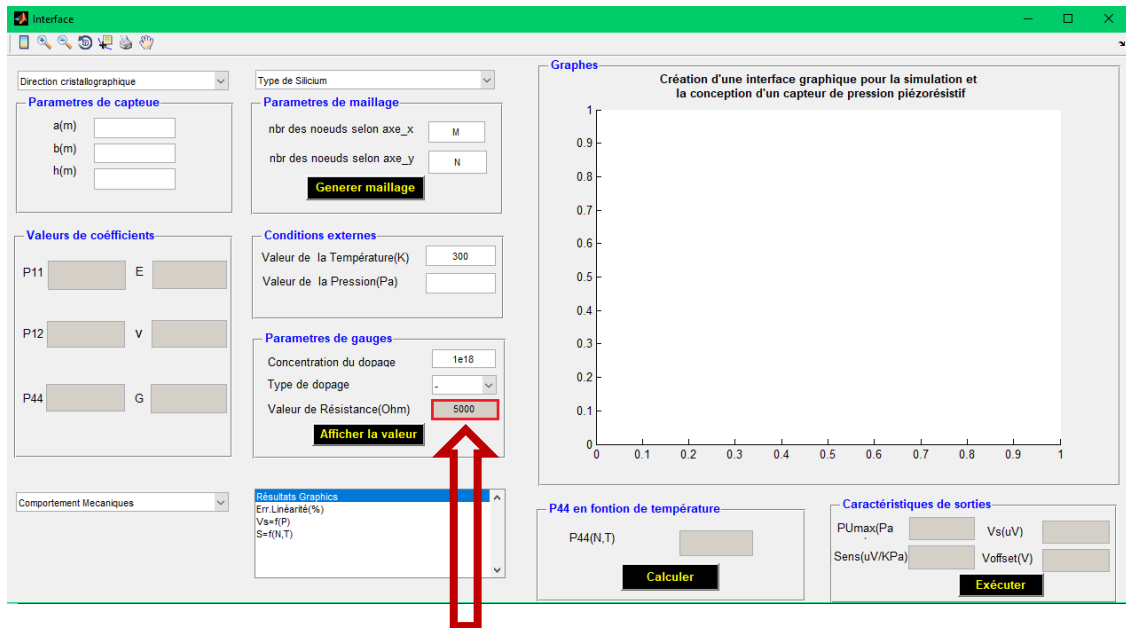
4.5.4. La contrainte normalisé sigma-2 :



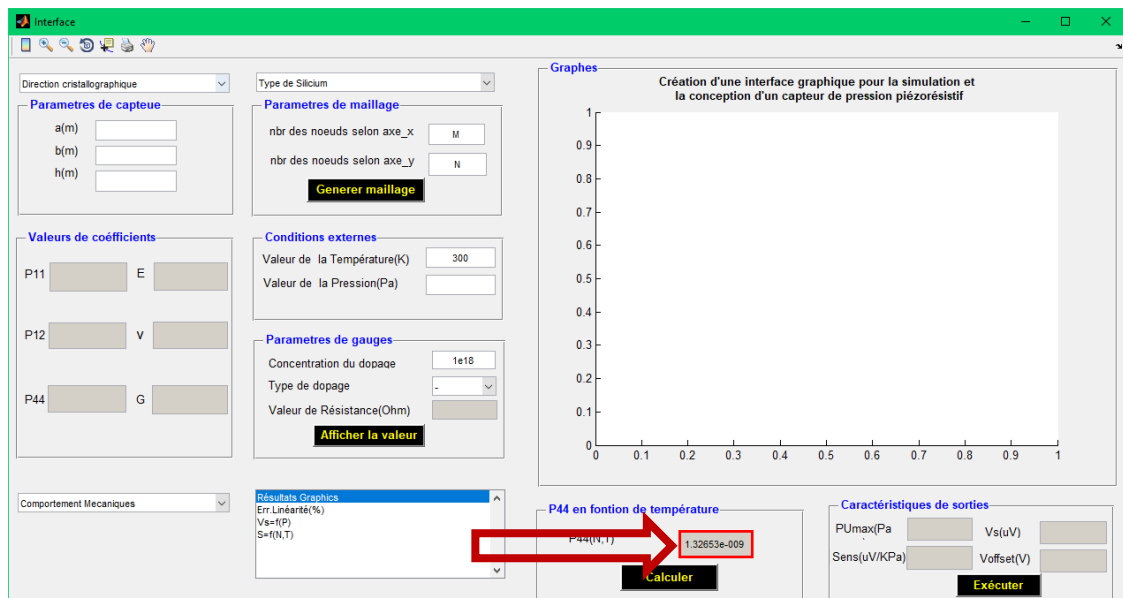
4.5.5. La contrainte de cisaillement :



