

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de l'ingénieur
Département d'Electronique

N° d'ordre :

N° de série :

Thèse
Présentée à l'université de Constantine

Pour l'obtention du :
Diplôme de Doctorat en Sciences
Option : Electronique

Par

Ras lain Mohamed

Contribution à l'identification des paramètres de non idéalité
dans les capteurs de pression piézorésistifs au Silicium

Soutenu le 06/07/2009 devant le jury d'examen:

<u>Président</u> :	A. Benghalia	Professeur à l'université de Constantine
<u>Rapporteur</u> :	A. Chaabi	Professeur à l'université de Constantine
<u>Examineurs</u> :	M. Bouchemat	Professeur à l'université de Constantine
	N. Brihi	Professeur à l'université de Jijel
	Z. Dibi	Maitre de Conférence à l'université de Batna

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Chaabi Abdelhafid professeur à l'université de Constantine, qui a assuré l'encadrement de mon travail où il a été une source de motivation et d'encouragement. Je tiens à lui exprimer ma gratitude pour toutes les aides qu'il m'a apportées du début jusqu'à la fin de ma thèse.

Je remercie Monsieur Benghalia Abdelmadjid, professeur à l'université de Constantine pour avoir accepté d'être président du jury de cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à Messieurs : Mohamed Bouchemat , professeur à l'université de Constantine , Brihi Noureddine professeur à l'université de Jijel , Dibi Zohir , Maître de conférence à l'université De Batna, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer à ce jury .

Enfin je voudrais remercier très chaleureusement ma femme qui sans elle je ne serais pas arrivé à réaliser cette thèse.

Mohamed

Dédicace

A

Mes parents

Ma femme

Mes enfants Ghada , Abderrahmane et Abderraouf

Mes frères et sœurs

Mes beaux frères et sœurs

Mes nièces et neveux

A toute la famille Ras lain et Choutri

Mes collègues et mes amis

Mohamed

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 :	
<i>Théorie de la piézorésistivité dans les capteurs de pression piézorésistifs à base de Silicium et Silicium poreux</i>	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Principes de détection dans les capteurs de pression en silicium monocristallin	5
1.2.1 -Corps d'épreuve	5
1.2.2 Transducteur.....	10
1.3 Expression tensorielle de la piezoresistivite	12
1.3.1 Influence de la profondeur z , dopage N et la temperature T sur π_{11} et π_{44}	18
1.3.1.1 Variation de π_{44} et π_{11} en fonction de z	20
1.3.1.2 Variation de π_{44} et π_{11} en fonction du dopage	22
1.3.1.3 Variation de π_{44} et π_{11} en fonction de la température.....	23
1.3.2 Effets combinés du dopage et de la température.....	25
1.3.3 Sensibilité de la membrane en silicium monocristallin.....	28
1.4 Principes de détection dans les capteurs de pression en silicium poreux.....	29
1.4.1 Influence de la porosité sur le coefficient de piézorésistivité d'une membrane en silicium poreux	30
1.4.2 Sensibilité de la membrane en silicium poreux-silicium avec les différentes valeurs de l'épaisseur de la couche poreuse mais à une porosité de 63%.....	
1.5 Conclusion.....	33
Chapitre 2 :	
<i>Modélisation des coefficients de température du premier et du second ordre α et β</i>	34
2.1 Introduction.....	35
2.2. Variation thermique des jauges piézorésistives.....	35
2.3. Etude de la mobilité.....	37
2.3.1. Modèle de KLAASSEN	38
2.3.1.1. Coefficient de température du premier ordre(α).....	40
2.3.1.2. Coefficient de température du second ordre(β).....	41
2.3.2. Modèle de DORCKEL.....	42
2.3.2.1. Coefficient de température du premier ordre (α).....	44
2.3.2.2. Coefficient de température du second ordre(β)	45
2.3.3. Modèle de ARORA.....	46
2.3.3.1. Coefficient de température du premier ordre(α).....	48
2.3.3.2. Coefficient de température du second ordre(β).....	49

2.3.4. Modèle de MASETTI	50
2.3.4.1. Coefficient de température du premier ordre(α).....	51
2.3.4.2. Coefficient de température du second ordre(β).....	52
2.3.5 Résultat expérimental de Bullis	53
2.4. Tension d'offset.....	57
Chapitre 3 :	
Effets combinés du coefficient de piézorésistivité π_{44} et les deux coefficients de température α et β sur le comportement résistif du Silicium type P	
3.1 Introduction.....	60
3.2 Présentation du modèle	60
3.2.1 Effet thermique et mécanique sur le comportement résistif du silicium	60
3.2.1.1 Méthodologie de discrétisation.....	62
3.2.1.1.1 Influence de la température en absence de pression.....	65
3.2.1.1.2 Influence de la Pression à température ambiante.....	68
3.3 Conclusion.....	71
Chapitre 4 :	
Principes de compensation de la dérive thermique de la tension d'offset dans les capteurs de pression piézorésistifs.....	
4.1 Introduction	73
4.2 Théorie du pont.....	73
4.2.1 Le pont de Wheatstone est sous une tension d'alimentation variable V_B mais à température ambiante	74
4.2.2 Le pont de Wheatstone est sous une tension d'alimentation V_B constante mais à température variable	77
4.3 Technique de compensation de la dérive thermique par l'utilisation du thermistance CTP ou CTN montées en série ou en parallèle avec le pont de WHEATSTONE	78
4.3.1 Compensation par l'utilisation d'une CTP montée en série avec le capteur	78
4.3.2 Compensation par l'utilisation d'une thermistance CTN en parallèle avec le pont	84
4.4 Techniques de compensations par le dépôt d'une couche d'aluminium (Ecran) sur la partie supérieur de la membrane	88
4.4.1 Capteur avec membrane avec écran	89
4.4.2 Capteur sans membrane avec écran.....	92
4.4.3 Capteur sans membrane sans écran.....	94
4.5 Etude comparative du comportement thermique des trois types de capteurs	95
4.5.1 Variation thermique de la jauge R_{56}	96
4.5.2 Variation thermique de la jauge R_{26}	97
4.5.3 Variation thermique de la jauge R_{23}	98
4.5.4 Variation thermique de la jauge R_{34}	99
4.6 Comportement de la dérive thermique de la tension d'offset	101
4.6 .1 La dérive thermique de la tension d'offset pour les trois types de capteurs.....	101
4.6 .2 Capteur avec écran avec membrane –capteur sans écran avec membrane	103

<i>4.6.3 Capteur avec écran avec membrane –capteur type MOTOROLA MPX 7050</i>	<i>104</i>
<i>4.7 Conclusion.....</i>	<i>107</i>
<i>Conclusion générale</i>	<i>108</i>
<i>Référence bibliographiques.....</i>	<i>111</i>

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La pression est une notion physique fondamentale et une grandeur de mesure importante, on peut la voir comme une force rapportée à la surface sur laquelle elle s'applique. En tant que paramètre physique, la pression, tout comme la température, joue un rôle extrêmement important dans la plupart des domaines. Dans des secteurs aussi variés que la médecine, l'Automobile, thermodynamique. La plupart des applications industrielles modernes nécessitent un suivi strict de la pression dans la chaîne de fabrication ou dans la chaîne de contrôle.

Une recherche approfondie dans le domaine de conception et réalisation des capteurs de pression piézorésistifs ou capacitifs traite de nombreux paramètres qui influent sur le bon fonctionnement de ces dispositifs, beaucoup de tentatives d'améliorations ont été consacrées pour aboutir aux meilleures conditions permettant le fonctionnement idéal des capteurs de pression.

Dans ce mémoire nous avons synthétisé l'ensemble des résultats obtenus au terme des années de travaux de recherche. Notre sujet a consisté à une étude détaillée sur les capteurs de pression piézorésistifs au Silicium, en particulier sa réponse électrique en fonction de la pression qui doit être une droite avec une tension d'offset nulle.

Dans la pratique cette condition n'est plus vérifiée, il existe une tension non nulle pour une pression nulle, cette tension de décalage varie aussi en fonction de la température, on l'appelle souvent la dérive thermique de la tension d'offset, le but de notre travail est une contribution à l'identification des paramètres perturbant le bon fonctionnement des capteurs de pression et qui entraînent sur l'existence de cette tension.

En dépit de leurs nombreux avantages, bonne précision, faible non linéarité, électronique associée simple, les capteurs de pression piézorésistifs sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique.

De nombreux paramètres soient physiques, électriques ou technologiques provoquent la non idéalités des capteurs de pression, on peut citer, la température comme un paramètre physique, la source d'alimentation du pont de WHEATSTONE comme un paramètre électrique, les défauts de fabrication non contrôlables tels que les étapes de réalisations des masques pour les piézorésistances et les défauts de parallélisme de la membrane, le contrôle strict de l'énergie de l'implantation ionique, tous ces paramètres influent sur la précision de mesure et ainsi minimisent la sensibilité du capteur, l'influence de ces paramètres sur le fonctionnement des capteurs fait l'objet de notre travail.

Ce manuscrit de thèse est structuré en quatre chapitres :

La première partie du premier chapitre décrit une étude théorique sur les capteurs de pression piézoresistifs au silicium monocristallin où nous avons présenté le phénomène de piézorésistivité avec les étapes nécessaires de détection de pression par l'effet piézorésistif du silicium, la deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude théorique des

caractéristiques physiques du silicium poreux accompagnée avec une étude comparative d'une membrane réalisée en Silicium poreux.

Le deuxième chapitre est une approche théorique basée sur quatre modèles de mobilité dont l'objet est de modéliser les coefficients de température de premier et de second ordre (α et β) ces modèles sont ceux dits de KLAASSEN, DORCKEL, ARORA et MASETTI .

Nous avons présenté la variation thermique de la mobilité d'un silicium type P paramétré en dopage .Nous avons tracé la variation de ces deux coefficients en fonction du dopage , puis la variation de la tension d'offset en fonction de la température .

Dans le troisième chapitre nous avons créé un nouveau modèle qui décrit les effets combinés des deux coefficients de température et le coefficient de piézorésistance π_{44} sur le comportement résistif du silicium type P .

Le dernier chapitre propose deux techniques de compensation de la dérive thermique :

La première est une méthode mathématique où nous avons démontré comment la dérive électrique peut compenser la dérive thermique de la tension d'offset. Nous avons proposé l'utilisation des thermistance CTN et CTP dans deux montages différents , série et parallèle avec le pont de WHEATSTONE pour minimiser la dérive thermique.

La deuxième est une étude expérimentale consistant en une amélioration technologique des étapes de fabrication des capteurs de pression au silicium. Nous avons étudié trois types de capteurs de pression , capteur avec écran avec membrane , capteur avec écran sans membrane et capteur sans écran sans membrane.

CHAPITRE 1

THEORIE DE LA PIEZORESISTIVITE DANS LES CAPTEURS DE PRESSION PIEZORESISTIFS A BASE DE SILICIUM ET SILICIUM POREUX

1.1 Introduction

La pression, constitue une variable essentielle pour l'étude d'un milieu qui peut être soit un gaz soit un fluide. La mesure de cette grandeur physique est réalisée à l'aide d'un capteur de pression dont la sortie est un signal, appelé « réponse ».

Un capteur de pression est un système constitué de deux parties : une partie détection appelée « Cellule sensible » et une partie traitement de l'information appelée « Circuit électronique de traitement » ou encore « Circuit conditionneur ». La partie détection est constituée d'un « Corps d'épreuve » et d'un « Transducteur » qui transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, la plupart du temps électrique. Un capteur de pression peut donc être représenté par le schéma de la figure ci-dessous.

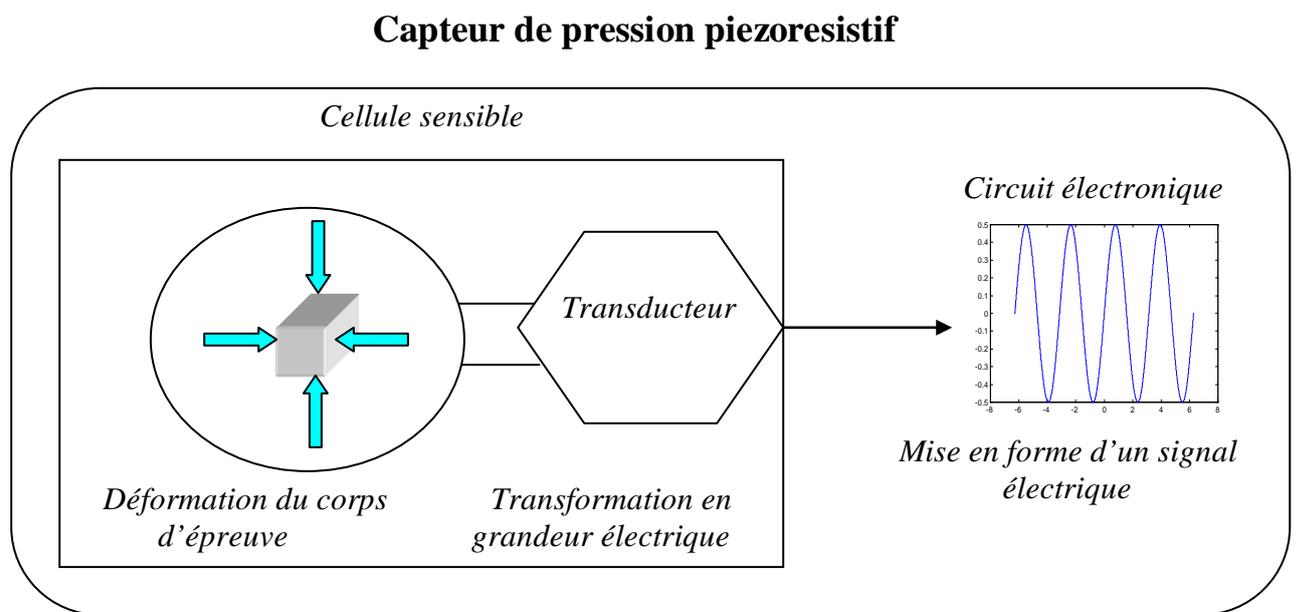


Figure (1.1) : Schéma synoptique d'un capteur de pression.

1.2 Principes de détection dans les capteurs de pression en silicium monocristallin :

La conception d'un capteur de pression passe par des choix techniques et technologiques lesquels sont généralement guidés par l'application même du capteur.

1.2.1 -Corps d'épreuve :Le corps d'épreuve est le plus souvent une membrane encastrée dont la forme dépend de l'application visée. Elle peut être rectangulaire, carré ou circulaire ,d'épaisseur variable ou uniforme.

La déformation de la membrane soumise à une pression hydrostatique est régie par une équation différentielle du quatrième ordre[1].Pour des déflexions de faible valeurs(très inférieures à l'épaisseur de la membrane), les solutions sont de type semi-analytique dans le cas de membranes carrées et rectangulaires et analytique dans le cas de membranes circulaires.Elles permettent d'obtenir la cartographie des déplacements qui seront ensuite utilisés pour calculer la réponse du transducteur électrique.

Dans le cas d'une membrane carrée ou rectangulaire, la déflexion $W(x, y)$ qui représente la déformée en tout point de la membrane peut être approchée par un développement polynomial du type :

$$W_N(x, y) = \left[1 - \left(\frac{2x}{a} \right)^2 \right]^2 \left[1 - \left(\frac{2y}{b} \right)^2 \right]^2 \left[\sum_{i,j}^n K_{i,j} \left(\frac{2x}{a} \right)^i \left(\frac{2y}{b} \right)^j \right] \quad (1.1)$$

a et b représentent respectivement la largeur et la longueur de la membrane et n, i et j sont des nombres pairs. Les facteurs $K_{i,j}$ dépendent de la forme de la membrane et des caractéristiques mécaniques du matériau, la définition des axes x et y est représentées sur la figure(1.2).

Où $W_N(x,y)$ est la déflexion normalisée écrite sous la forme :

$$W(x, y) = W(0,0) \cdot W_N(x, y) \quad (1.2)$$

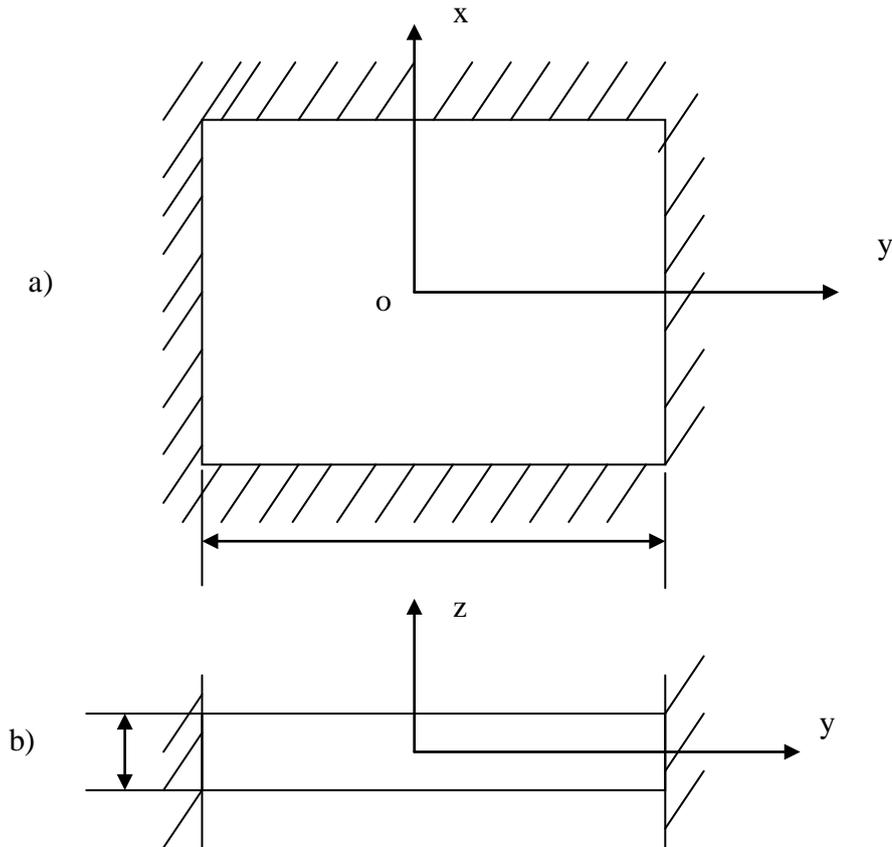
Une partie $W(0,0)$ indépendante des coordonnées et une autre partie $W_N(x, y)$, indépendante de la pression et des paramètres géométriques et mécaniques :

Où $W(0,0)$ représente la déflexion au centre de la membrane.

Pour une membrane de surface S et d'épaisseur uniforme h totalement encastrée sur ses bords et dans le cas des faibles déflexions, celle ci est définie par [2]:

$$W(0,0) = k \frac{S^2}{h^3} P \quad (1.3)$$

Où P représente la pression hydrostatique différentielle appliquée de chaque coté de la membrane ; K est un facteur qui dépend des caractéristiques mécaniques du matériau et de la forme de la membrane. La déflexion au centre est donc directement proportionnelle à la pression.



Figure(1.2) :Représentation schématique de la membrane :
 a) en vue de dessus.
 b) Vue en coupe.

Dans le cas d'une membrane circulaire, la solution exacte de la déflexion normalisée est donnée en coordonnées cylindriques par :

$$W_N(r) = \left[1 - \frac{r^2}{a^2} \right]^2 \quad (1.4)$$

Où a représente le rayon de la membrane.

Dans le cas d'une membrane en Silicium mono-cristallin usinée dans un plan (100) avec des bords encastrés parallèles aux directions [110], les facteurs K et $K_{i,j}$ (n=4) sont donnés pour différentes formes de membranes dans le tableau(1.1).

	Circulaire	Carrée	Rectangulaire(b/a=2)	Rectangulaire(b/a=3)
K	115.10^{-15}	94.10^{-15}	46.10^{-15}	21.10^{-15}
K_{00}	-	1	1	1
K_{02}	-	$2.3.10^{-1}$	$1.8.10^{-2}$	$5.1.10^{-3}$
K_{20}	-	$2.3.10^{-1}$	1.27	1.82
K_{22}	-	$2.5.10^{-1}$	2.10^{-1}	$-1.8.10^{-1}$
K_{40}	-	$-1.7.10^{-3}$	$-2.5.10^{-3}$	$3.3.10^{-4}$
K_{04}	-	$-1.7.10^{-3}$	$4.8.10^{-1}$	3.03
K_{42}	-	$1.3.10^{-1}$	$1.3.10^{-1}$	$3.01.10^{-2}$
K_{24}	-	$1.3.10^{-1}$	$6.4.10^{-1}$	1.46
K_{44}	-	$-2.4.10^{-1}$	5.10^{-2}	$8.4.10^{-2}$

Tableau(1.1): Valeurs des facteurs K et $K_{i,j}$ pour différentes formes de membranes en silicium mono-cristallin (a et b représentent respectivement la longueur et la largeur de la membrane rectangulaire) [2].

Les équations des contraintes induites par l'application d'une pression P à la surface de la membrane(c'est à dire à $z=-h/2$) ; s'écrivent :

$$\sigma_1(x, y) = \frac{h}{2} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \right) \quad (1.5)$$

$$\sigma_2(x, y) = \frac{h}{2} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} \right) \quad (1.6)$$

$$\sigma_6(x, y) = h.G. \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x \partial y} \quad (1.7)$$

Où E, G représentent respectivement les modules de YOUNG et COULOMB et ν Coefficient de POISSON.

En utilisant les coordonnées réduites définies comme $u=2x/a$ et $v=2y/b$, les équations des trois composantes planes de la matrice des contraintes normalisées par rapport aux termes $P(1/h^2)$; s'écrivent [3] :

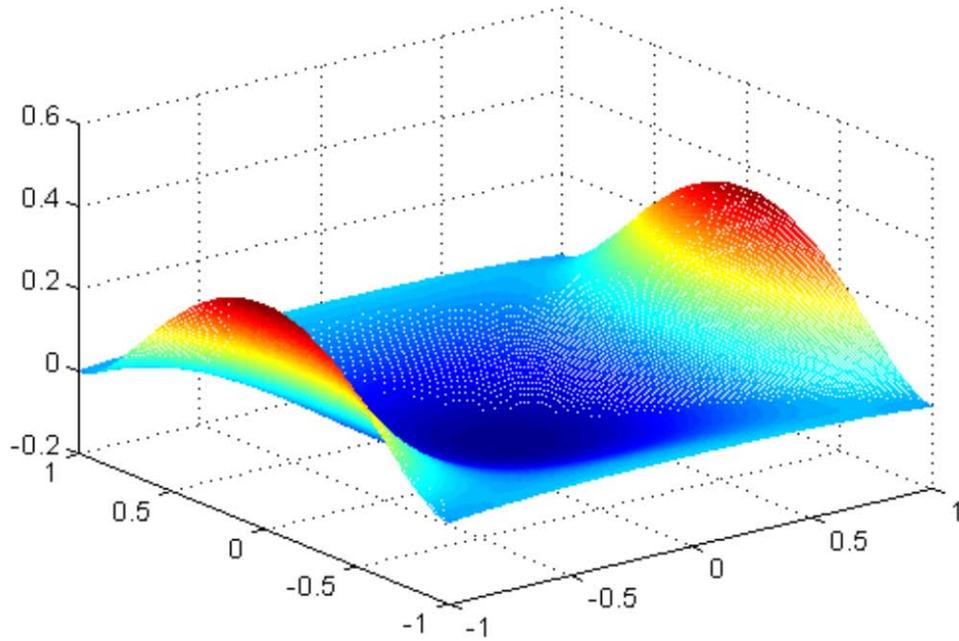
$$\overline{\sigma}_1(u, v) = \frac{3}{2} \left[\frac{\partial^2 W_N(u, v)}{\partial u^2} + \nu \frac{\partial^2 W_N(u, v)}{\partial v^2} \right] \quad (1.8)$$

$$\overline{\sigma}_2(u, v) = \frac{3}{2} \left[\frac{\partial^2 W_N(u, v)}{\partial v^2} + \nu \frac{\partial^2 W_N(u, v)}{\partial u^2} \right] \quad (1.9)$$

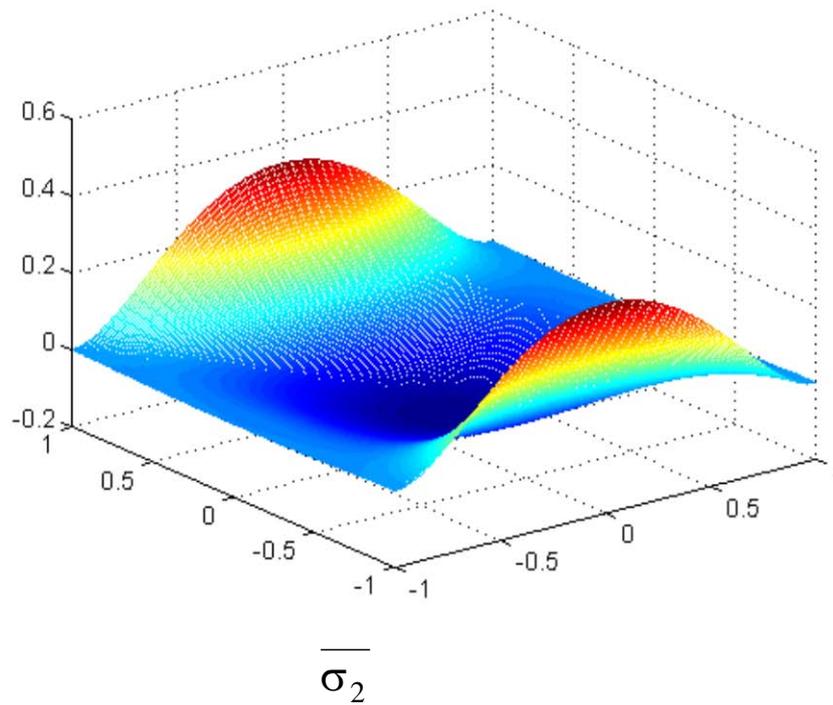
$$\overline{\sigma}_6(u, v) = 3 \frac{G}{E} (1 - \nu^2) \frac{\partial^2 W_N(u, v)}{\partial u \partial v} \quad (1.10)$$

La double dérivation de l'expression de la déflexion normalisée $W_N(x, y)$, par rapport à u et v , permet d'obtenir les équations développées des trois contraintes normalisées, en fonction des coordonnées réduites du point et des coefficients K_{ij}

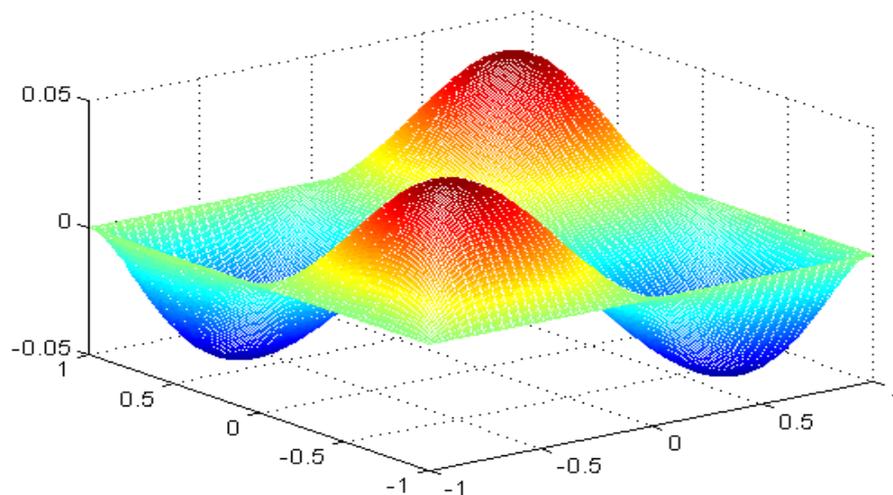
Pour une membrane usinée dans un plan [100] et dont les cotés sont orientés parallèlement à la direction [110], la représentation dans l'espace des contraintes $\overline{\sigma}_1$ et $\overline{\sigma}_2$ est reportée sur la Figure(1.3); celle de $\overline{\sigma}_6$ sur la figure(1.4) .



$\overline{\sigma}_1$



Figure(1.3) : Représentation tridimensionnelle des contraintes $\overline{\sigma_1}$ et $\overline{\sigma_2}$



Figure(1.4) : représentation tridimensionnelle de la contrainte tangentielle $\overline{\sigma_6}$

Les figures (1.3) et (1.4) permettent de visualiser qualitativement l'état de la membrane lorsqu'une pression lui est appliquée.

Cependant pour une utilisation pratique de $\overline{\sigma_1}$ (ou $\overline{\sigma_2}$) en fonction de u (ou v) de -1 à 1 , on utilisera la représentation de la figure (1.5) :

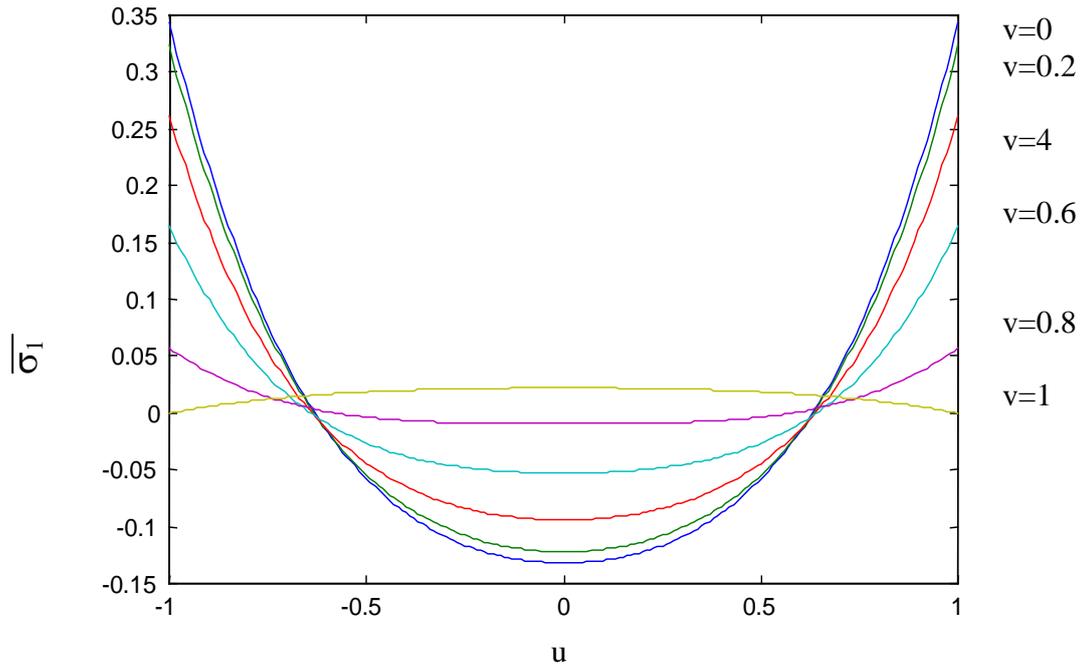


Figure (1.5) : Courbes de variations de contrainte $\overline{\sigma_1}$ en fonction de u paramétrées en ν Variant de 0 à 1.

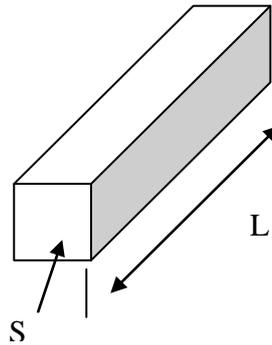
On constate que les contraintes sont maximales aux bords de la membrane.

1.2.2 Transducteur

Il existe de très nombreux principes de transduction mais nous n'aborderons ici que les transducteurs les plus utilisés pour les capteurs de pression miniatures, c'est-à-dire les résistances.

Soit une résistance R de forme parallélépipédique constituée d'un matériau homogène de résistivité ρ_0 . Sa valeur au repos est donnée par :

$$R_0 = \rho_0 \frac{L}{S} \tag{1.11}$$



Figure(1.6) :Résistance R de forme parallélépipédique

Où L et S représentent respectivement la longueur et la section de la résistance et ρ_0 la résistivité du matériau.

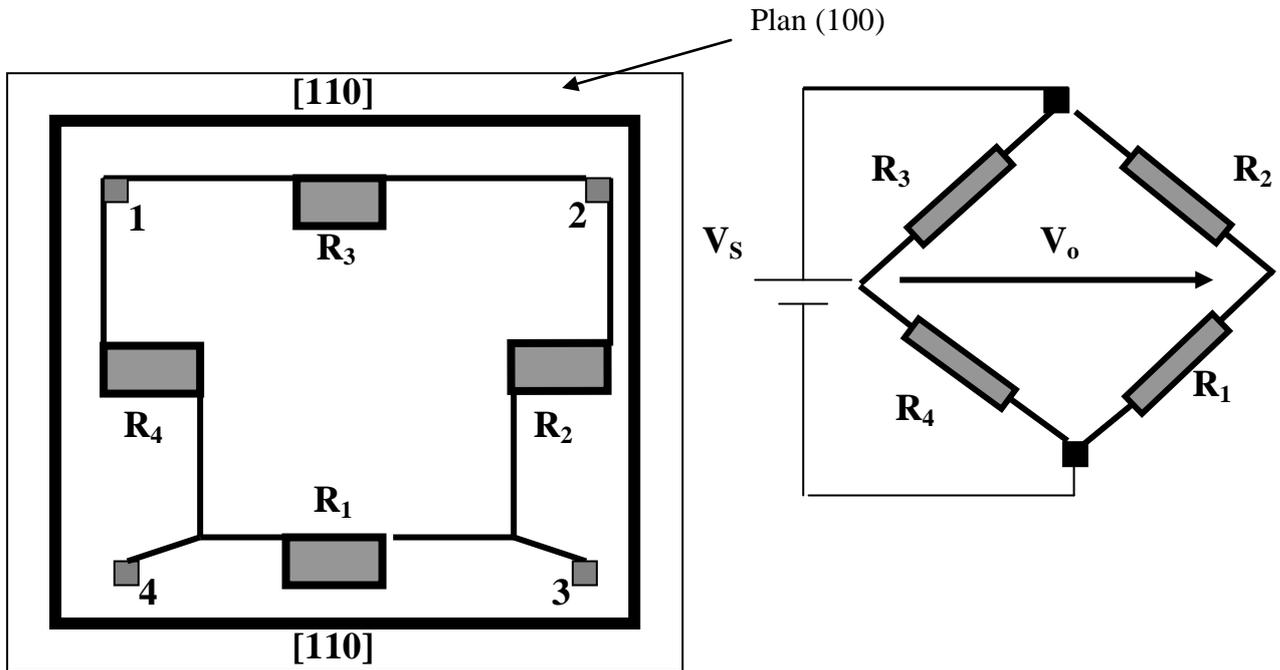
L'application d'une contrainte (ou déformation) introduit une variation de résistance ΔR .

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S} \quad (1.12)$$

Les deux derniers termes de la relation (1.12) représentent les changements dimensionnels de la jauge ; ils sont prépondérants pour les métaux. Le premier terme représente une variation de résistivité qui est très largement dominant pour les semi-conducteurs : C'est l'**effet piézorésistif** [4].

Les contraintes dues à l'application d'une pression sont maximales au milieu du bord encastré de la membrane ; pour avoir une meilleure sensibilité à la pression il est clair que l'implantation des jauges sera au milieu des bords de la membrane.

A la surface de la membrane carrée en Silicium de plan [100], les quatre jauges de valeurs nominales identiques sont implantées de sorte que leurs cotés soient orientés selon la direction [110], deux soient parallèles aux bords de la membrane et les deux autres soient perpendiculaires aux autres bords : elles seront connectées selon la figure (1.7).



Figure(1.7):Représentation des quatre piézorésistances implantées à la surface de la membrane de Silicium et connectées en pont de WHEATSTONE.les quatre jauges sont orientées selon la direction [110] et implantées sur une surface (100)

1.3 Expression tensorielle de la piezoresistivite

Dans un repère (oxyz) lié aux axes cristallographiques[100] d'un matériau semi-conducteur, la loi d'ohm généralisée s'écrit en notation tensorielle [5].

$$\mathbf{E}_i = \rho_{ij} \mathbf{J}_j + \pi_{ijkl} \rho_{ij} \sigma_{kl} \mathbf{J}_j \quad (1.13)$$

Avec i,j et l variant de 1 à 3.

Où π_{ijkl} est le tenseur de piézorésistivité du matériau.

Sachant que[5] :

- Les deux tenseurs de résistivité ρ_{ij} et des contraintes σ_{kl} sont des tenseurs symétriques ;
- Les matériaux semi-conducteurs cristallisant dans le système cubique tels que le Silicium et le Germanium ont une symétrie de leur structure cristalline ;

⇒ On peut alors passer à une écriture matricielle du tenseur de piézorésistivité du Silicium mono cristallin dont les coefficients deviennent alors les composantes de la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Cette écriture permet, malgré cette contraction des indices, de retrouver dans le cas précis de ce type de symétrie cristalline, la signification physique des trois coefficients de piézorésistivité non nuls.

- π_{11} : Il permet de relier la densité de courant et le champ électrique qui sont colinéaires à la contrainte s'exerçant parallèlement à eux.
- π_{12} : La densité de courant et le champ électrique étant toujours colinéaires, cette composante détermine l'effet provoqué, sur la résistivité du matériau, par l'application d'une contrainte perpendiculaire aux lignes de champ.
- π_{44} : Ce coefficient, quant à lui représente l'effet piézorésistif dû à l'exercice d'une contrainte de cisaillement quand le courant et le champ électrique sont perpendiculaire l'un à l'autre.

Par conséquent, avec cette écriture, les trois composantes du champ électrique s'écrivent :

$$E_1 = J_1 \rho [1 + \pi_{11} \sigma_1 + \pi_{12} (\sigma_2 + \sigma_3)] + \rho \pi_{44} (J_2 \sigma_6 + J_3 \sigma_5) \quad (1.15)$$

$$E_2 = J_1 \rho [1 + \pi_{11} \sigma_2 + \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_3)] + \rho \pi_{44} (J_1 \sigma_6 + J_3 \sigma_4) \quad (1.16)$$

$$E_3 = J_3 \rho [1 + \pi_{11} \sigma_2 + \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_2)] + \rho \pi_{44} (J_2 \sigma_4 + J_1 \sigma_5) \quad (1.17)$$

Ces trois équations montrent que la différence de potentiel entre les bornes d'une résistance réalisée dans un monocristal de Silicium dépend non seulement des trois composantes du courant électrique qui la traverse, mais également des six composantes du tenseur des contraintes qui s'exercent sur elle. L'influence de chacune de ces composantes sera plus au moins importante selon les valeurs que prendront les coefficients π_{11}, π_{12} et π_{44} . Leur connaissance permettrait donc de quantifier les variations des grandeurs électriques induites par ces contraintes.

La première détermination expérimentale des trois coefficients de piézorésistivité du Silicium et du Germanium mono cristallin à été effectuée par SMITH en 1954[4], sur des barreaux massifs et faiblement dopés. Les valeurs obtenues pour ces deux matériaux, et qui sont encore actuellement utilisées, sont regroupées dans le tableau (1-2).

Matériau	Dopage(cm^{-3})	$\pi_{11}(10^{-11}\text{Pa}^{-1})$	$\pi_{12}(10^{-11}\text{Pa}^{-1})$	$\pi_{44}(10^{-11}\text{Pa}^{-1})$
Si(P)	10^{15}	6.6	-1.1	138.1
Si(N)	4.10^{14}	-102.6	53.4	13.6

Tableau (1-2) : Valeurs des coefficients de piézorésistivité du Silicium mesurés à température ambiante par SMITH sur des barreaux massifs peu dopés de Silicium[4].