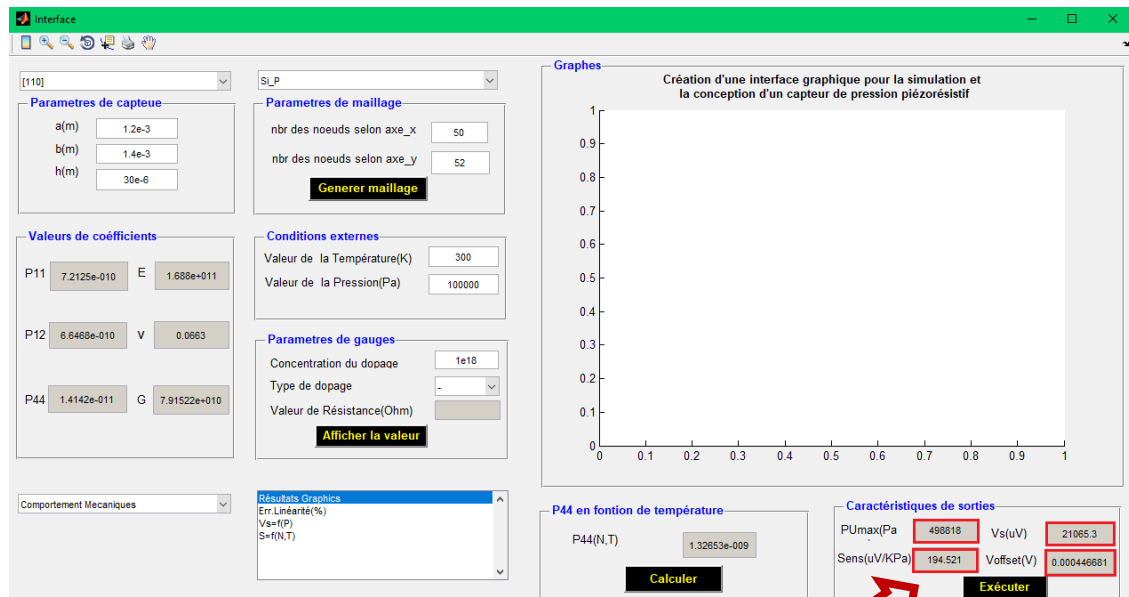
4.5.6. La valeur de la Résistance :