Il est remarquable que la valeur de coefficient π_{44} soit beaucoup plus forte que la valeur de π_{11} et π_{12} pour un Silicium de type P.

Pour des cristaux cubiques comme le Silicium et dans les configurations cristallographiques généralement utilisées, la variation de résistance peut se mettre sous la forme approchée suivante :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t + \pi_c \sigma_c \quad (1.18)$$

avec

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + n_1^2 l_1^2) \quad (1.19)$$

$$\pi_t = \pi_{12} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (1.20)$$

$$\pi_c = 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^3 l_2 + m_1^3 m_2 + n_1^3 n_2) \quad (1.21)$$

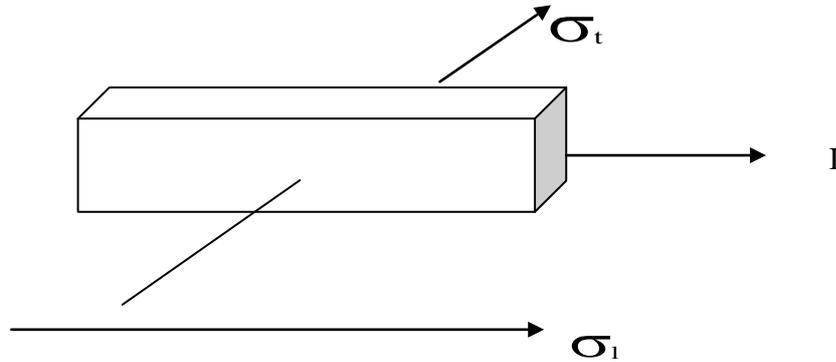
Où l_i, m_i et n_i (pour i prenant les valeurs 1,2 et 3) sont les coefficients directeurs de la transformation d'axe permettant de couvrir n'importe quelle orientation cristallographique existante dans le cristal [5].

Ces équations montrent qu'à travers les expressions des coefficients de piézoresistivité π_1, π_t, π_c et la forme des contraintes planes $\sigma_1, \sigma_t, \sigma_c$ présentes à la surface de la membrane, il est possible de prévoir un certain type de réponse électrique de la jauge, en choisissant l'orientation et l'emplacement adéquats. Nous avons regroupés, dans le tableau (1-3), pour les trois familles de plans principaux des matériaux cristallins à symétrie cubique. Les expressions développées des trois coefficients π_1, π_t, π_c , pour un certain nombre de directions cristallographiques privilégiées, en fonction des coefficients fondamentaux du Silicium.

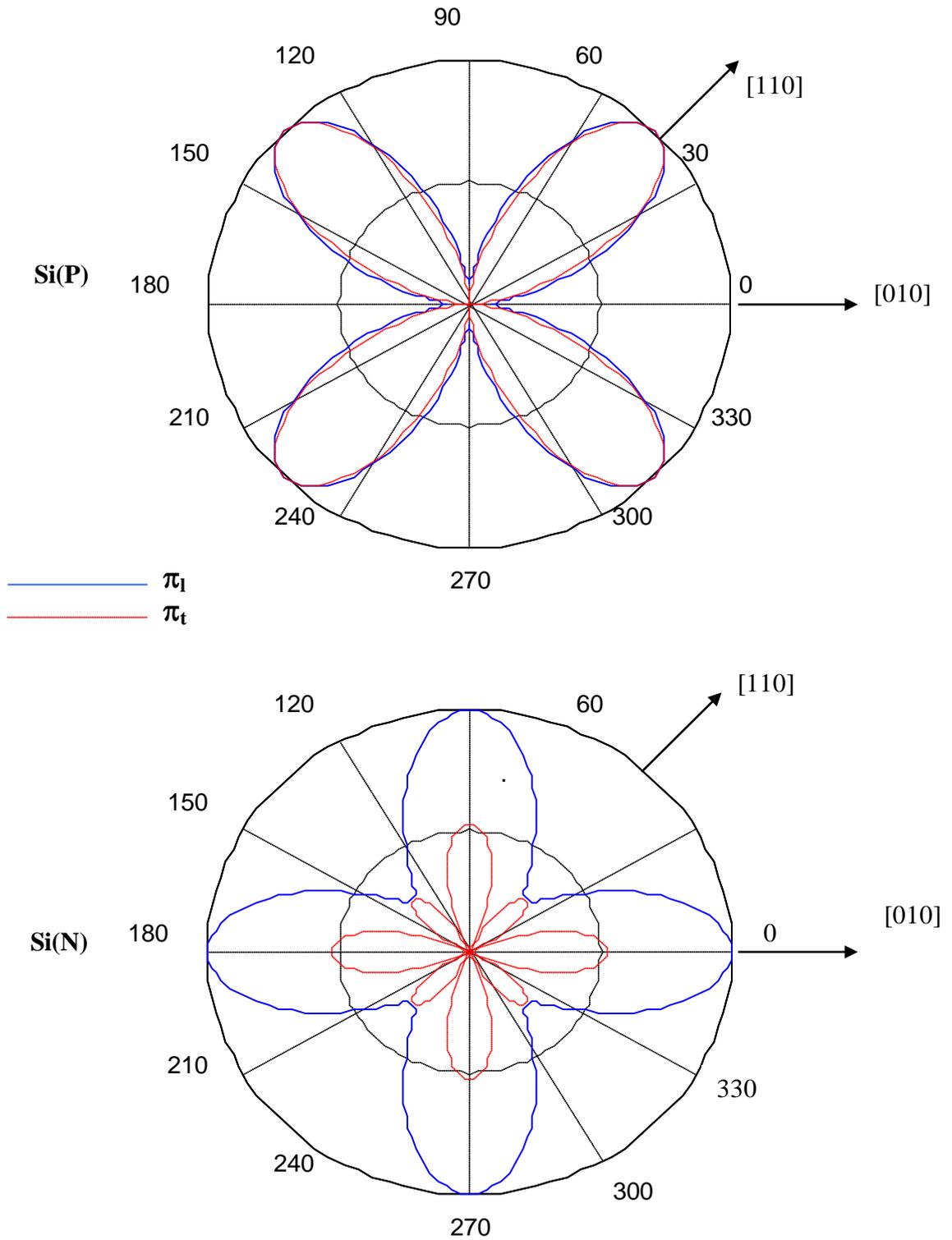
Plan	Direction	π_1	π_t	π_c
(100)	[100]	π_{11}	π_{12}	0
	[110]	$(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$	$(\pi_{11} + \pi_{12} \cdot \pi_{44})/2$	0
(011)	[011]	$(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$	π_{12}	0
	[100]	π_{11}	π_{12}	0
	[111]	$(\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44})/3$	$(\pi_{12} + \pi_{11} - \pi_{44})/3$	$0.16(\pi_{11} - \pi_{12} \cdot \pi_{44})$
(111)	qcque	$(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$	$(5\pi_{12} + \pi_{11} - \pi_{44})/6$	0

Tableau(1-3) : Expressions développées des coefficients de piézorésistivité des cristaux à symétrie cubique, calculées dans un certain nombre de plans et pour des directions cristallographiques particulières

π_l et π_t sont les coefficients de piézorésistivité associés aux directions parallèle et perpendiculaire au courant I , figure(1.8). Ils dépendent fortement du matériau utilisé et de l'orientation cristallographique de la résistance.



Figure(1.8): Représentation d'une résistance parallélépipédique parcourue par un courant I et subissant une contrainte longitudinale σ_l et transversal σ_t



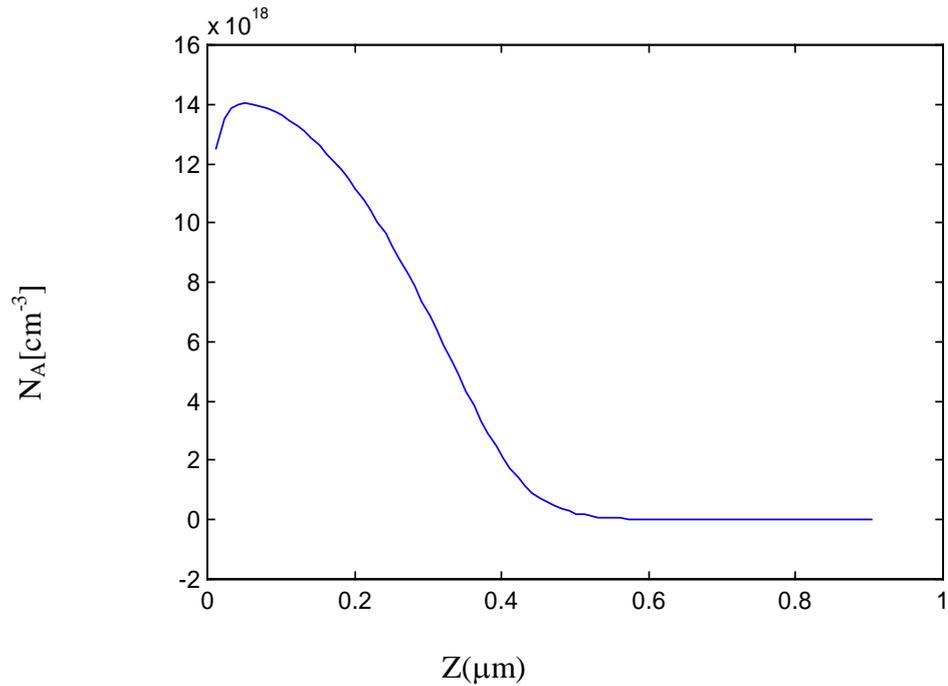
Figure(1.9): Courbes de variations dans un plan [100], des coefficients de piézoresistivité longitudinal et transversal du Silicium en fonction de l'orientation cristallographique. Les deux courbes représentées pour chaque type de dopants sont décalées par rapport à l'autre de 180°

Il est clair que la meilleure orientation possible permettant d'obtenir pour une concentration en dopants et une position donnée de la jauge sur la membrane, un effet piézorésistif maximal est la direction [100] pour un Silicium dopé en atomes donneurs.

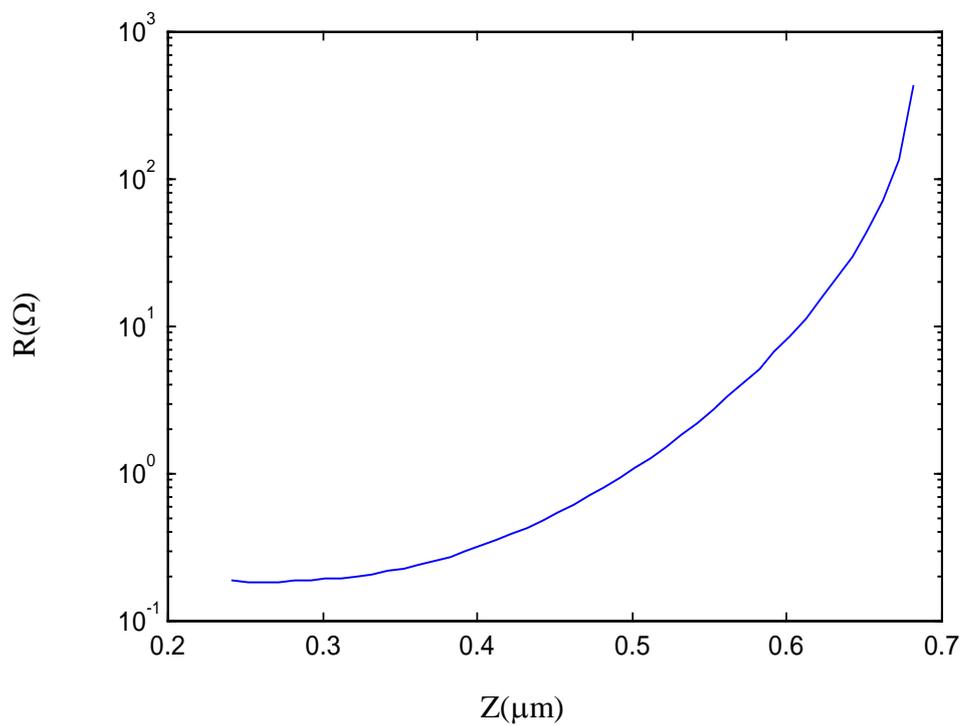
Par ailleurs, dans ce même plan, une jauge réalisée en Silicium de type P aura une réponse optimisée pour une orientation cristallographique [110], avec les deux coefficients de piézorésistivité longitudinal et transversal presque égaux et opposés en signe.

1.3.1 Influence de la profondeur z , dopage N et la température T sur π_{11} et π_{44} :

Un profil de dopage a une concentration des dopants qui diminue en fonction de la profondeur de pénétration des ions, ce qui a pour conséquence de provoquer une augmentation de valeur des coefficients de piézorésistivité ; par conséquent le gradient de distribution d'impuretés en fonction de la profondeur z provoque l'apparition d'un profil de piézorésistivité. Par ailleurs la valeur de la résistance de la couche implantée augmente en fonction de la profondeur. Il est généralement admis que la région la plus proche de la surface influe beaucoup plus sur la valeur des coefficients de piézorésistivité que celles qui en sont éloignées.



(a)



(b)

Figure(1.10): (a)- Profil du dopage en fonction de la pénétration des dopants
(b)- résistance de la couche implanté en fonction de la profondeur de pénétration des dopants pour ce profil.

De ce fait ; on définit une valeur moyenne de ce coefficient par la relation suivante [6] :

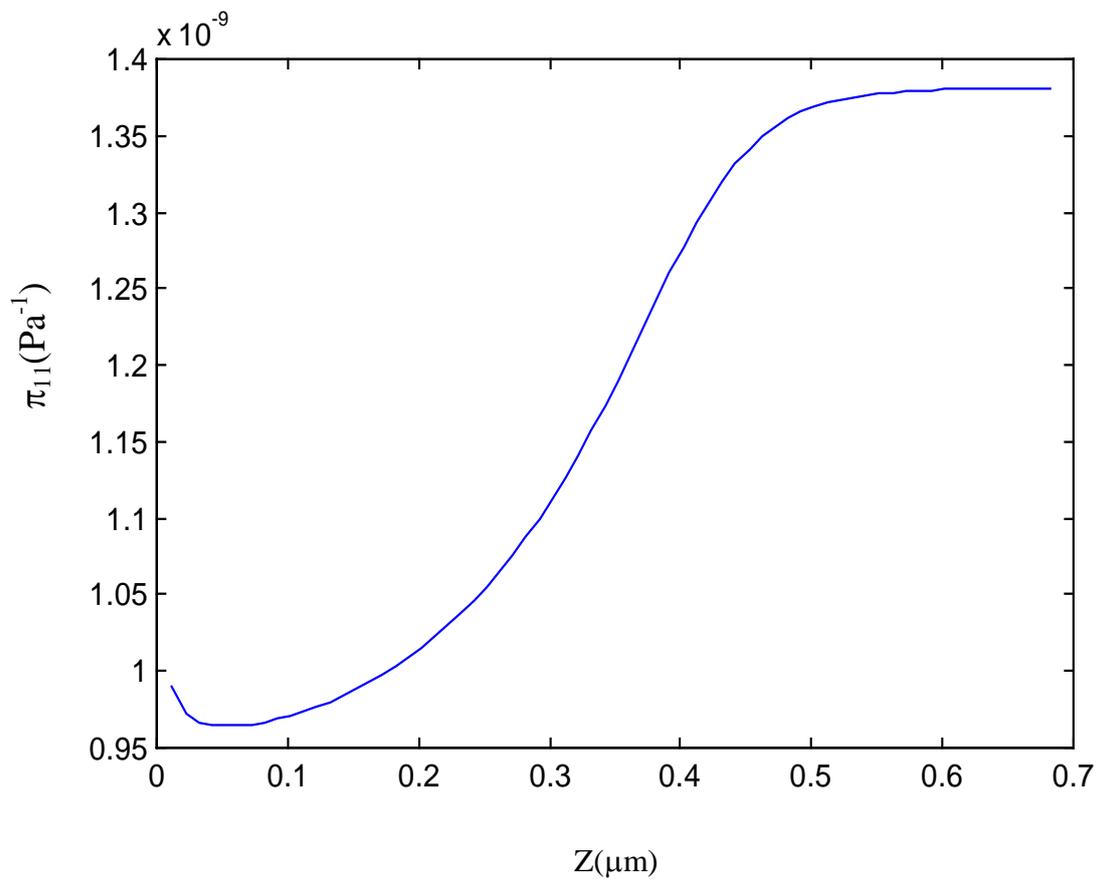
$$\bar{\pi} = \frac{\int_0^z \pi(z)\sigma(z)dz}{\int_0^z \pi(z)dz} \quad (1.22)$$

Où $\pi(z)$ est le coefficient de piézoresistivité en fonction de la profondeur de pénétration z ;

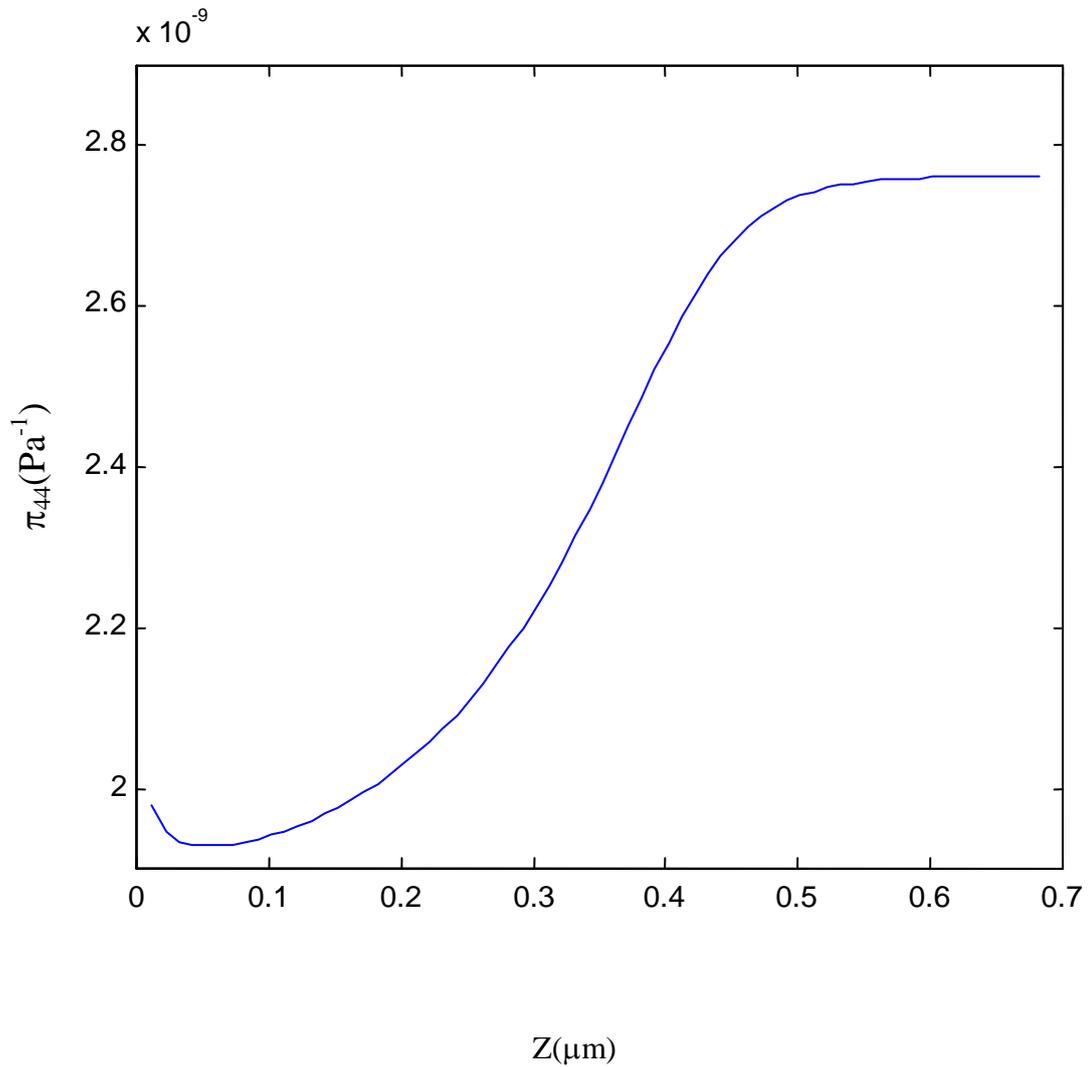
$\sigma(z)$: La conductivité du matériau en fonction de la profondeur z .