4.5.7. La valeur de P₄₄ en fonction de la température:

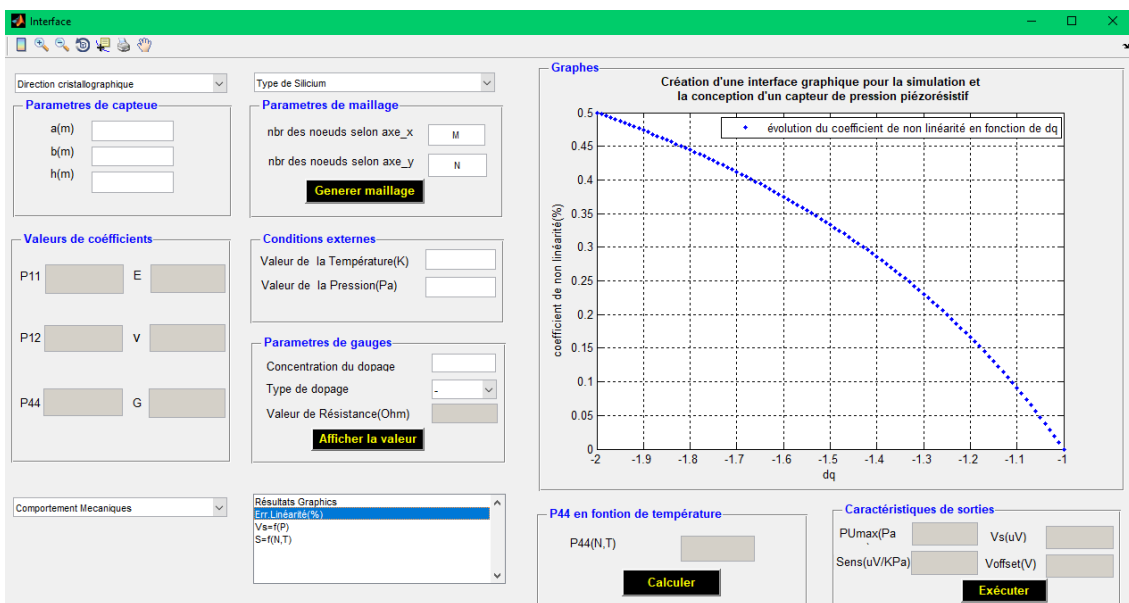


4.5.8. Les valeurs de caractéristique de sorties:

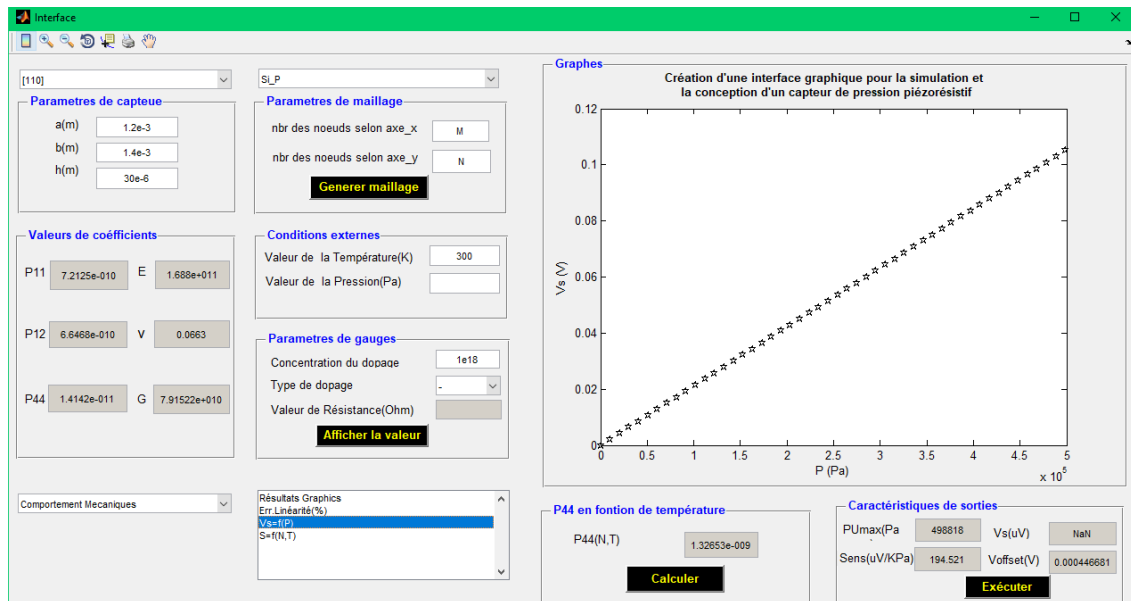


4.5.9. Les résultats graphiques :

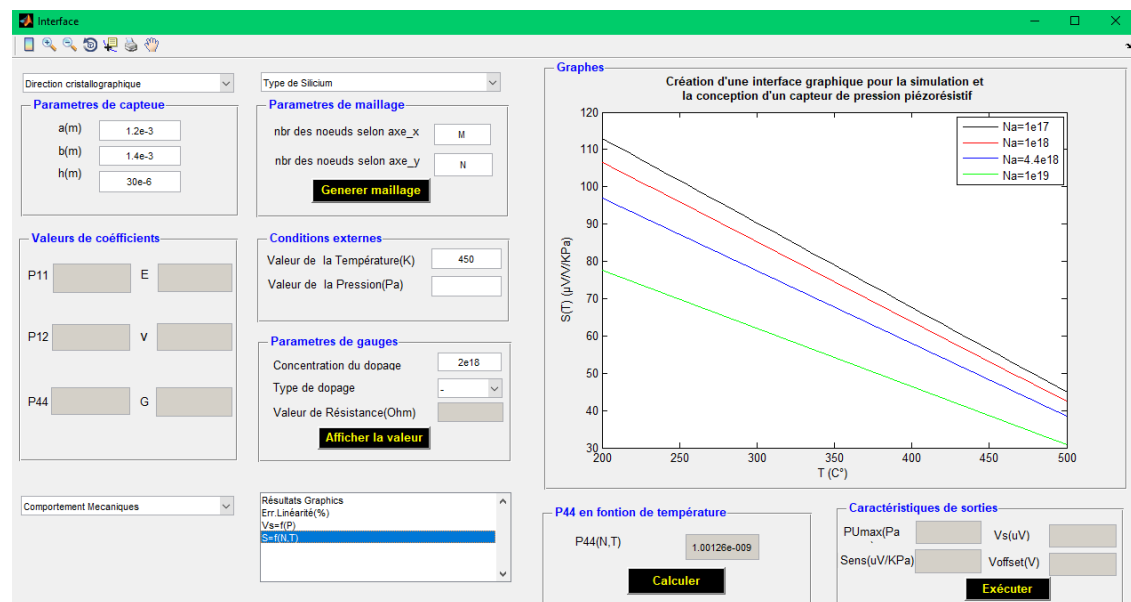
4.5.9.1. L'erreur de linéarité :



4.5.9.2. La tension de sortie en fonction de pression :



4.5.9.3. La sensibilité en fonction de la température et dopage :



4.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté notre interface graphique. Dans cette interface on présente les différents résultats de simulation de notre capteur de pression piézorésistif (la déflexion, les contraintes, etc...). Ensuite, on calcule la valeur de résistance et le coefficient de piézorésistivité π_{44} et les valeurs de caractéristique de sorties (pression maximale d'utilisation, sensibilité, tension de sortie et tension d'offset). Finalement on trace la tension de sortie en fonction de pression, la sensibilité en fonction de la température pour différents concentration du dopage et l'erreur de linéarité.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est de concevoir une interface graphique pour la simulation d'un capteur de pression piézorésistif.

Dans le premier chapitre, Nous avons présenté différents outils de conception des MEMS et leurs intérêts suivant leurs types de modélisation (Elément fini, Analytique, Descriptive) ainsi que le principe de chaque méthode leurs avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre a traité la modélisation mécanique, électrique et thermique de notre micro capteur. Dans l'étude mécanique, On a étudié le comportement mécanique en utilisant l'équation différentielle régissant le mouvement d'une membrane soumise à une