1.3.1.1 Variation de π_{44} et π_{11} en fonction de z .

En utilisant l'équation (1.22), nous avons modélisé les évolutions des coefficients principaux π_{11} (Semi conducteur de type N) et π_{44} (Semi conducteur de type P) ; elles sont représentées sur les figures (1.11) et (1.12).



Figure(1.11): Variation de coefficient de piézorésistivité π_{11} en fonction de z



Figure(1.12): Variation de coefficient de piézorésistivité π_{44} en fonction de z .

On remarque que la valeur des deux coefficients de piézorésistivité est faible près de la surface puis elle augmente uniformément jusqu'aux environs de $0.5\mu\text{m}$ où elle prend une valeur constante.

1.3.1.2 Variation de π_{44} et π_{11} en fonction du dopage.

En utilisant la relation (1.22) nous avons modélisé les évolutions des deux coefficients en fonction de dopage. Elles sont représentées sur la figure(1.13)

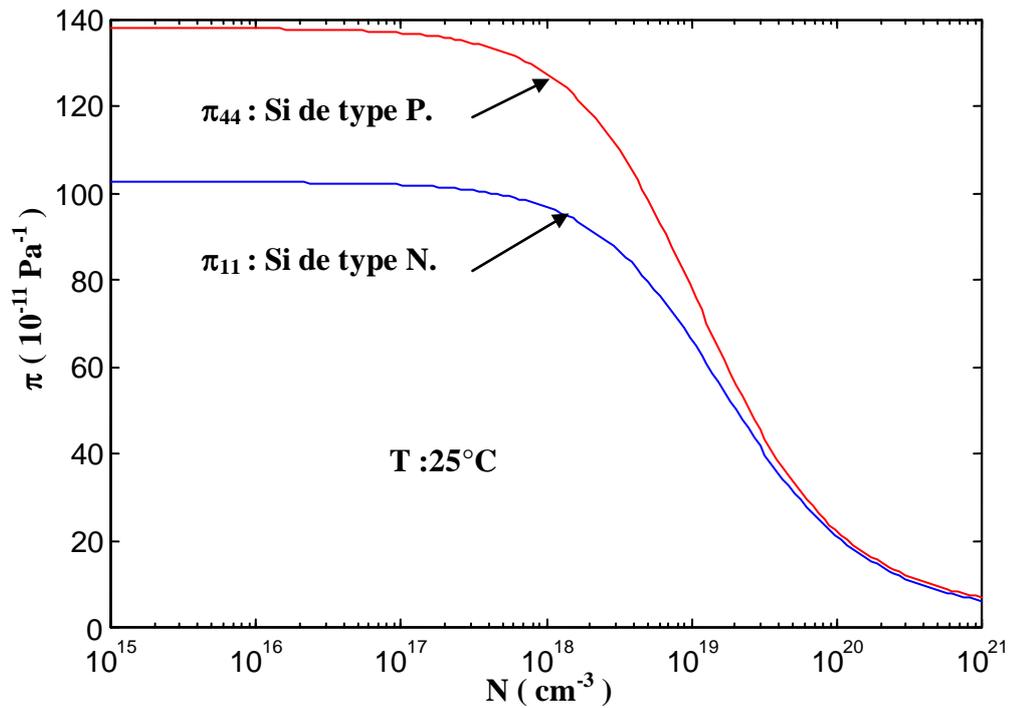


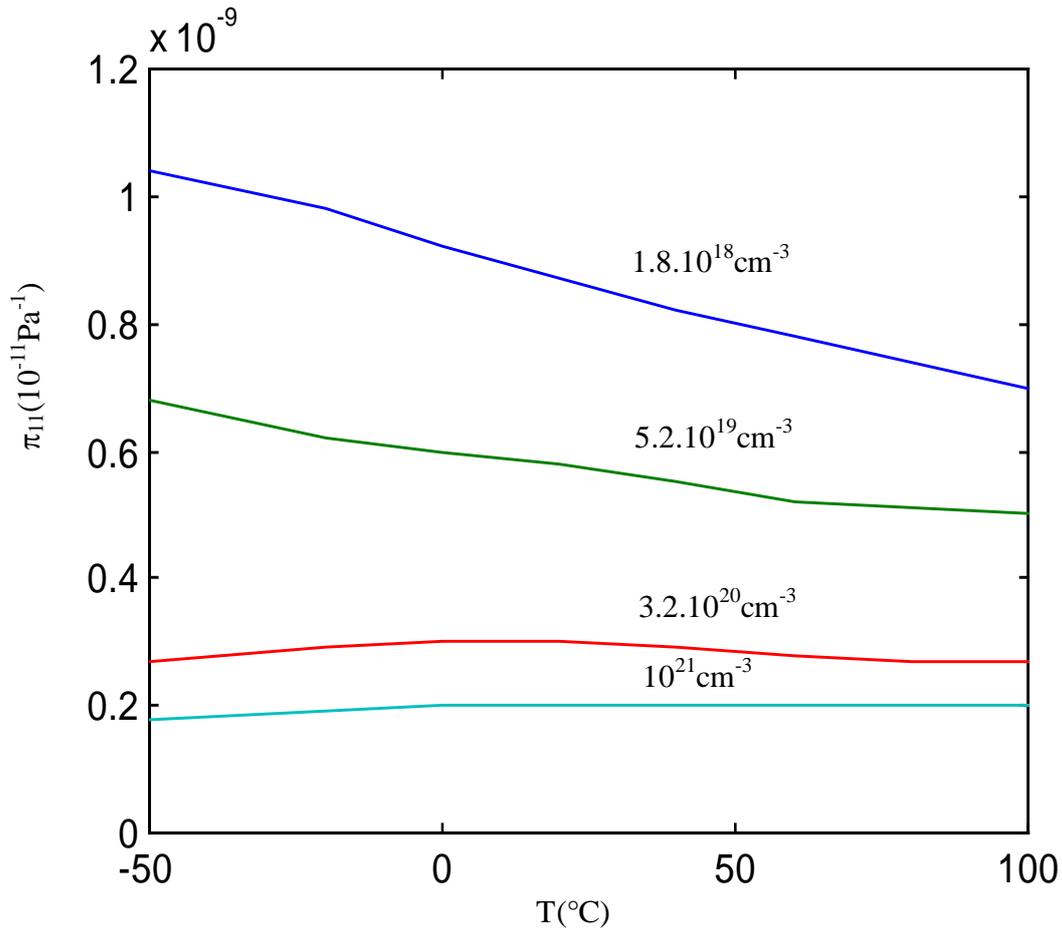
Figure (1.13) : Variation du coefficient de piézorésistivité π_{11} du Silicium type N et π_{44} du type P en fonction du dopage à température ambiante.

On remarque que la valeur des deux coefficients est constante jusqu'à 10^{18} cm^{-3} , au delà de cette concentration elle diminue rapidement et uniformément où elle se stabilise aux dopages élevés.

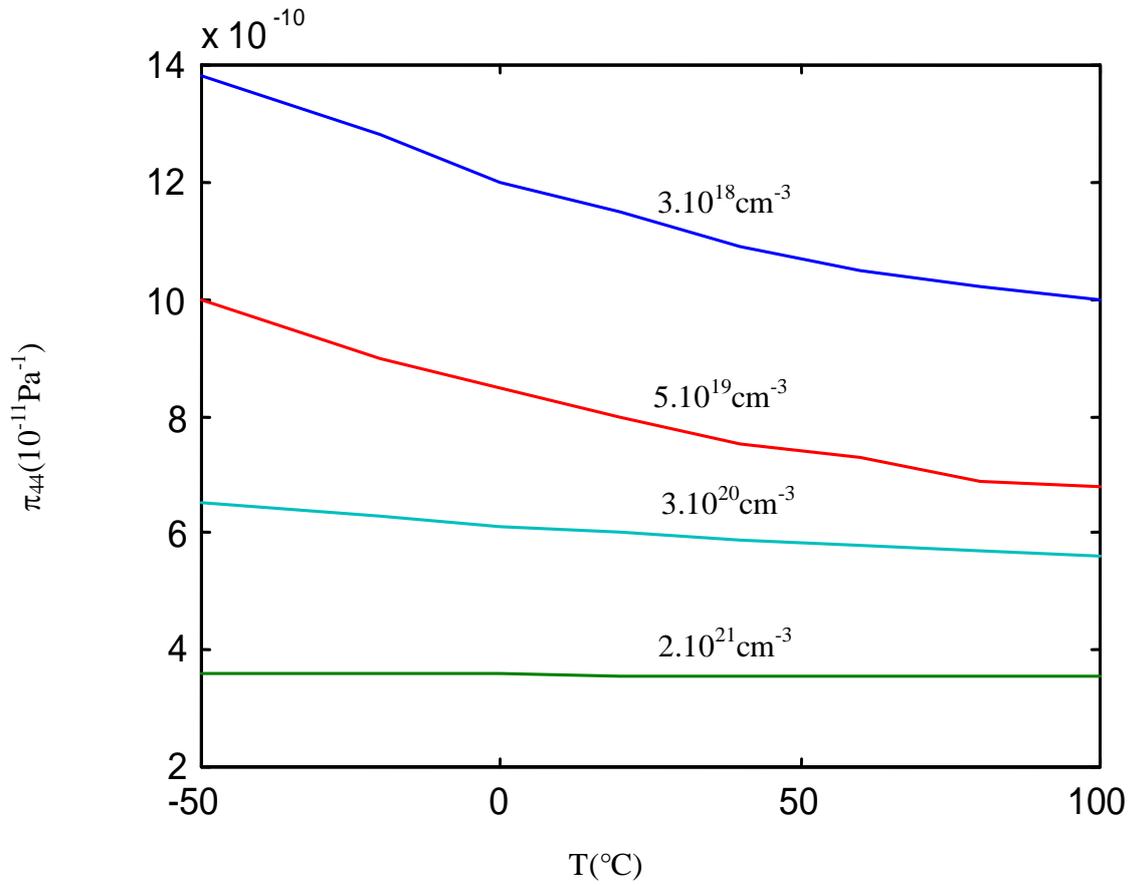
1.3.1.3 Variation de π_{44} et π_{11} en fonction de la température.

En utilisant les résultats de la référence[3], Nous avons représentés les variations respectives de π_{44} et π_{11} en fonction de la température sur les figures (1.14) et (1.15) .

On constate que, pour les deux termes , la dépendance thermique est élevée dans une gamme de concentrations allant de $1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ à $5.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ environ pour π_{11} et de $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ à $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pour π_{44} . Au delà de ces deux valeurs extrêmes de dopage, les deux coefficients deviennent quasiment indépendants de la température.



Figure(1.14) : Variation du coefficient de piézorésistivité π_{11} du Silicium de type N en fonction de la température paramétré en dopage.



Figure(1.15):Variation du coefficient de piézoresistivité π_{44} du Silicium de type P en fonction de la température paramétré en dopage

1.3.2 Effets combinés du dopage et de la température

Dans le but de modéliser le comportement expérimental de l'effet piézorésistif, KANDA[5] a utilisé la variation de conductivité dans un monocristal de Silicium pour mettre au point une formulation générale intégrant les paramètres du dopage et de la température à travers un facteur de piézorésistance $P(N,T)$. Ce facteur multiplicatif permet d'obtenir un coefficient de piézorésistivité $\pi_{1,t}(N,T)$ d'une résistance de Silicium se trouvant à la température T et ayant une concentration N en dopants accepteurs ou donneurs à partir de l'expression suivante :

$$\pi_{1,t}(N, T) = \pi_{1,t}(10^{16}, 300^\circ \text{K}) \cdot P(N, T) \quad (1.24)$$

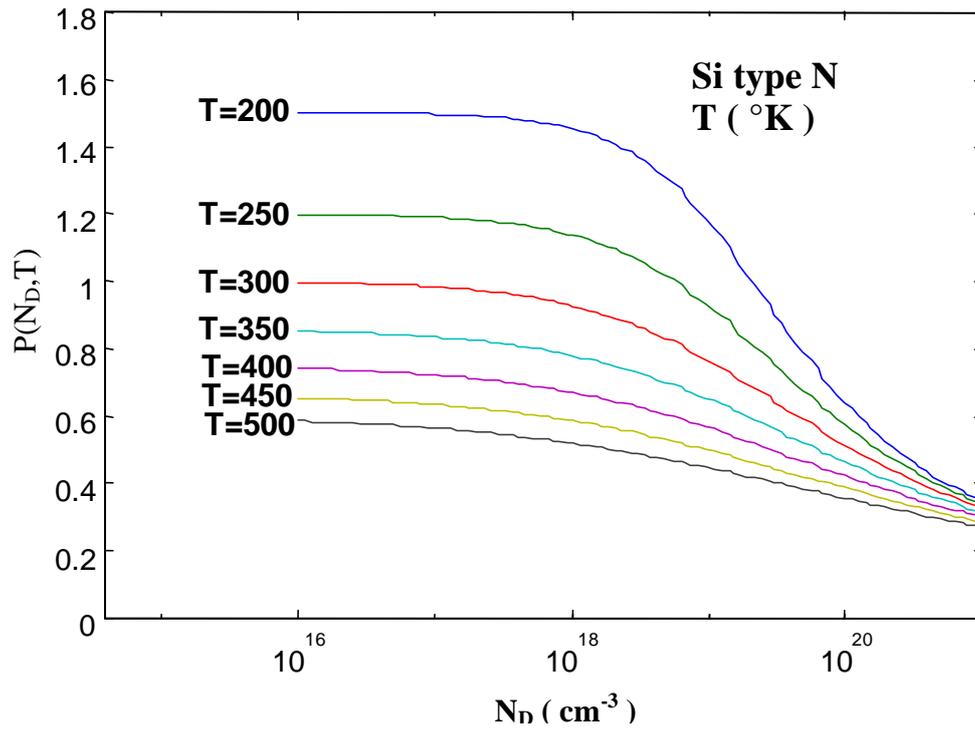
Où $\pi_{1,t}(10^{16}, 300^\circ \text{K})$ est un coefficient pris comme référence et utilisant les valeurs expérimentales du tableau(I-1)

et $P(N,T)$ est un facteur de piézorésistance, donné par la formule suivante [5] :

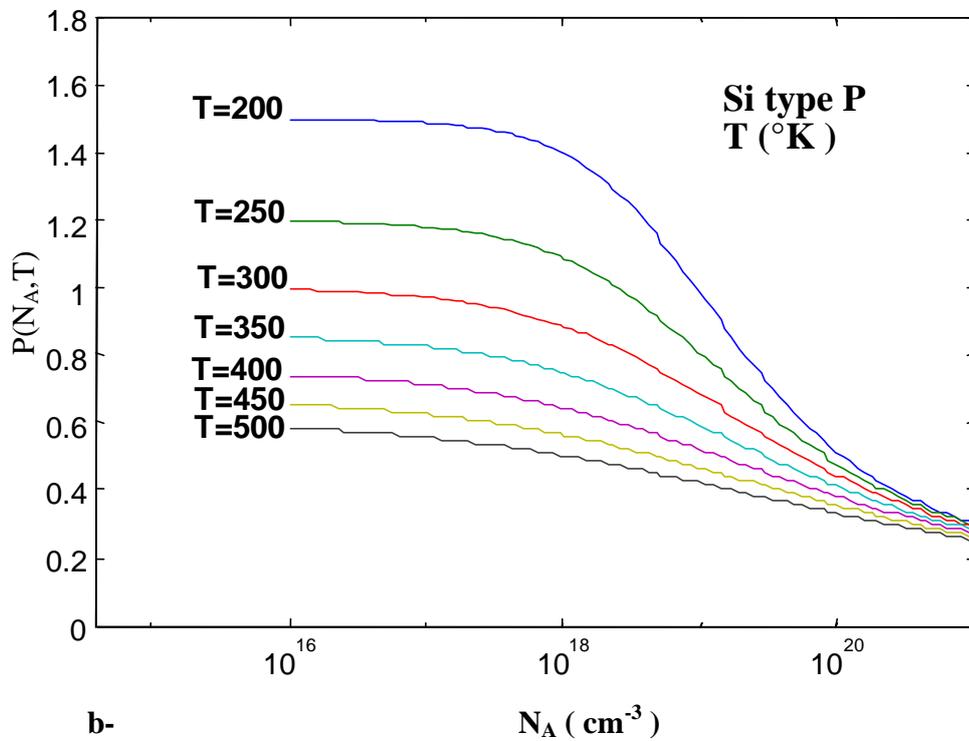
$$P(N, T) = \frac{300}{T} \frac{1}{(1 + \text{Exp}(\frac{E_f}{K_b T})) \ln(1 + \text{Exp}(\frac{-E_f}{K_b T}))} \quad (1.25)$$

E_f est le niveau de Fermi et K_B et la constante de Boltzmann.

Nous avons tracé, sur les figures (1.16) et (1.17), les variations du facteur $P(N,T)$ en fonction du dopage avec la température comme paramètre.



Figure(1.16): Variations des coefficients de piézorésistance $P(N,T)$ en fonction du dopage paramétrés en température Si(N).



Figure(1.17) : Variations des coefficients de piézorésistance $P(N,T)$ en fonction du dopage paramètrès en température Si(P).

Les deux figures représentées peuvent donc être utilisées pour tirer quelque renseignements fort utiles pour le choix du dopant et de sa concentration, ainsi que les limites en température qui en découlent :

- Pour une température donnée le domaine des concentrations pour lesquelles on observe assez peu de variation du facteur $P(N,T)$ est beaucoup plus grand pour un dopage en atomes donneurs que pour un dopage en atomes accepteurs.
- Quant à l'effet de la température sur le même facteur $P(N,T)$, il est identique, à concentration égale, pour les deux types de dopants, jusqu'à une densité d'environ 10^{18}cm^{-3} . Au delà de cette valeur les différents coefficients de piézorésistivité du Silicium dopé P vont avoir une variation plus importante que ceux du même matériau dopé N. Pour leurs deux coefficients les plus importants respectivement π_{44} et π_{11} , on peut donc en conclure que globalement, sur l'étendue des concentrations étudiées la sensibilité thermique du premier est plus importante que celle du second.

A partir de ces observations, on peut donc dire qu'en vue d'une application donnée, le choix d'un type de dopants plutôt qu'un autre, ainsi que leur concentration, conditionnent les comportements piézo-resistif et thermique de l'élément sensible. Dans certains cas, ces deux paramètres peuvent être antagonistes ; dans d'autres, c'est la faisabilité technologique, qui ne permettra pas la mise en oeuvre d'une solution théoriquement optimum.

En pratique, dans la plupart des situations, il faudra faire un compromis entre tous ces paramètres pour aboutir à la solution adéquate.

1.3.3 Sensibilité de la membrane en silicium monocristallin :

La sensibilité d'un capteur de pression à membrane en silicium monocristallin d'épaisseur h et longueur a soumis à une pression P , peut se mettre sous la forme suivante [3] :

$$\frac{\Delta R}{R} = P \times \left(\frac{a}{h}\right)^2 (0.316\pi_l + 0.0202\pi_t) \quad (1.26)$$

Où π_l est le coefficient de piézorésistivité longitudinal et π_t est le coefficient de piézorésistivité transversal du silicium monocristallin.

P est la pression appliquée sur le capteur.