pression. Pour la réponse électrique, nous avons établi la variation relative de la résistivité des jauges en fonction des contraintes et des coefficients de piézorésistivité. Cette relation nous a permis ensuite d'étudier la réponse électrique du capteur à la pression d'une, de deux ou quatre jauges. La dernière partie du deuxième chapitre concerne influence de la température sur la réponse du capteur.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats de simulation. La première partie nous avons présenté la déflexion de la membrane la répartition des contraintes. En traçant la distribution de ses contraintes, nous avons remarqué que les maximums de ces dernières sont situés aux bords de la membrane parfaitement encastré. Ceci nous donne déjà une idée précise sur l'emplacement des jauges sur la membrane à fin de maximiser leurs sensibilités à la pression.

Le Silicium est un matériau anisotropique, nous avons consacré une partie à l'étude de cette propriété très un importante. Les jauges de type P et orientée suivant la direction [110] présentent les meilleurs performances puisque les coefficients π_{11} et π_{12} prennent des valeurs maximales. Aussi, pour cette direction cristallographique, le module de Young prend une valeur supérieure à celle de l'orientation (100).

Dans la deuxième partie, pour les trois configurations nous avons calculé la sensibilité la comparaison des résultats obtenus par les trois cas de figures nous a permis de choisir la structure qui présente les meilleures caractéristiques de sortie, à savoir, la configuration à quatre jauges montée en pont de Wheatstone. Cette configuration présente, en plus de grande sensibilité et bonne linéarité, une meilleure immunité contre les effets de la température.

La troisième partie concerne l'étude de l'influence de la température sur les caractéristiques de la sortie du capteur au repos et en pression. Nous avons d'abord mis en évidence l'effet de température sur la résistivité des jauges à silicium de type P, lorsque ces dernières sont au repos, à travers deux modèles de mobilités : le modèle de mobilité Arora et Dorckel. L'interpolation des courbes $R(T)$ permis d'extraire les coefficients de la température

Conclusion générale

du 1er et 2ème ordre qui ont été comparé avec les résultats avec les valeurs expérimentales ,ceci nous a conduit à adopter le modèle Dorkel qui montre que le coefficient de température α et β prennent des valeurs minimales dans la plage de dopage comprise entre 10^{18} cm^{-3} et $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$. L'intérêt de cette propriété peut être de réaliser des piezorésistances à variation thermique minimale.

Pour l'étude en pression, nous avons étudié le comportement du pont complet, nous avons vu la variation de la tension de sortie des capteurs en fonction de la pression, l'influence de températures et de concentration de dopage et des paramètres géométriques du capteur (coté et épaisseur) sur la sensibilité du capteur.

Finalement, dans le quatrième nous avons conçu l'interface graphique. Nous avons présenté notre implémentation logicielle ainsi que les différents résultats de simulation du capteur. Ensuite on a calculé la valeur de résistance et le coefficient de piézorésistivité π_{44} et les valeurs de caractéristique de sorties (pression maximale d'utilisation, sensibilité, tension de sortie et tension d'offset). finalement on a tracé la tension de sortie en fonction de pression, la sensibilité en fonction de la température pour différents concentration du dopage et l'erreur de linéarité.

Annexe A : Cosinus directeurs de la transformation d'axes

On définit initialement un repère orthonormé (Oxyz) dont les axes sont liés aux directions [100] du cristal de silicium. Pour pouvoir se placer dans n'importe quel plan et direction cristallographique, on fait subir à notre repère une série de rotations autour de ses axes.

Les séries de rotations sont définies comme suit :

1. Une rotation d'un angle θ autour de l'axe (Oy) dont la matrice de rotation est donnée comme suite.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

2. Une rotation d'un angle φ autour de l'axe (Oz) dont la matrice de rotation est donnée comme suite

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

3. Une deuxième rotation d'un angle ψ autour de l'axe (Oz) qui permet de se placer dans la direction cristallographique souhaitée. Les deux premières rotations nous permettent de se trouver le plan souhaité.

La matrice de transformation globale est une superposition (multiplication) des trois matrices de rotation :

$$\begin{pmatrix} c(\varphi) c(\theta) c(\psi) - s(\varphi) s(\psi) & s(\varphi) c(\theta) c(\psi) + c(\varphi) s(\psi) & -c(\psi) s(\theta) \\ c(\varphi) c(\theta) s(\psi) - s(\varphi) c(\psi) & c(\varphi) c(\psi) - s(\varphi) c(\theta) s(\psi) & +s(\psi) s(\theta) \\ c(\varphi) s(\theta) & s(\varphi) s(\theta) & c(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Les coordonnées du point dans le nouveau repère (Ox'y'z') s'obtiennent par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Où

$$a_{11} = l_1 = c(\varphi) c(\theta) c(\psi) - s(\varphi) s(\psi)$$

$$a_{12} = l_2 = c(\varphi) c(\theta) s(\psi) - s(\varphi) c(\psi)$$

$$a_{13} = l_3 = c(\varphi) s(\theta)$$

$$a_{21} = m_1 = s(\varphi) c(\theta) c(\psi) + c(\varphi) s(\psi)$$

$$a_{22} = m_2 = c(\varphi) c(\psi) - s(\varphi) c(\theta) s(\psi)$$

$$a_{23} = m_3 = s(\varphi) s(\theta)$$

$$a_{31} = n_1 = -c(\psi) s(\theta)$$

$$a_{32} = n_2 = +s(\psi) s(\theta)$$

$$a_{33} = n_3 = c(\theta)$$

Annexe B : Calcul des constantes mécaniques du Silicium

Sachant que les modules d'Young, de Coulomb et le coefficient de Poisson se définissent respectivement, à partir des valeurs des coefficients du tenseur d'élasticité, par les relations suivantes :

$$E_i = \frac{1}{s'_{ii}} \quad (\text{B.1})$$

$$\nu_{ji} = -\frac{s'_{ji}}{s'_{ii}} \quad (\text{B.2})$$

$$C = -\frac{1}{s'_{44}} \quad (\text{B.3})$$

Les expressions des coefficients d'élasticités S'_{11} , S'_{12} et S'_{44} pour n'importe quelle direction cristallographique s'obtiennent par l'application de la règle de transformation tensorielle suivante :

$$s'_{ij} = a_{im}a_{jn}a_{ko}a_{lp} \cdot S_{mnop} \quad (\text{B.4})$$

Où S_{mnop} est le tenseur des coefficients d'élasticité exprimé dans le repère (Oxyz) lié aux directions $\langle 100 \rangle$. Du fait de la symétrie cubique du Silicium, les composantes non nulles de ce tenseur se réduisent en trois termes seulement S_{11} , S_{12} et S_{44} .