Sachant que pour le Silicium de type P, on a :

$$\pi_l = -\pi_t = \frac{\pi_{44}}{2} \quad (1.27)$$

Pour une membrane de surface de $2 \times 2 \text{ mm}^2$ et une épaisseur de $100 \text{ }\mu\text{m}$ nous avons tracé la sensibilité d'un capteur piézorésistif au silicium monocristallin en fonction de la pression de 0 à 80 kpa

Utilisant les valeurs expérimentales des coefficients de piézorésistivité longitudinal et transversal π_l et π_t pour un silicium monocristallin et gardant les mêmes dimensions qu'une membrane en silicium poreux-silicium, nous avons tracé l'évolution de la sensibilité du silicium monocristallin en fonction de la pression de 0 à 80kPa

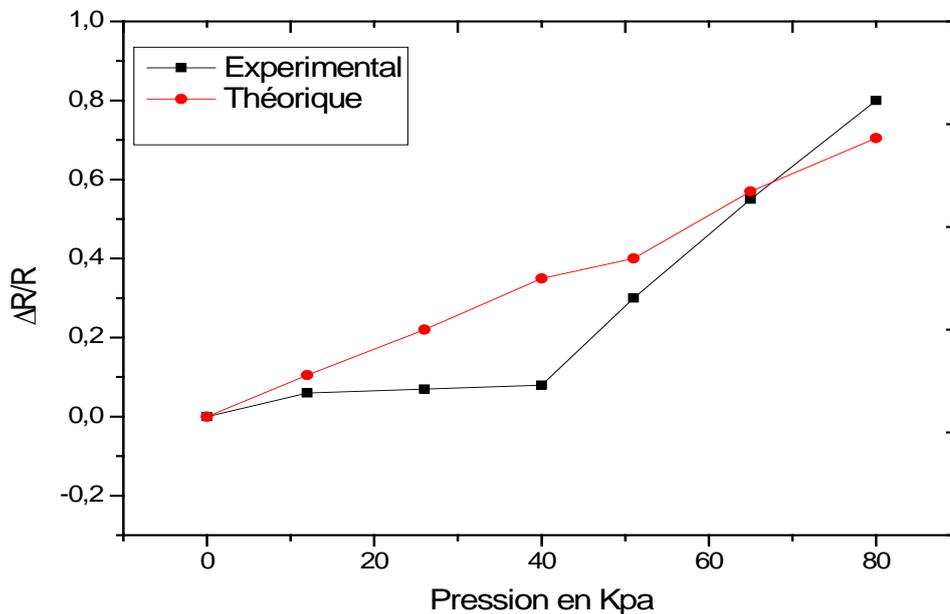


Figure (1.18) :Variation de la résistance relative d'une membrane en silicium monocristallin en fonction de la pression[3]

1.4 Principes de détection dans les capteurs de pression en silicium poreux :

Depuis sa découverte par L.T.Canham en 1990 [7], de la photoluminescence émise à température ambiante par le silicium poreux, de très nombreuses études ont été consacrées. Le silicium poreux, qui est essentiellement silicium cristallin avec des pores nanostructures, réalisé par la dissolution du silicium dans une solution d'acide fluoridrique au quel on ajoute de l'eau ou de l'éthanol. Cette nouvelle structure entre dans l'influence des différents paramètres tels que la concentration, densité de courant appliquée, temps de dissolution mais aussi le type du silicium et son orientation cristallographique. Le silicium poreux a été découvert comme un matériau de base dans la fabrication des capteurs de pression piézorésistifs à cause de ces propriétés piézorésistives. L'estimation de la quantité des pores s'exprime en pourcentage (porosité).

La membrane d'un capteur de pression piézorésistif à base de silicium poreux est constitué d'une membrane de Silicium monocristallin, sa face supérieur est réalisée avec une couche poreuse d'épaisseur 5 à 20% de l'épaisseur totale de la membrane. Nous avons présenté dans cette partie les caractéristiques piézorésistives, de la membrane poreuse, puis nous l'avons comparés avec celui du membrane monocristallin.

Un capteur de pression piézorésistif à base du silicium poreux peut se présenter suivant deux structures possibles :

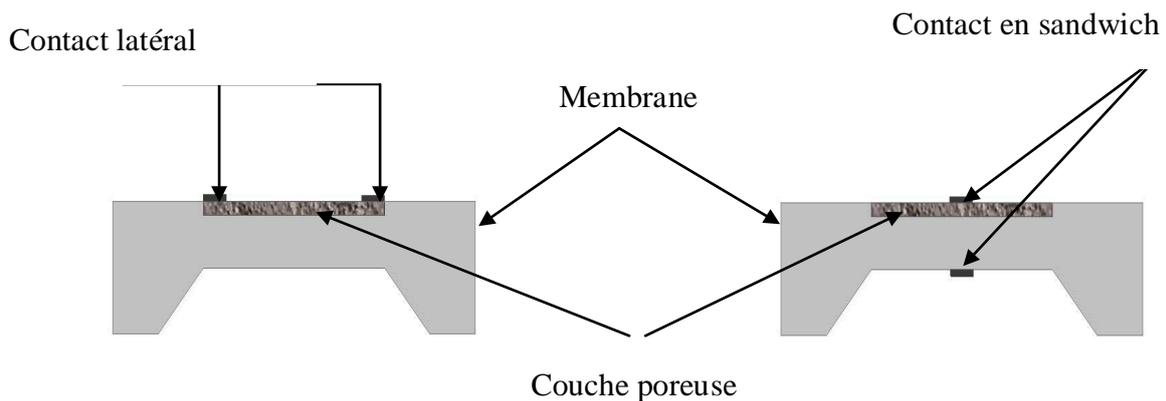


Figure (1.19) : (a) Structure de contact latéral
(b) Structure de contact en sandwich

La première est une structure latérale où les deux contacts en métal sont prises aux deux extrémités de la surface silicium poreux.

La deuxième est une structure en sandwich, où les deux contacts en métal sont prises sur les deux faces, silicium poreux, silicium.

En générale La couche poreuse représente 5 à 20% de l'épaisseur de la membrane.

1.4.1 Influence de la porosité sur le coefficient de piézorésistivité d'une membrane en silicium poreux :

Dans le but de reporter le comportement mécanique des membranes en Silicium poreux , C.Pramanik [9] a étudié le phénomène de piézorésistivité de ce type des capteurs , figure(1.20)

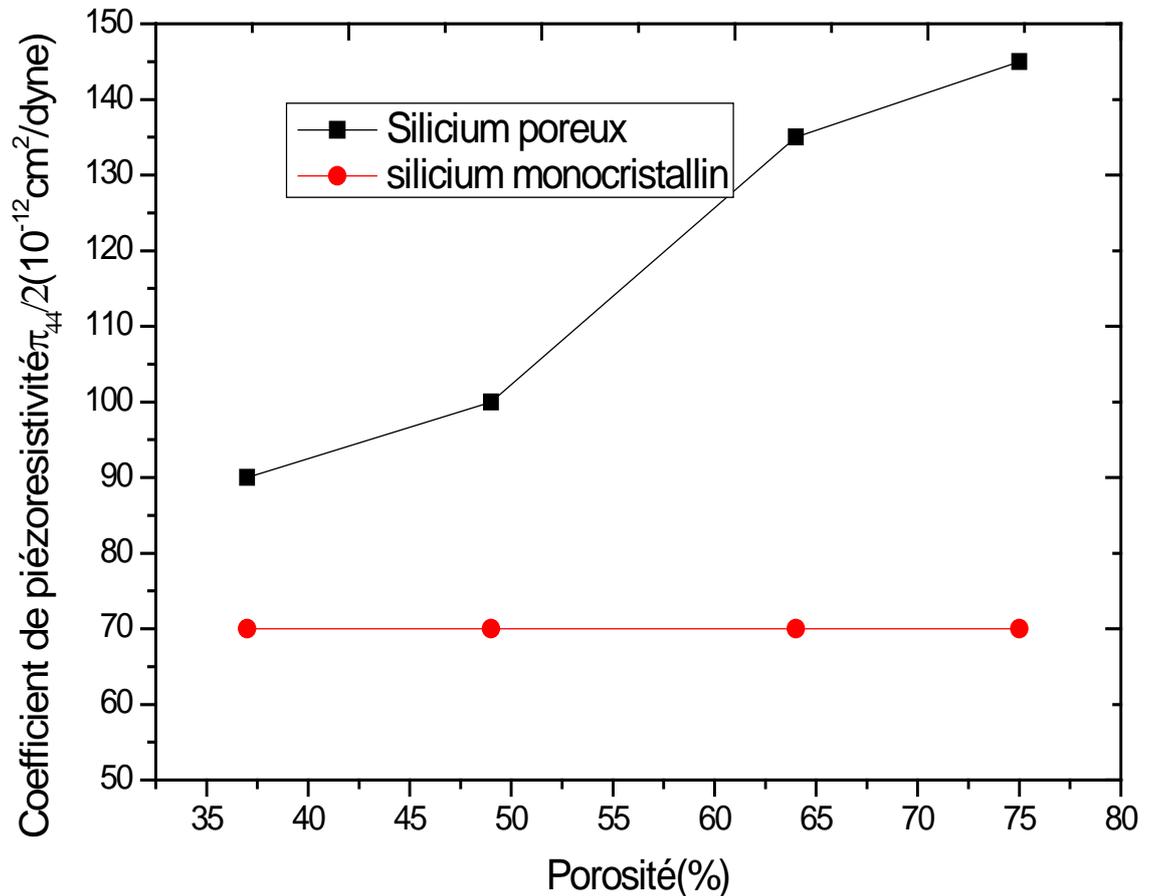


Figure (1.20) :Variation du coefficient de piézorésistivité en fonction de la porosité pour une épaisseur de $20\mu\text{m}$ [9]

La figure (1.20) montre la variation du coefficient de piézorésistivité en fonction de la porosité pour les deux types de capteurs, à membrane poreuse avec une épaisseur de $20\mu\text{m}$ de silicium poreux et à membrane au silicium monocristallin. On constate que ce coefficient augmente d'une façon quasi linéaire avec la porosité où il atteint la valeur $136 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ pour une porosité de 63% . Par ailleurs, comparant sa variation avec celle du silicium monocristallin , on s'aperçoit qu'elle présente une valeur élevée par rapport a celle du silicium monocristallin.

1.4.2 Sensibilité de la membrane en silicium poreux-silicium avec les différentes valeurs de l'épaisseur de la couche poreuse mais à une porosité de 63%:

Nous avons représenté l'évolution du comportement résistif de la membrane en silicium poreux-silicium en fonction de la pression pour les différentes valeurs de l'épaisseur de la couche poreuse, 5 μm , 10 μm , 15 μm et 20 μm , avec une porosité constante de 63% [9].

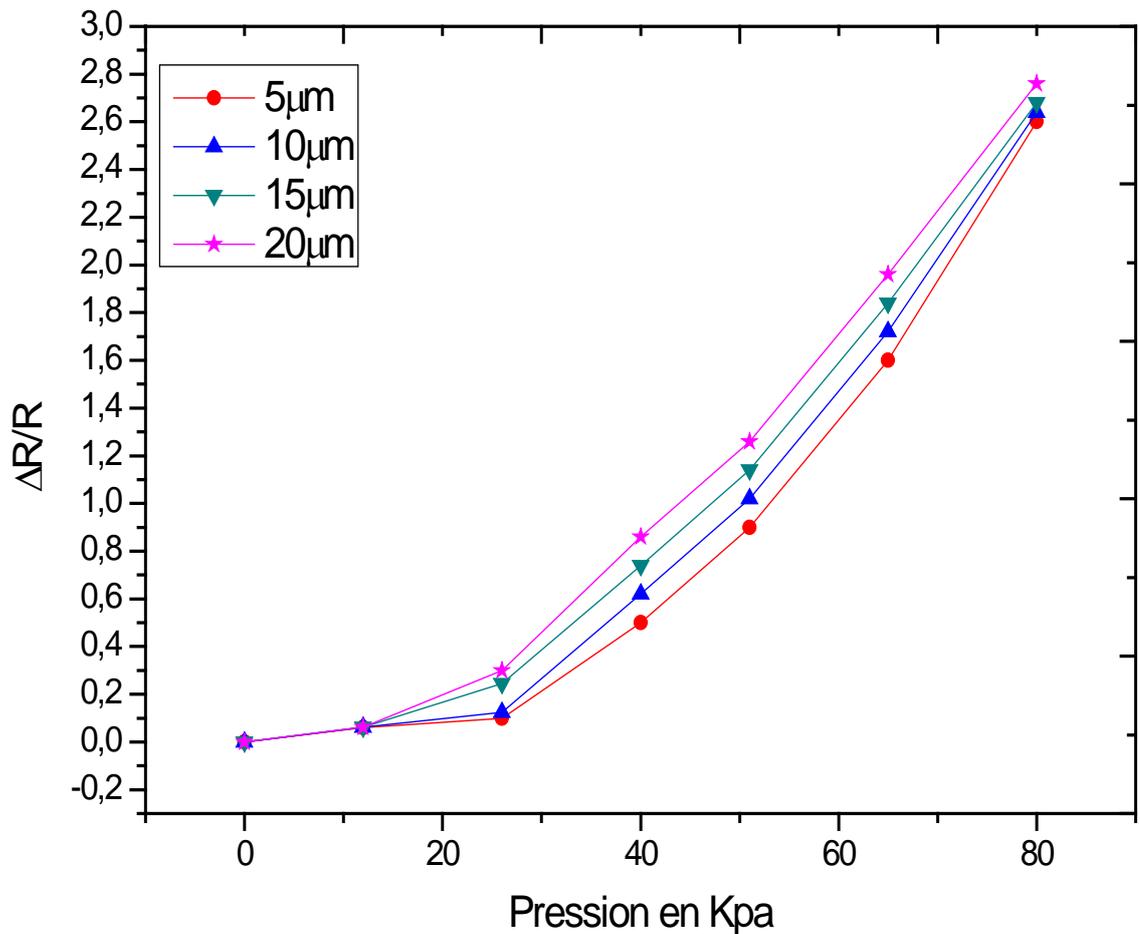


Figure (1.21) : Variation relative d'une membrane en silicium poreux-silicium en fonction de la pression pour les différentes valeurs de la couche poreuse [9].

La figure (1.21) regroupe les variations de la résistance relative pour une membrane à couche poreuse pour les différentes épaisseurs, cette figure montre bien l'effet de l'épaisseur de la couche poreuse du silicium sur la sensibilité de la membrane. On remarque que la sensibilité augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche poreuse de silicium poreux, la variation est importante et rapide surtout dans la gamme de pression de 28 à 80 kpa, l'allure est presque linéaire dans les quatre cas de l'épaisseur

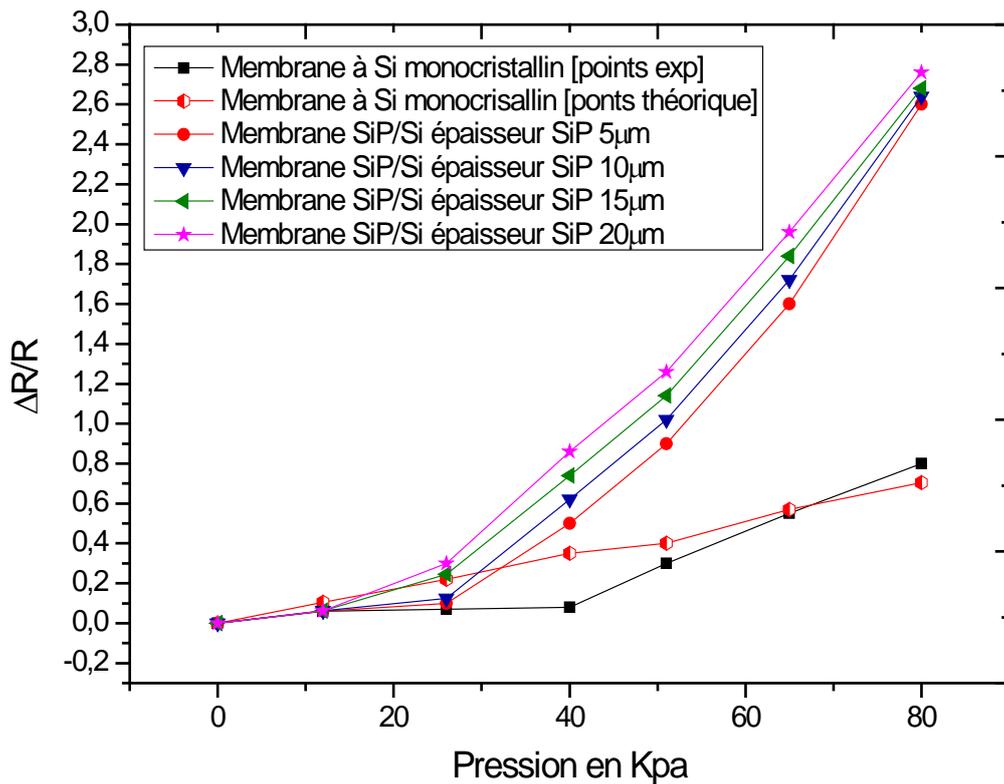


Figure (1.22) : Variation de la résistance relative de la membrane en silicium monocristallin et en silicium poreux -silicium

La figure 1.22 illustre la variation de la résistance relative en fonction de la pression pour les deux cas des membranes. Comparant ces résultats par celles obtenus par une membrane en silicium monocristallin, il est très remarquable que la sensibilité dans le cas d'une membrane poreuse est très élevée trois fois plus qu'un silicium monocristallin.

1.5 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la théorie de la piézorésistivité dans les capteurs de pression piézorésistifs à base de Silicium et Silicium poreux . On a observé l'influence de la profondeur de pénétration des dopants dans le Silicium , le dopage et la température sur les coefficients de piézorésistivité du Silicium , type N et type P.

La deuxième partie a été consacrée sur l'étude du Silicium poreux et ses caractéristiques mécaniques, L'étude théorique que nous avons présenté a montré que le silicium poreux peut être utilisé pour la détection de pression à cause de ses propriétés mécaniques ,la porosité du silicium poreux influe directement sur ses caractéristiques physiques tel que la variation relative de la résistance de la membrane, L'étude comparative que nous avons présenté a montré que la sensibilité d'une membrane en silicium poreux avec une porosité de 63% et une épaisseur de 20 μm est approximativement trois fois plus que celle des capteurs de pression monocristallin.

CHAPITRE 2

MODELISATION DES COEFFICIENTS DE TEMPERATURE DU PREMIER ET DU SECOND ORDRE α ET β

2.1 Introduction

Dans ce chapitre , nous présentons une approche théorique basée sur des modèles de mobilité dans le silicium monocristallin dopé par des atomes accepteurs , l'objet et d'analyser les deux coefficients de température de premier et deuxième ordre (α et β) en fonction du dopage.

Sachant que la mobilité dépend du dopage et de la température il est évident que les quatre piézorésistances du capteur de pression en dépendent également. En utilisant quatre modèles de mobilité nous avons tracé les variations des deux coefficients sur une plage du dopage comprise entre 10^{17} cm^{-3} et 10^{20} cm^{-3} [11].

Cette analyse se focalise aussi sur le comportement de la tension d'offset en fonction de la température. Elle permet de relier les coefficients thermiques étudiés à celui de la dérive thermique de la tension d'offset, nous avons tracé la variation de la tension d'offset en fonction de la température où nous avons comparé nos résultats avec le modèle expérimental présenté dans la littérature.

Les trois modèles qui ont été déjà utilisés [42], sont ceux de KLAASSEN[13], DORCKEL[14] et D'ARORA[14] , nous avons ajouté un quatrième modèle de MASETTI [16] ,avec lequel nous avons étudié le comportement des deux coefficients en fonction du dopage, cette modélisation a été comparée avec des résultats expérimentaux qui ont été obtenues par Bullis [17] . Afin de choisir le modèle adéquat , la deuxième étape de cette analyse consiste à étudier et à évoluer le comportement en fonction de la température de la tension d'offset du pont de Wheatstone.