$$s'_{11} = s_{11} - 2(s_{11} - s_{12} - \frac{s_{44}}{2})(l^2_1 m^2_1 + m^2_1 n^2_1 + l^2_1 n^2_1) \quad (\text{B.5})$$

$$s'_{12} = s_{12} + (s_{11} - s_{12} - \frac{s_{44}}{2})(l^2_1 l^2_2 + m^2_1 m^2_2 + n^2_1 n^2_2) \quad (\text{B.6})$$

$$s'_{44} = 2(s_{11} - s_{12} - \frac{s_{44}}{2})(l^2_3 l^2_2 + m^2_3 m^2_2 + n^2_3 n^2_2) \quad (\text{B.7})$$

On peut ainsi calculer les paramètres mécaniques du Si pour n'importe quelle direction et plan cristallographique.

Liste des figures

Fig.1.1: Un exemple de champ de contraintes calculé dans une simulation par éléments finis.....	05
Fig.2.1: Principe d'un capteur de pression piézorésistif à membrane.....	12
Fig.2.2: Schéma en coupe d'un capteur piézorésistif à membrane de type Silicium sur un isolant.....	12
Fig.2.3: Vue en coupe et de dessus de la membrane.....	13
Fig.2.4: Déflexion de la membrane lors de l'application de la pression.....	14
Fig.2.5: courbe d'élasticité.....	15
Fig.2.6: Représentation schématique de la disposition de la jauge sur la membrane.....	18
Fig.2.7: Représentation schématique de la disposition de deux jauges sur la membrane.....	19
Fig.2.8: Représentation schématique de la disposition de quatre jauges sur la membrane.....	20
Fig.3.1: déflexion de la membrane –a- Représentation en 3-D et –b- Représentation de la déflexion $W_N(u)$ paramétré en v	23
Fig.3.2: -a- Contrainte normale σ_1 et –b-Contrainte de cisaillement τ_6	25
Fig.3.3: La variation de P_{Umax} par rapport aux paramètres géométriques de la membrane.....	26
Fig.3.4: Module de Young du silicium (100) en fonction des directions cristallographiques.....	27
Fig.3.5: Coefficients de Poisson du silicium (100) en fonction des directions cristallographiques.....	27
Fig.3.6: Courbe de variation des coefficients de piézorésistivité du Si-N (100) en fonction des directions cristallographiques.....	29

Liste des figures

Fig.3.7: Courbe de variation des coefficients de piézorésistivité du Si-P (100) en fonction des directions cristallographiques.....	29
3.8: Evolution du coefficient de non linéarité en fonction de Δq	32
Fig.3.9: -a- Sensibilité et -b- L'erreur de non linéarité du capteur en fonction de Δq	32
Fig.3.10: Variation relative de résistivité des jauges en fonction de la température pour différentes valeurs du dopage (modèle de d'Arora).....	35
Fig.3.11: Variation relative de résistivité des jauges en fonction de la température pour différentes valeurs du dopage (modèle de Dorkel).....	35
Fig.3.12: coefficient de la température en fonction du dopage suivant le modèle d'Arora et de Dorckel.....	36
Fig.3.13: -a- les variations thermiques des tensions V_s des deux demi-pont -b- Variation thermique de la tension de décalage du pont complet.....	38
Fig.3.14: Variation de la tension de sortie des capteurs en fonction de la pression.....	39
Fig.3.15: Variation de la sensibilité en fonction du dopage.....	40
Fig.3.16: Variation de la sensibilité en fonction des capteurs en fonction de la température.....	40
Fig.4.1: GUIDE Quick Start.....	42
Fig.4.2: Fenêtre principale GUIDE.....	43
Fig.4.3: Property Inspector.....	44

Liste des tableaux

Tab.2.1 : Valeurs des coefficients d'élasticité du silicium <100>.....	17
Tab.3.1 : Comparaison entre les valeurs de coefficient de température théorique et expérimentales.....	37
Tab.3.2 : Variations maximales, théorique et expérimentales, des tensions de décalage des deux demi-points en fonction de la température.....	38

Glossaire

a : largeur de la membrane rectangulaire.

b : longueur de la membrane rectangulaire.

D : coefficient de rigidité.

G : module de Coulomb.

h : épaisseur de la membrane.

G : module de Coulomb.

P : pression.

P_{\max} : pression maximale admissible.

$P_{U\max}$: pression maximale d'utilisation.

$P(N, T)$: facteur de multiplication des coefficients de piézorésistivité en fonction de la température et du dopage.

R_0 : valeur de résistance au repos.

R_N : valeur de la résistance des jauges normales.

R_p : valeur de la résistance des jauges normales.

S : sensibilité du capteur.

SC : semi-conducteur.

S_{ij} : tenseur d'élasticité.

S_N : sensibilité des jauges normales.

S_p : sensibilité des jauges parallèle.

Si-N : silicium de type N.

Si-P : silicium de type P.

T : température.

u, v : coordonnées cartésiennes normalisées.

Glossaire

V_e : tension d'alimentation.

V_{S0} : tension d'offset.

w_0 : déflexion de la membrane au centre.

$w(x,y)$: déformation de la membrane

$W(u,v)$: déformation normalisée de la membrane.

Y : module de Young.

α : coefficient de température du 1^{er} ordre.

α_{Si} : coefficient d'anisotropie du silicium.

β : coefficient de température du 2^{ème} ordre.

γ : facteur de dérivé thermique des coefficient de piézorésistivité.

ΔR : variation de la résistance des jauges.

ΔV_S : variation de la tension de sortie.

ΔV_{S0} : variation de tension d'offset.

ν : coefficient de poisson.

π_{11} : coefficient de piézorésistivité longitudinale.

π_{12} : coefficient de piézorésistivité transversale.

π_{44} : coefficient de piézorésistivité cisaillement.

π_t : coefficient de piézorésistivité longitudinale.

π_l : coefficient de piézorésistivité transversale.

ρ : résistivité électrique.

ρ_0 : résistivité électrique au repos.

σ : contrainte mécanique.

σ_e : contrainte de limite d'élasticité.

Glossaire

σ_l : contrainte de longitudinale.

σ_t : contrainte de transversale.

θ, φ, ψ : angle d'Euler.

Bibliographie

- [1] **Lingfei ZHOU**, Modélisation VHDL-AMS multi-domaines de structures intelligentes, autonomes et distribuées à base de MEMS, thèse Docteur de l'Université Louis Pasteur - Strasbourg I, novembre 2007.
- [2] **Lionel GENDRE**, Introduction à la simulation par éléments finis, école normale supérieure Paris Saclay, Edité le 10/01/2013.
- [3] **Y SAYAD**, La modélisation des plaques de formes géométriques irrégulières par la méthode des éléments finis, Université Biskra Année 2012.
- [4] **TERRIAULT Patrick**, modélisation par éléments finis du comportement thermomécanique de composantes en alliage a mémoire de forme, Université Montréal, Décembre 1997.
- [5] **DEGHBODJ Samir**, Polycopie de cours méthode des éléments finis, Université Larbi Tébessa-Tébessa Année 2017-2018
- [6] <https://www.ec2-modelisation.fr/domaines/structure> .
- [7] **Sylvaine Muratet**, Conception, caractérisation et modélisation : fiabilité prédictive de MEMS à actionnement électrothermique. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2005.
- [8] **V Luboz**, Les différentes formes de modélisation physique, Année2003.
- [9] **R. Gicquel**, Modèles numériques et Environnements de Modélisation : des outils pour mobiliser efficacement les connaissances scientifiques.
- [10] **BOURAADA Brahim, BOUBETTACHE Hichem**, Etude de la propriété physique et mécanique d'un micro membranes de silicium (Application au capteur de pression), mémoire de master, 2014.
- [11] **SNAIDERO Sébastien** , Modélisation multidisciplinaire VHDL-AMS de systèmes complexes.
- [12] **KEMOUCHE Salah**, Simulation thermomécanique de capteurs de pression au silicium pour des applications biomédicales, mémoire de magister, 2014.
- [13] **LAOUF Islam**, Etude et simulation d'un capteur de pression capacitif, mémoire de master, 2016.