2.2. Variation thermique des jauges piézorésistives :

La filière explorée dans cette étude se base sur la fabrication d'une membrane à la surface de laquelle sont implantées quatre résistances électriquement connectées en pont de WHEATSTONE[18][19]. L'application d'une pression provoque des contraintes internes dans la membrane, ce qui modifie, à son tour, la valeur de chacune des quatre résistances. La sensibilité d'une telle structure dépend de la position des résistances et de leurs dopages. Quant à l'existence de la tension d'offset, elle peut être due à de multiples facteurs [20].

Le cas idéal d'un capteur de pression piézorésistif consiste en l'utilisation de quatre jauges de type P, de valeur égale, montées en pont de WHEATSTONE (figure 2.1).

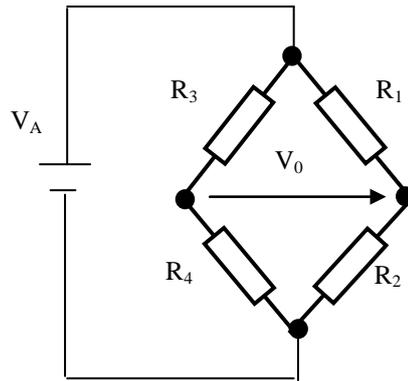


Figure 2.1 : Les quatre piézoresistances électriquement connectées en pont de WHEATSTONE

La loi de variation en température de chacune des piézorésistances s'écrit sous la forme suivante [20] :

$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2) \quad (2.1)$$

Avec $\Delta T = T - T_0$

Où α et β représentent respectivement les coefficients de température (TCR) du premier et du second ordre.

$R(T_0)$ est la valeur de la piézorésistance à une température de référence T_0 .

La réponse électrique à l'excitation en pression devrait être alors une droite avec une tension d'offset nulle. Dans la pratique, il n'en est rien, il existe toujours une valeur de tension non nulle pour une pression nulle. La connaissance de cette tension et de ses dérives thermiques est d'une importance primordiale dans la chaîne de mesure.

Cette tension de sortie s'écrit en fonction des variations de température de chacune des piézorésistances sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta V_0(T)}{V_A} = \frac{R_1(T_0)R_2(T_0)}{[R_1(T_0) + R_2(T_0)]^2} [(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T + (\beta_1 - \beta_2)\Delta T^2] - \frac{R_3(T_0)R_4(T_0)}{[R_3(T_0) + R_4(T_0)]^2} [(\alpha_3 - \alpha_4)\Delta T + (\beta_3 - \beta_4)\Delta T^2] \quad (2.2)$$

Avec $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ et $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ représentent respectivement les coefficients de température de premier et deuxième ordre des résistances R_1, R_2, R_3 et R_4 du pont de Wheatstone.

Dans cette étude nous présentons une approche théorique qui a pour objet l'analyse des deux coefficients de température du premier et du deuxième ordre α (ppm/°C) et β (ppm/°C²) des piézoésistances.

Notre analyse est basée sur l'étude de la mobilité qui est un paramètre électrique très important d'un matériau semi conducteur et qui est liée directement à ces deux coefficients de température.

2.3. Etude de la mobilité

La mobilité est par définition une grandeur positive qui mesure l'aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin. Elle est d'autant plus grande que le cristal est pur et que la masse effective des porteurs est faible. C'est un paramètre fondamental qui conditionne le fonctionnement des composants en haute fréquence [21].

Sachant que pour une piézoresistance rectangulaire la relation exprimant la valeur de sa résistance s'écrit :

$$R(T) = \rho(T) \frac{L}{S} \quad (2.3)$$

Où $\rho(T)$ est la résistivité électrique.

L : Longueur de la piézoresistance.

S : Section de la piézoresistance.

Pour une piézoresistance de type P, la mobilité des porteurs intervient dans l'expression de $\rho(T)$ à travers la relation :

$$\frac{1}{\rho(T)} = q\mu_p(T)N_A \quad (2.4)$$

Où q est la charge élémentaire.

$\mu_p(T)$ est la mobilité des trous (porteurs majoritaires) et N_A la concentration des dopants.

Introduisant l'équation (2.4) dans l'équation (2.3) on obtient :

$$R(T) = \frac{1}{q\mu_p(T)N_A} \frac{L}{S} \quad (2.5)$$

Avec le rapport $\frac{L}{S}$ constant.

Par les modèles utilisés, on détermine la variation thermique de la mobilité pour chaque dopage donné et faisant l'identification de l'équation (2.5) avec l'équation (2.1) on en déduit facilement par la méthode d'interpolation les deux coefficients de température α et β .

L'identification est basée sur les caractéristiques thermique de la résistivité et Comme la résistivité a une relation directe avec les deux coefficients de températures du premier et du second ordre , nous avons tracé les variations de la résistivité en fonction de la température paramétré en dopage pour une de dopage allant de $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

2.3.1. Modèle de KLAASSEN :

La variation de la mobilité en fonction de la température est donnée par l'expression suivante [13]:

$$\mu_{i,L} = \mu_{\max} \left(\frac{300}{T} \right)^{\theta_i} \quad (2.6)$$

Où $\mu_{i,L}$ est la mobilité due aux phonons acoustiques ; elle est inversement proportionnelle à la température.

μ_{\max} : la mobilité maximale.

L'indice i désigne le type des porteurs.

La valeur de coefficient θ_i est définie pour les deux types de porteurs:

$\theta_i=2.247$ pour un semi-conducteur de type P.

$\theta_e=2.285$ pour un semi-conducteur de type N.

La mobilité des porteurs majoritaires a été définie par l'équation suivante:

$$\mu_{i,L}(N_i) = \mu_{i,N} \left(\frac{N_{\text{ref},1}}{N_i} \right)^n + \mu_{i,c} \quad (2.7)$$

Avec :

$$\mu_{i,N} = \frac{\mu_{\max}^2}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \left(\frac{T}{300} \right)^{3n-1.5} \quad (2.8)$$

et

$$\mu_{i,c} = \frac{\mu_{\min} \mu_{\max}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \left(\frac{300}{T} \right)^{0.5} \quad (2.9)$$

Les coefficients μ_{\max} , μ_{\min} , $N_{\text{ref},1}$, n sont données par [26].

Finalement la mobilité résultante est:

$$\mu = \left(\frac{1}{\mu_{i,L}} + \frac{1}{\mu_{i,1}} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

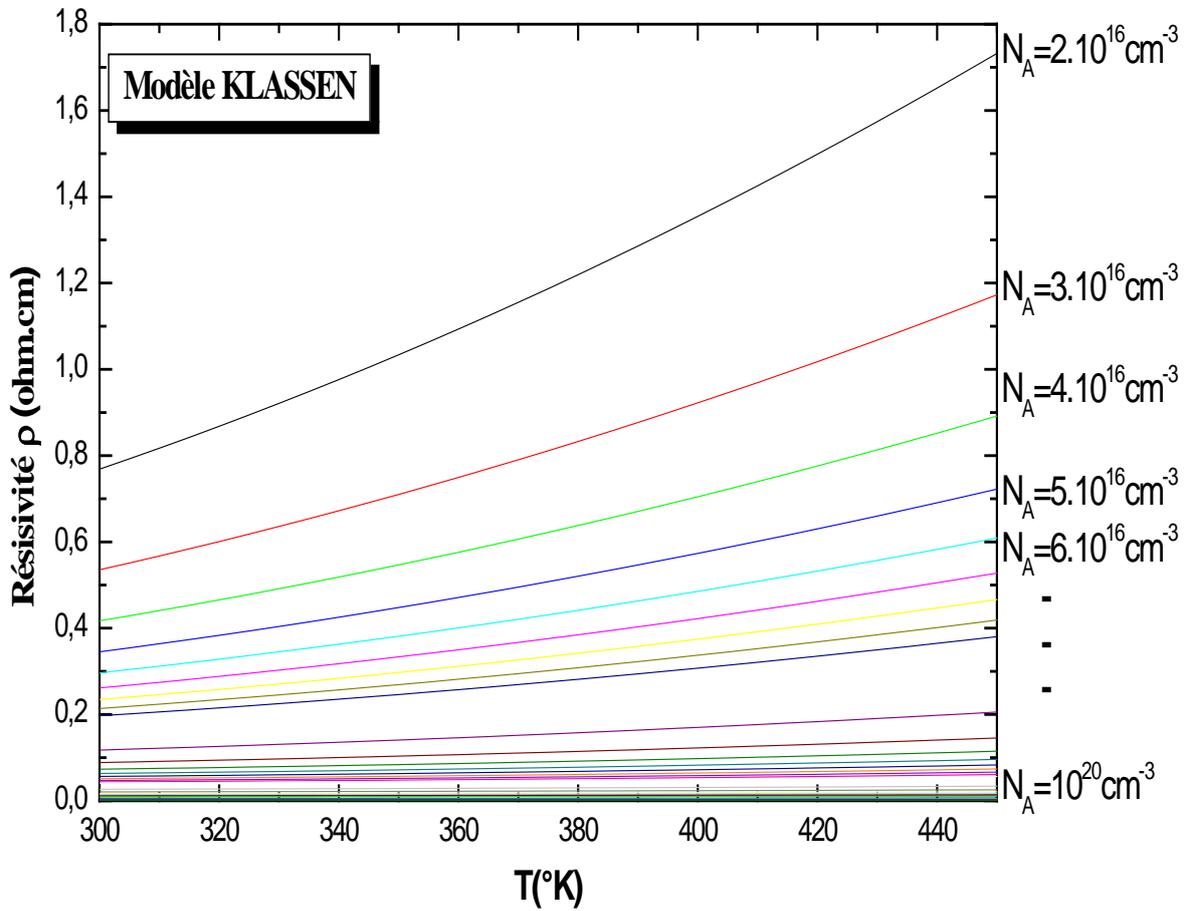


Figure (2.2) : Variation de la résistivité du silicium type P en fonction de la température paramétré en dopage par le modèle de Klaassen.

2.3.1.1. Coefficient de température du premier ordre (α) :

Nous avons tracé sur la figure (2.3) la variation du coefficient thermique du premier ordre en fonction du dopage à température ambiante

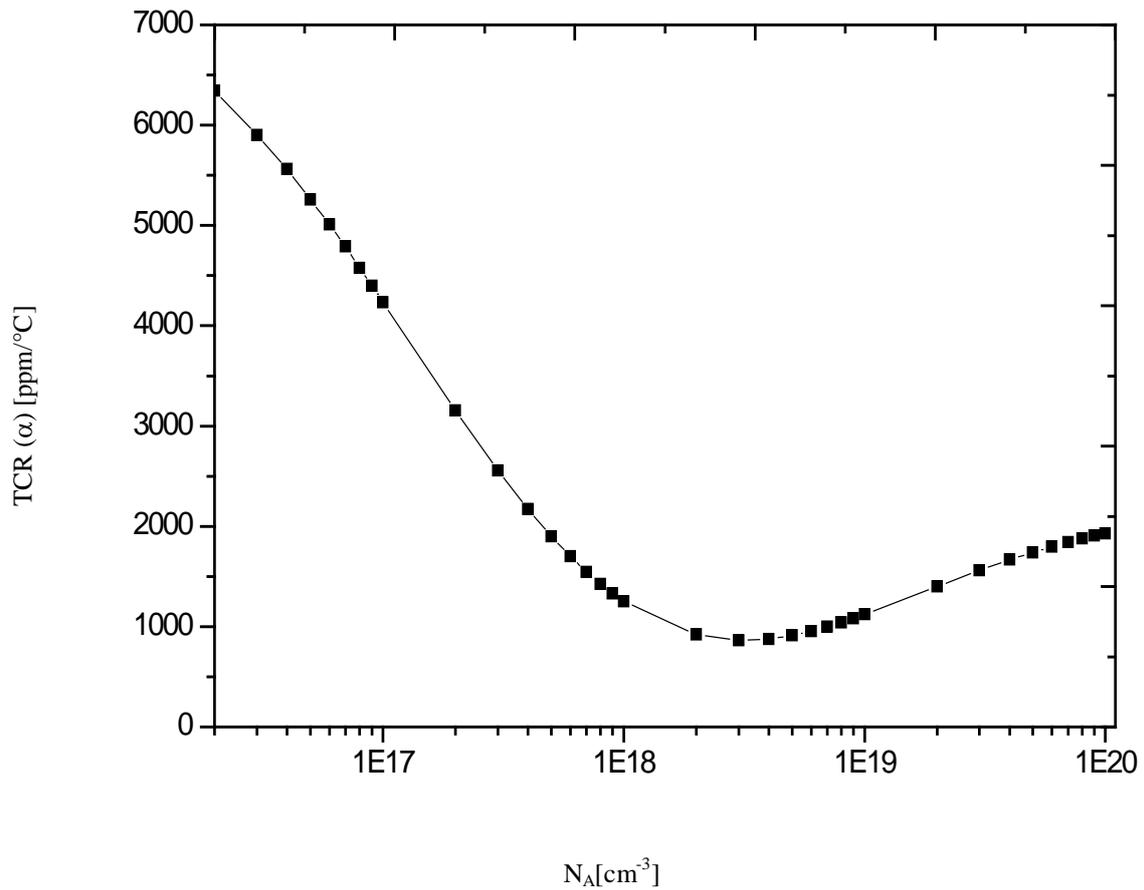


Figure 2.3 : Variation du TCR(α) en fonction du dopage.

2.3.1.2. Coefficient de température du second ordre (β) :

Nous avons tracé sur la figure (2.4) la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle.

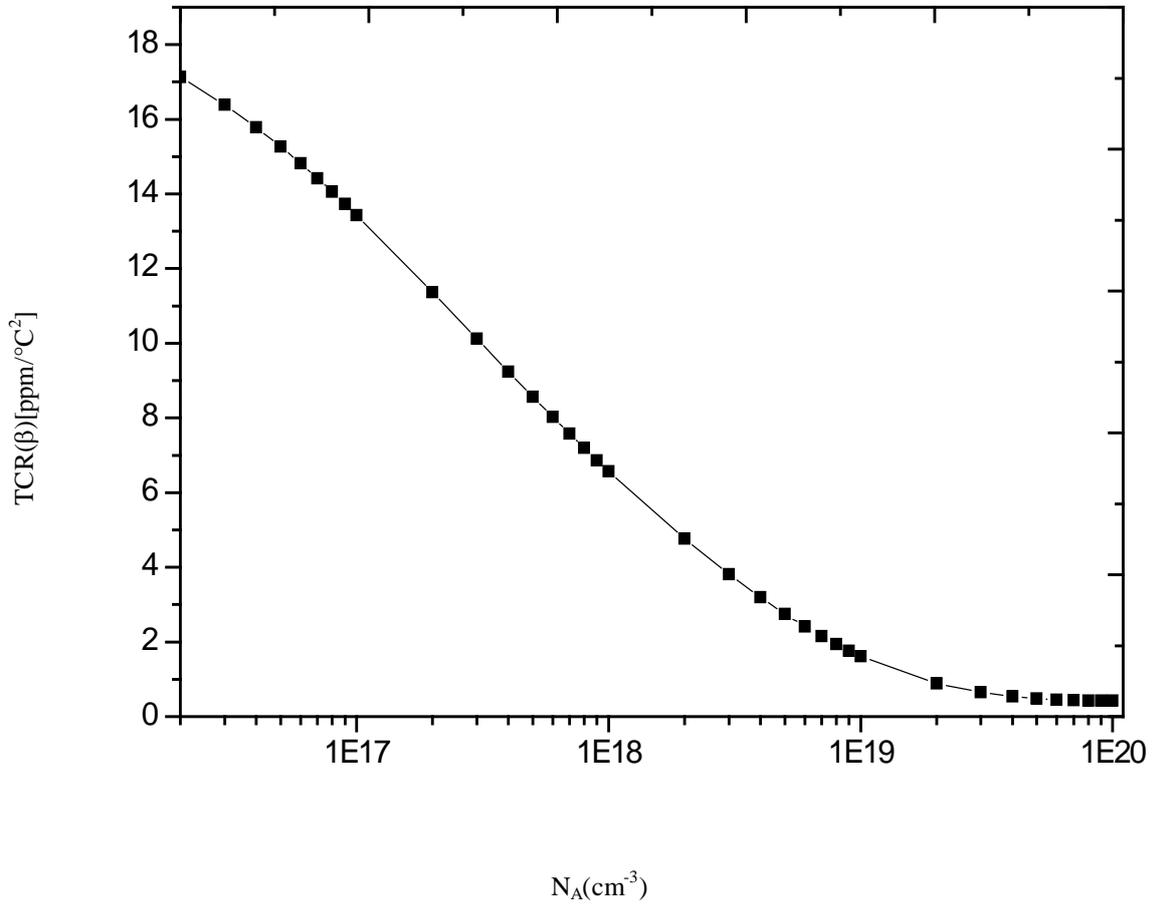


Figure 2.4 : Variation du β en fonction du dopage

2.3.2. Modèle de DORCKEL.

Le modèle de DORCKEL[14] permet de calculer les variations de la mobilité en fonction du dopage et en fonction des niveaux d'injections. Nous utilisons ce modèle afin d'étudier la mobilité en fonction du dopage pour des niveaux d'injection faible.

Ce modèle est décrit par les équations suivantes :

$$\mu_I = \frac{AT^{3/2} \left[\ln \left(1 + \frac{BT^2}{N} \right) - \frac{BT^2}{N + BT^2} \right]^{-1}}{N} \quad (2.11)$$

μ_I : Mobilité des impuretés.

N : Concentration des dopants.

A et B sont des paramètres dépendant de la nature des dopants (Silicium type N ou type P).

$$\mu_L = \mu_{L0} \left(\frac{T}{300} \right)^{-\gamma} \quad (2.12)$$

Les vibrations thermiques des atomes perturbent la périodicité du cristal et empêchent le mouvement des porteurs. Cette mobilité est notée μ_L (L =lattice).

μ_{L0} et γ dépendent de la nature des dopants et de la gamme de température et T varie entre 300 et 450°K.

$$\mu_{ccs} = \frac{2 \times 10^{17} T^{3/2} \left[\ln \left(1 + 8.28 \times 10^8 T^2 (pn)^{-1/3} \right) \right]^{-1}}{\sqrt{pn}} \quad (2.13)$$

pn : Le niveau d'injection, on va le considérer dans notre étude constant et faible.

$$\mu = \mu_L \left[\frac{1.025}{1 + \left(\frac{x}{1.68} \right)^{1.43}} - 0.025 \right] \quad (2.14)$$

$$x = \sqrt{\frac{6\mu_L (\mu_I + \mu_{ccs})}{\mu_I \mu_{ccs}}} \quad (2.15)$$

les valeurs numériques, des constantes sont :

$$\mu_{L0} = 495 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$$

$$\gamma = 2.2$$

$$A = 10^{17} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{K}^{-3/2}$$

$$B = 6.25 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-2}$$

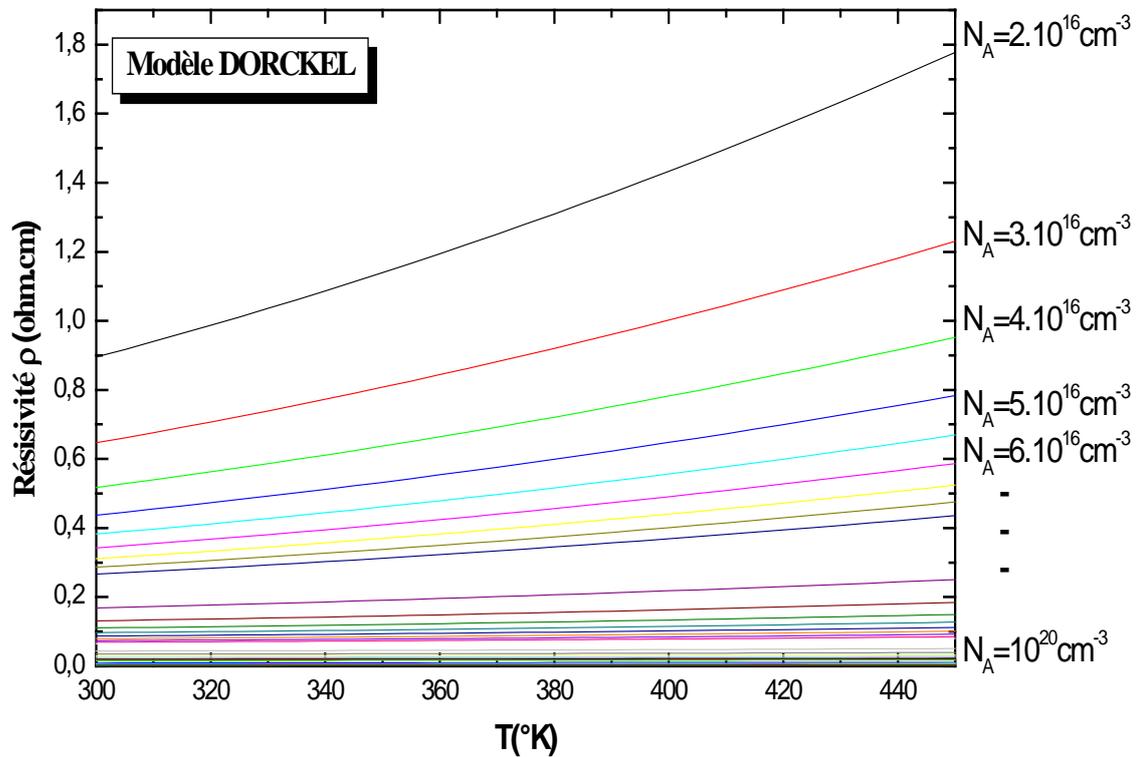


Figure (3.5) : Variation de la résistivité du silicium type P en fonction de la température paramétrée en dopage par le modèle de Dorckel

2.3.2.1. Coefficient de température du premier ordre (α) :

Nous avons tracé sur la figure (2.6) la variation du coefficient thermique de premier ordre α , en fonction du dopage à température ambiante .