Bibliographie

- [14] **Christophe MALHAIRE**, Caractérisation et modélisation de micro transducteurs de pression à hautes performances intégrés sur silicium, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, Année 1998.
- [15] **F. KERROUR, F. HOBAR**, Modélisation d'un capteur de pression capacitive au silicium de formes carrée et rectangulaire, 2008.
- [16] **Merabet Khalil**, Étude et Simulation d'un capteur de pression capacitif au Silicium, mémoire de magister, 2010.
- [17] **BELAIDI ANOUAR, DOUCH SALAH**, **Contribution** à la conception et modélisation d'un micro pompe une application médicale, mémoire de master, 2017.
- [18] **Christophe Plantier**, Etude de faisabilité de capteurs de pression piézorésistifs à jauges en polycristallin, Thèse de doctorat, Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes du CNRS, 1992.
- [19] **BENICHOU ABDELKADER**, Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique triaxial, mémoire de magister, 2012.
- [20] **Jauge de déformation Source :**
<http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72842559>.
- [21] **OTMANI Redouane**, Etude et conception d'un capteur de pression piézorésistif à base de silicium monocristallin, Mémoire de magistère, 2009.
- [22] **ANGELLIER Nicolas**, Etat d'autocontrainte des grilles de tensegrite vers l'identification sous sollicitation naturelle, Université Montpellier, 2008.
- [23] **William Thomson**, Notion d'extensomètre par jauges à résistance électrique.
- [24] **Michal Olszacki**. Modélisation et optimisation de capteurs de pression piézorésistif. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2009. Français. <tel-00432886>
- [25] **R. Otmani, N. Benmoussa, B. Benyoucef**, The thermal drift characteristics of piezoresistive pressure sensor, Article in Physics Procedia, 2011.
- [26] **Jérôme Briot**, Introduction à la programmation des interfaces graphiques, Date de publication : 01/06/2007.

ملخص:

يتضمن تصميم أي جهاز أو نظام عملية طويلة من الدراسة الأولية، والنمذجة الرياضية، ومحاكاة النماذج المقترحة، وأخيرا التحقق التجريبي للنموذج. نقترح ، في هذه الدراسة ، إنشاء واجهة لتصميم مستشعر الضغط. يجب أن تكون هذه الواجهة قادرة على توفير خصائص الإخراج بناءً على المعلمات الهندسية والفيزيائية والبلورية. لتنفيذ هذا العمل ، يجب إجراء دراسة نمذجة ودراسة لمعرفة وقياس تأثير كل معامل إدخال على خصائص المستشعر.

الكلمات المفتاحية: المستشعرات، السيليكون، الحساسية، التأثير الحراري، الاتجاه البلوري، الواجهة الرسومية، ماتلاب.

Abstract:

The design of any device or system involves a long process of preliminary study, mathematical modeling, simulation of proposed models, and finally, the experimental validation of the model. We propose, in this study, to create an interface for the design of micro-pressure sensor. This interface must be able to provide output characteristics based on geometric, physical and crystallographic parameters. To carry out this work, a modeling and conceptual study must be done to know and quantify the effect of each of the input parameters on the characteristics of the sensor outputs.

Key words: Piezoresistive pressure sensor, Silicon, Sensitivity, Thermal drift, Doping, Crystallographic direction, Graphical interface, Matlab.

Résumé :

La conception de n'importe quel dispositif ou système passe par un long travail d'étude préliminaire, de modélisation mathématique, de simulation des modèles proposés, pour enfin, arriver à la validation expérimentale du modèle. Nous nous proposons, dans ce sujet de fin d'étude, de créer une interface d'aide à la décision pour la conception de micro-capteur de pression. Cette interface doit être capable fournir des caractéristiques de sorties en fonction des paramètres géométriques, physiques et cristallographique. Pour mener ce travail, une étude modélisationnelle et conceptuelle doit être faite pour connaître et quantifier l'effet de chacun des paramètres d'entrées sur les caractéristiques des sorties du capteur.

Mots clés : Capteur de pression piézorésistif, Silicium, Sensibilité, Dérive thermique, Dopage, Direction cristallographique, Interface graphique, Matlab.