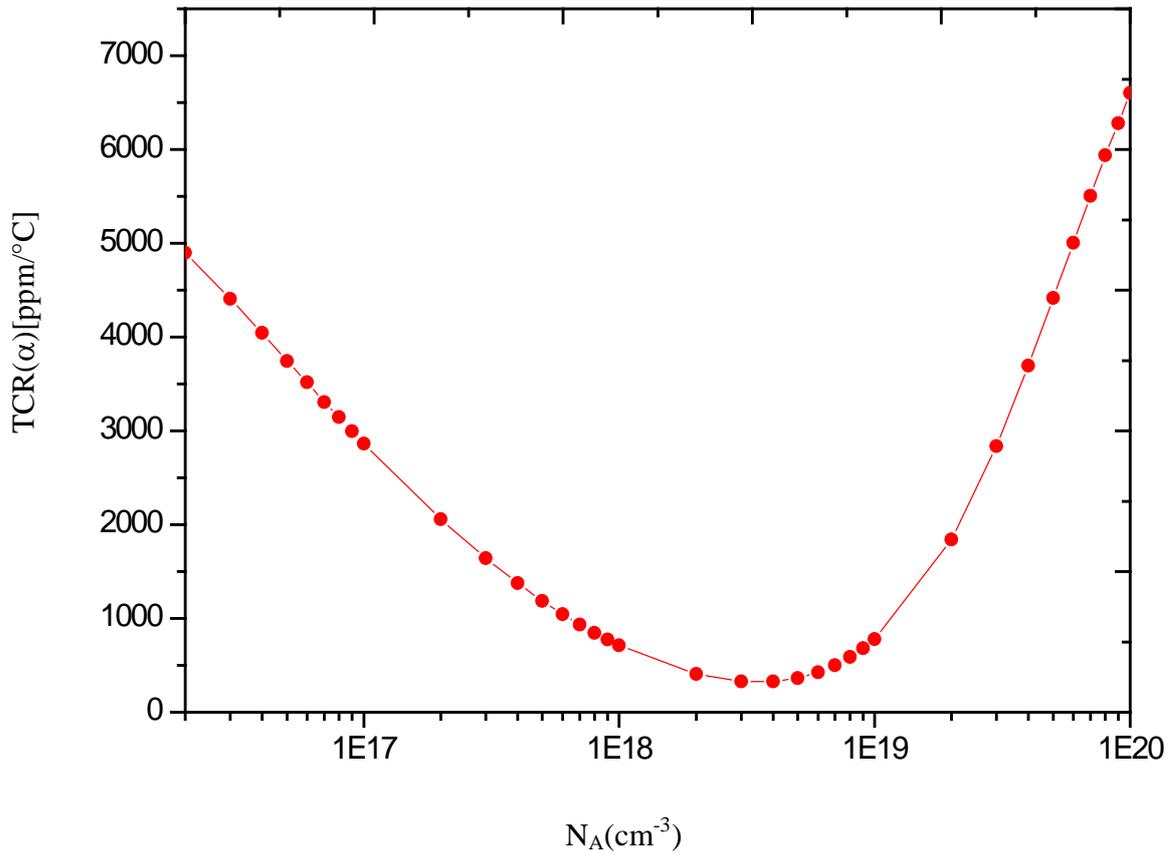


Figure 2.6 : Variation du α en fonction du dopage

2.3.2.2. Coefficient de température du second ordre(β) :

Nous avons tracé sur la figure (2.7) la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle .

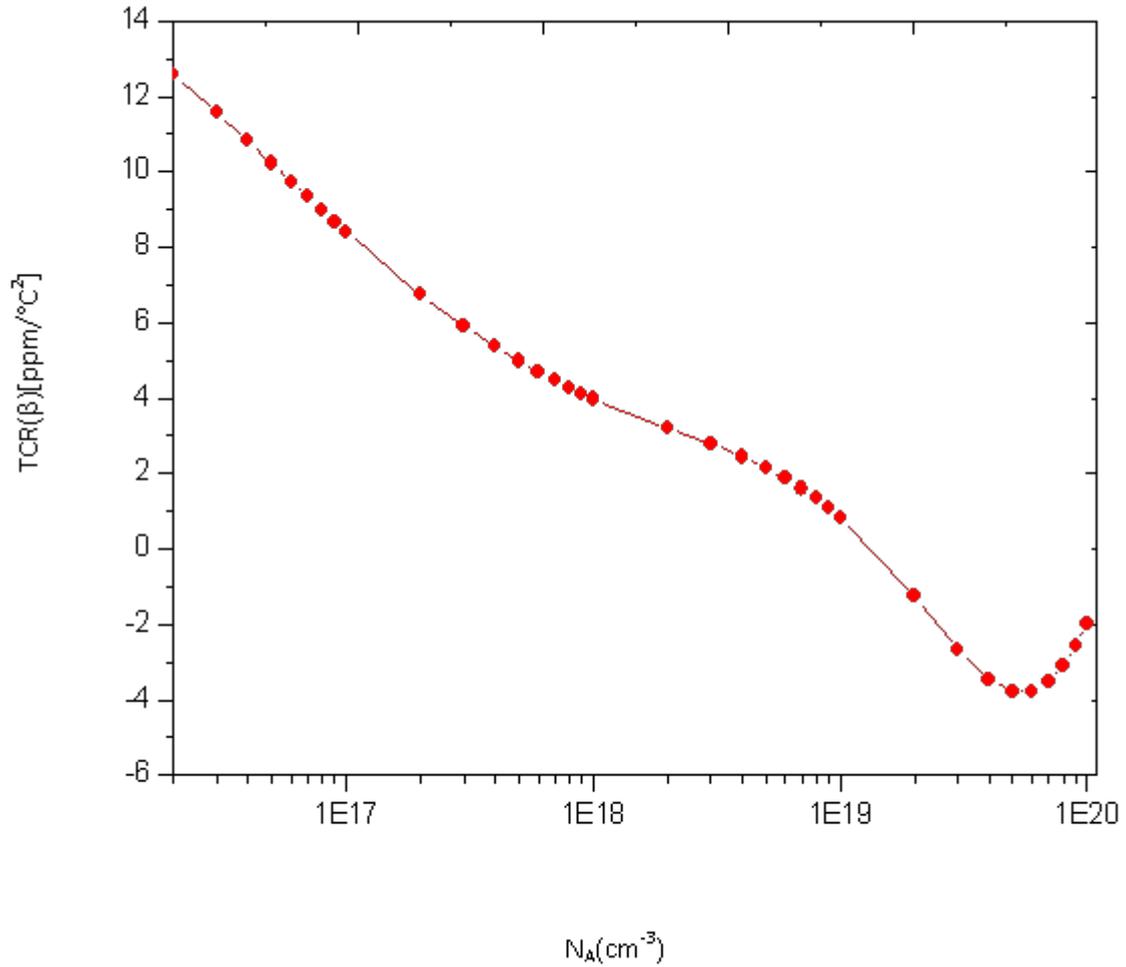


Figure 2.7 : Variation du β en fonction du dopage

2.3.3. Modèle de ARORA

La mobilité en fonction du dopage et en fonction de la température est donnée par ARORA [15], par l'expression :

$$\mu = \mu_{mn} + \frac{\mu_{0n}}{1 + \left(\frac{N_T}{N_{cn}}\right)^\theta} \quad (2.16)$$

Où

$$\mu_{mn} = 88 \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.57} \quad (\text{cm}^2 / \text{v.s}) \quad (2.17)$$

$$\mu_{0n} = 1250 \left(\frac{T}{300}\right)^{-2.33} \quad (\text{cm}^2 / \text{v.s}) \quad (2.18)$$

$$N_{cn} = 1.26 \times 10^{17} \left(\frac{T}{300}\right)^{2.4} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (2.19)$$

$$\theta = 0.88 \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.146} \quad (2.20)$$

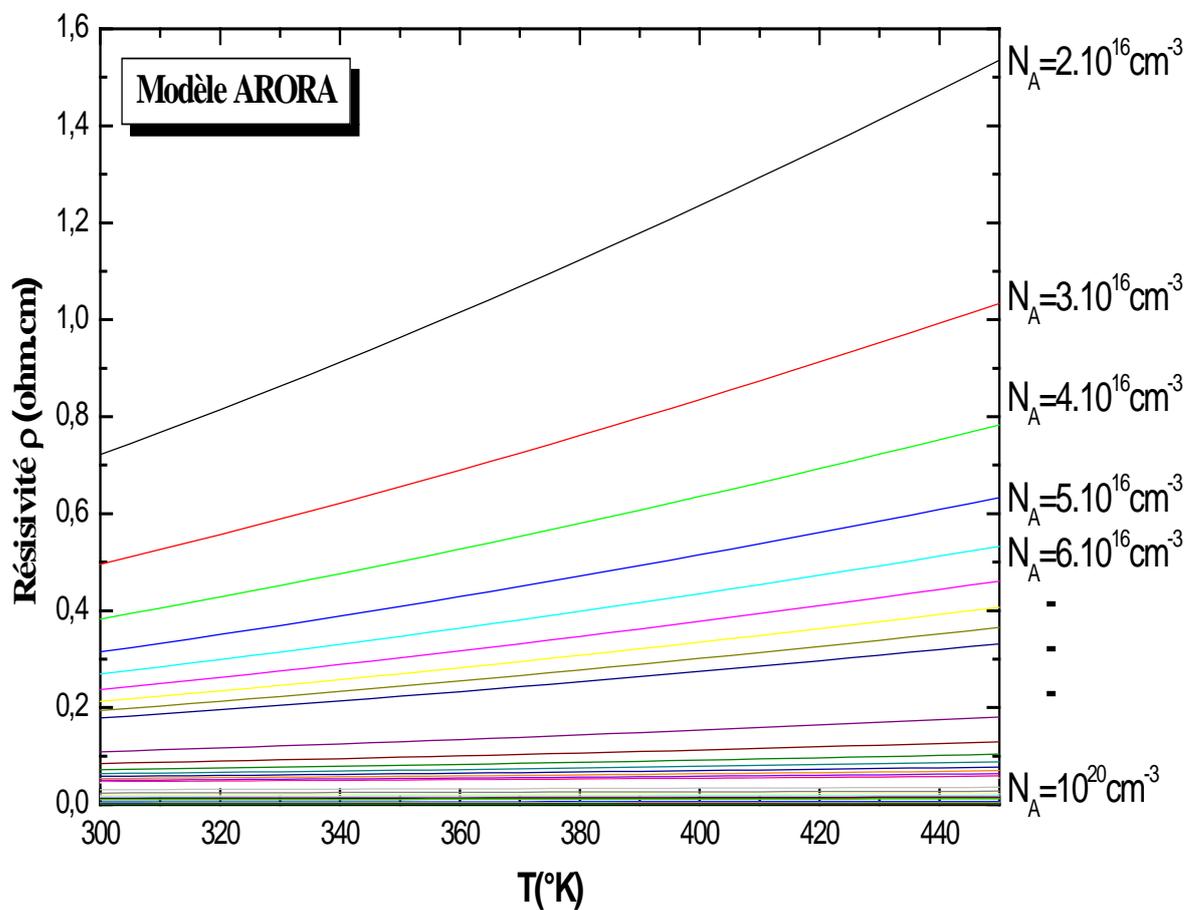


Figure (2.8) : Variation de la résistivité du silicium type P en fonction de la température paramétré en dopage par le modèle de Arora

2.3.3.1. Coefficient de température du premier ordre (α)

Nous avons tracé sur la figure (2.9) la variation du coefficient thermique de premier ordre α , en fonction du dopage à température ambiante .

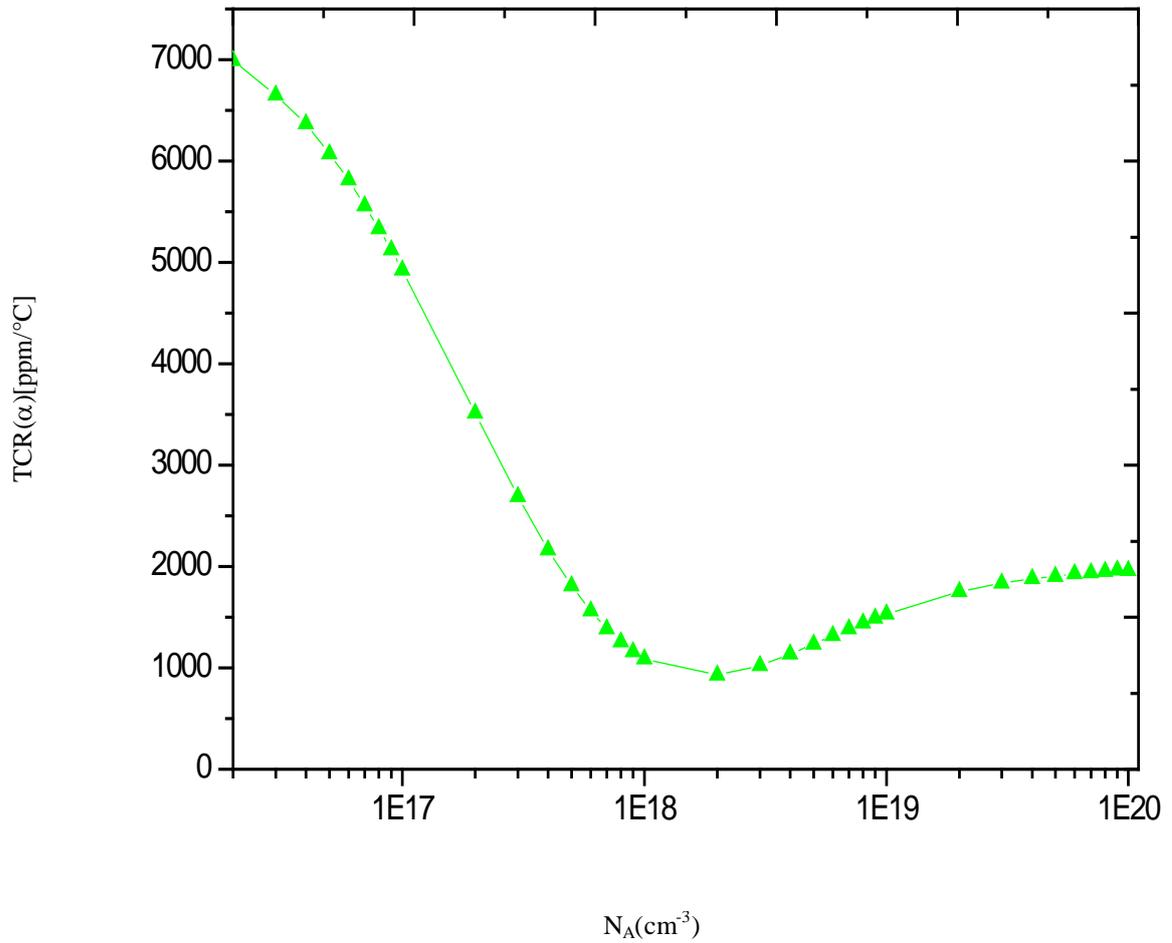


Figure 2.9. Variation du α en fonction du dopage

2.3.3.2. Coefficient de température du second ordre(β)

Nous avons tracé sur la figure (2.10) la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle .

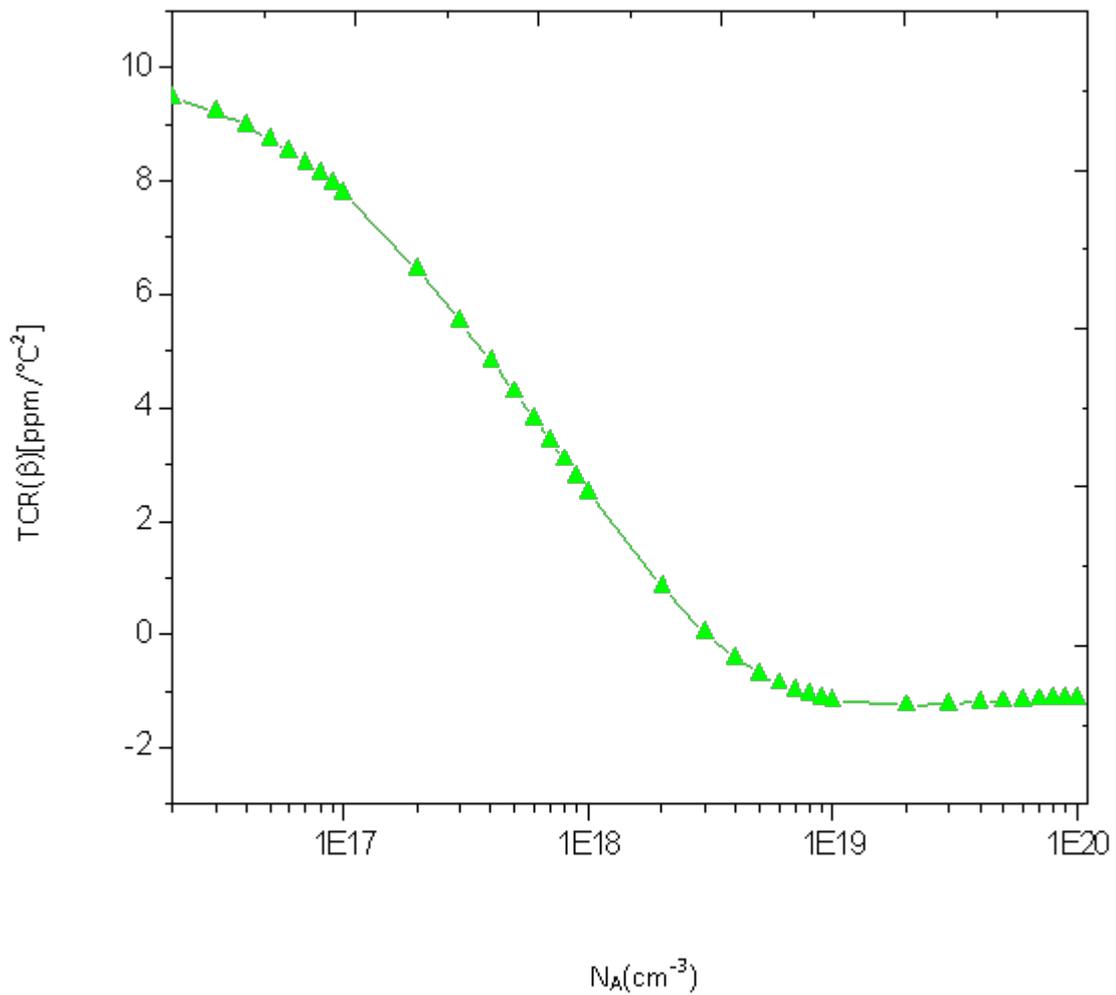


Figure 2.10 : Variation du β en fonction du dopage

2.3.4. Modèle de MASETTI

Masetti décrit son modèle de mobilité en fonction du dopage par l'expression suivante [16] :

$$\mu_p = \mu_0 e^{-N_c/N} + \frac{\mu_{max}}{1+(N/C_r)^a} - \frac{\mu_l}{1+(C_s/N)^b} \quad (2.21)$$

Pour un silicium de type P dopé par des atomes de Bore, le tableau ci-dessous définit les valeurs des paramètres liés à l'expression de la mobilité :

μ_0	μ_{max}	μ_l	C_r
44.9	470.5	29.0	2.23×10^{17}

C_s	a	b	P_c
6.10×10^{20}	0.709	2.09	9.23×10^{16}

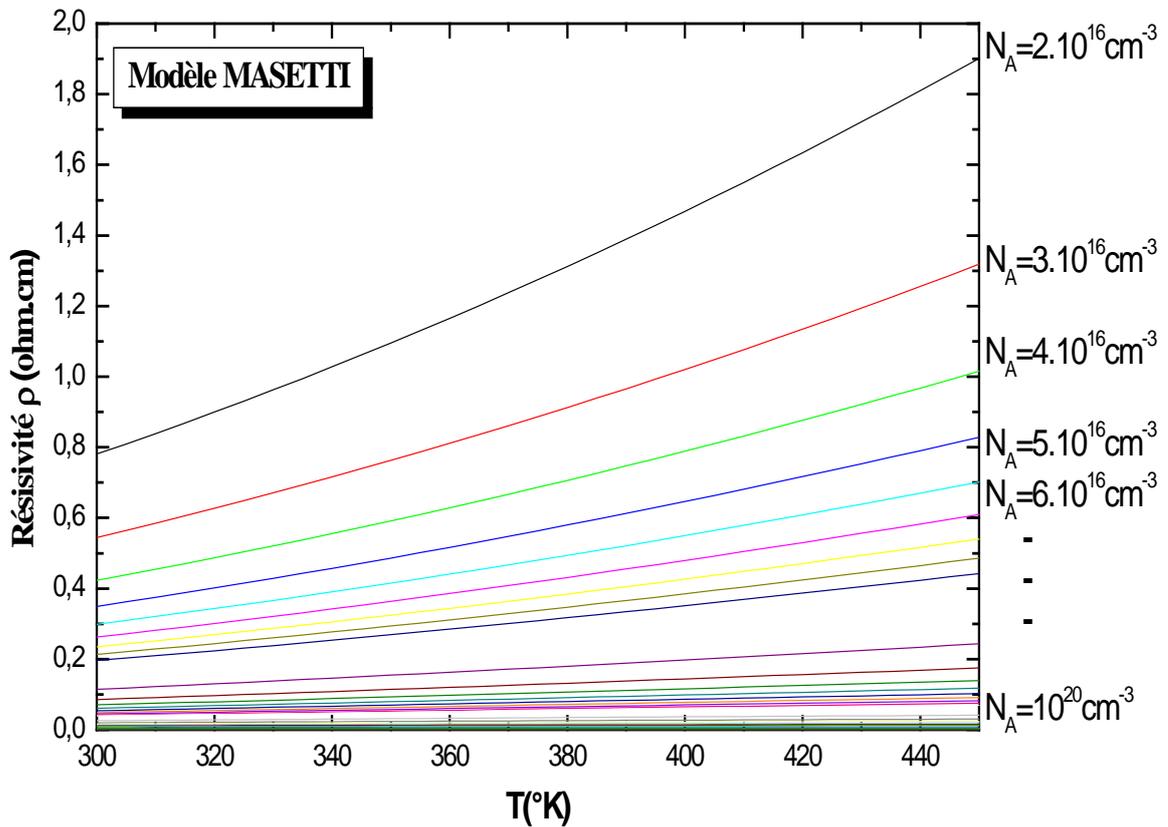


Figure (2.11) : Variation de la résistivité du silicium type P en fonction de la température par le modèle de Masetti

Pour une température varie entre 300 et 450k, les courbes de variation de la résistivité en fonction de la température ont les mêmes allures pour les quatre modèles étudiés, on a observé que la valeur de la résistivité augmente en fonction de la température et diminue en fonction de l'augmentation du dopage.

UNous avons tracé la variation du coefficient thermique de premier ordre α en fonction du dopage figure (2.12)

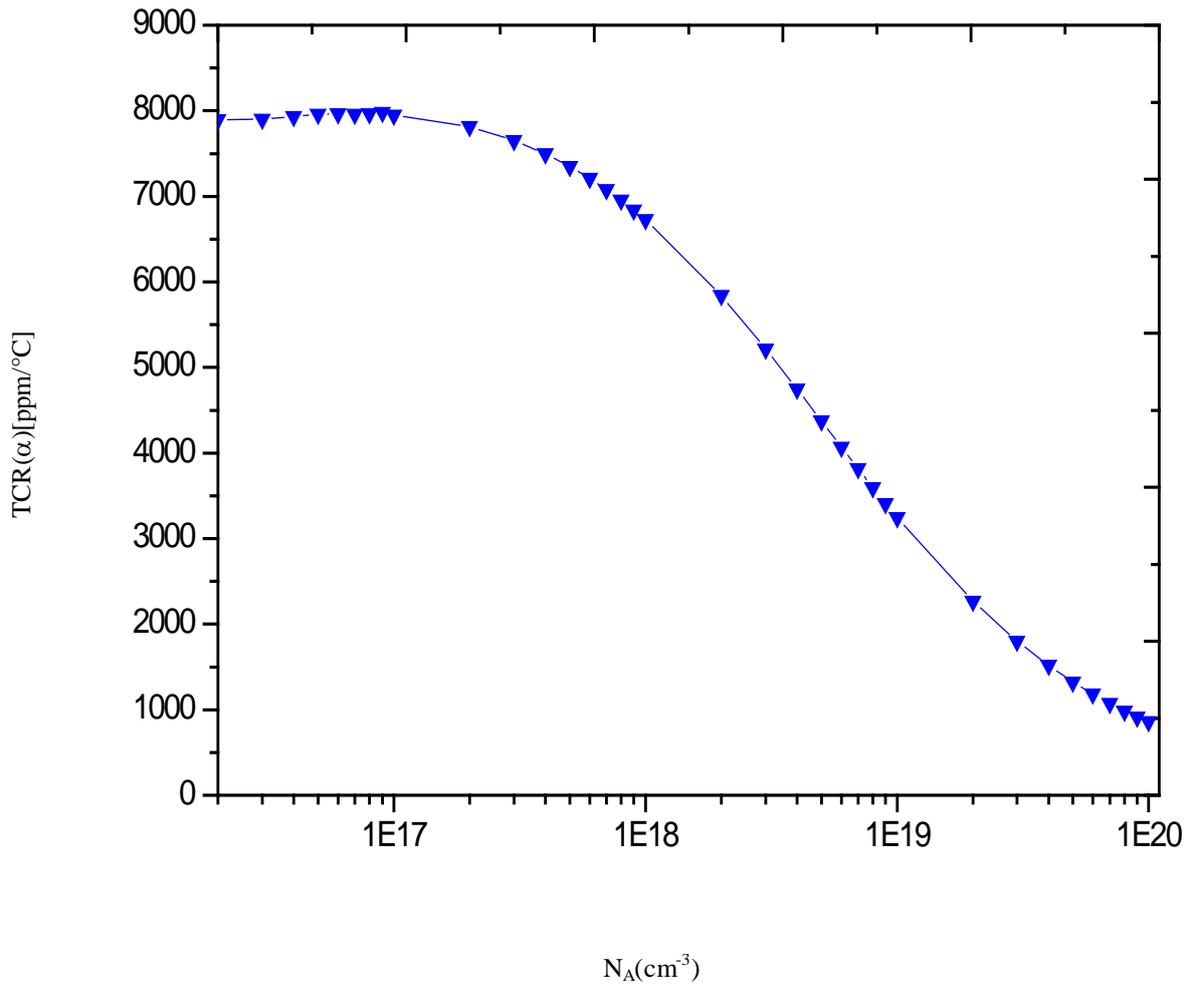


Figure 2.12 .Variation du α en fonction du dopage

2.3.4.2. Coefficient de température du second ordre (β) :

Nous avons tracé sur la figure (2.13) la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle.

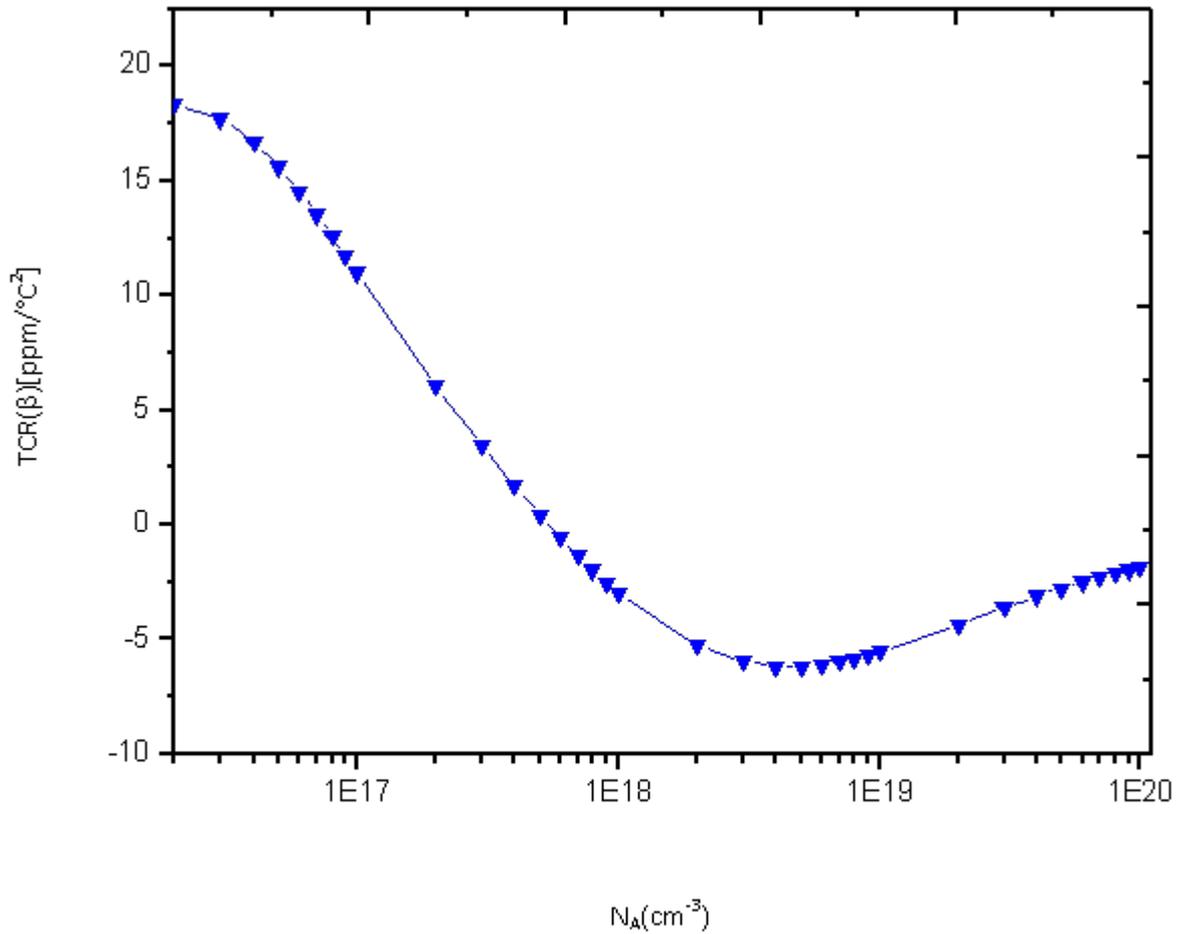


Figure 2.13 : Variation du β en fonction du dopage

2.3.5 Résultat expérimental de Bullis [17] :

La courbe 2.14 représente la variation de coefficient de température relevée par Bullis , dans une gamme de dopage variant entre 10^{18} à 10^{20} cm^{-3} , on remarque que le coefficient de premier ordre α a une valeur maximale de $1800 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ à 10^{18} cm^{-3} , cette valeur diminue pour atteindre une valeur minimale de $200 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ pour un dopage de $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, après il reprend sa croissance jusqu'à $1400 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ à 10^{20} cm^{-3}

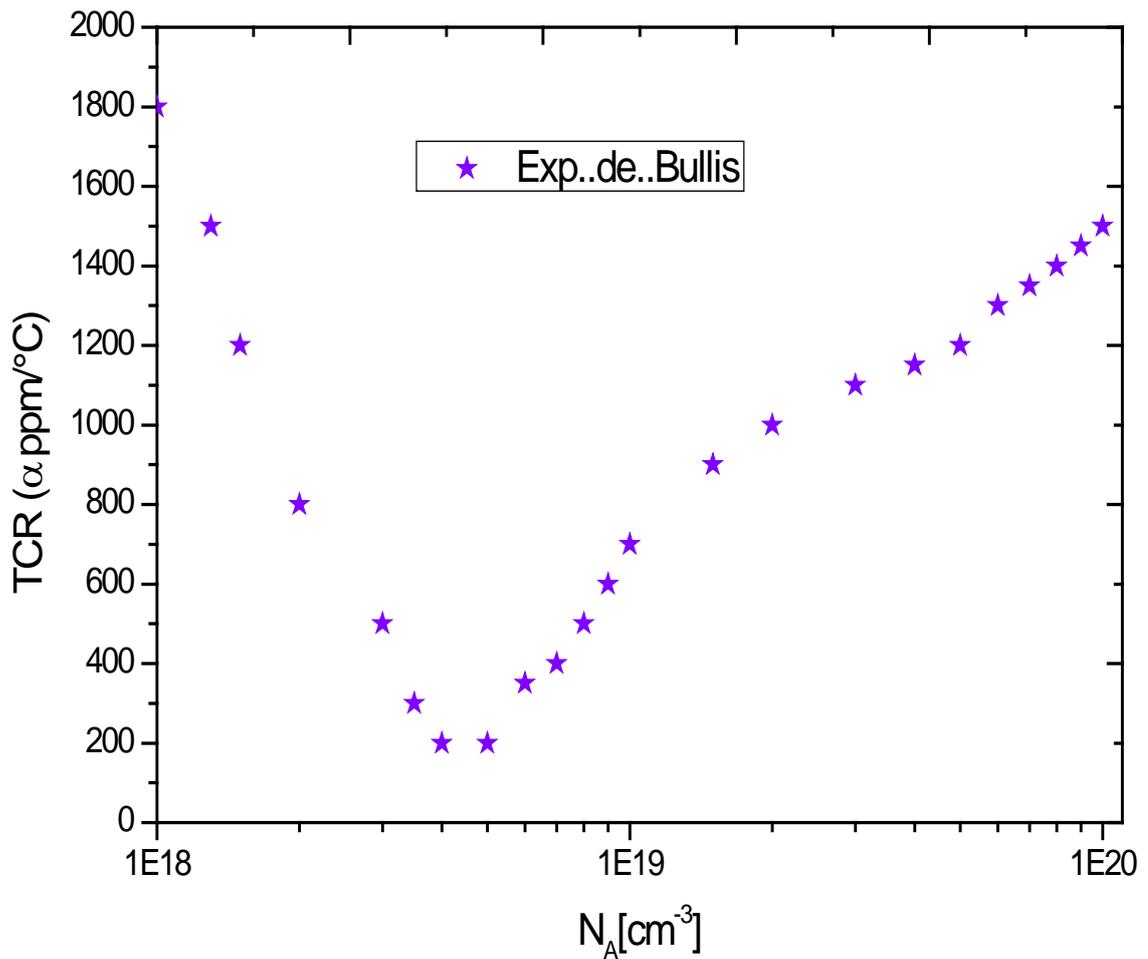


Figure (2.14) : Variation des valeurs expérimentales de α en fonction du dopage [17]

Pour une étude comparative nous avons regroupé les variations des deux coefficients en fonction du dopage et en les comparant avec les valeurs expérimentales de Bullis (Figure 2.15 et 2.16).

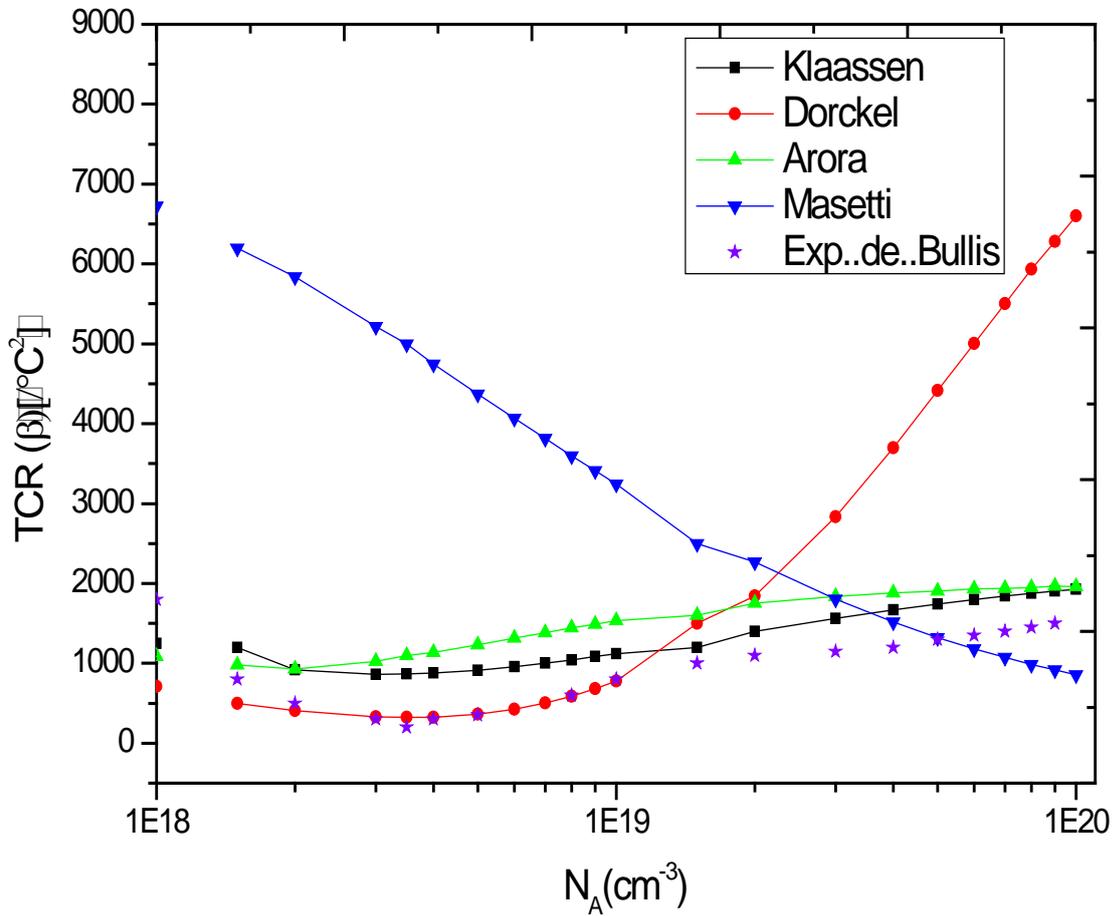


Figure (2.15) : Variation de α utilisant les quatre modèles, comparés avec celle de l'expérimentale de Bullis.

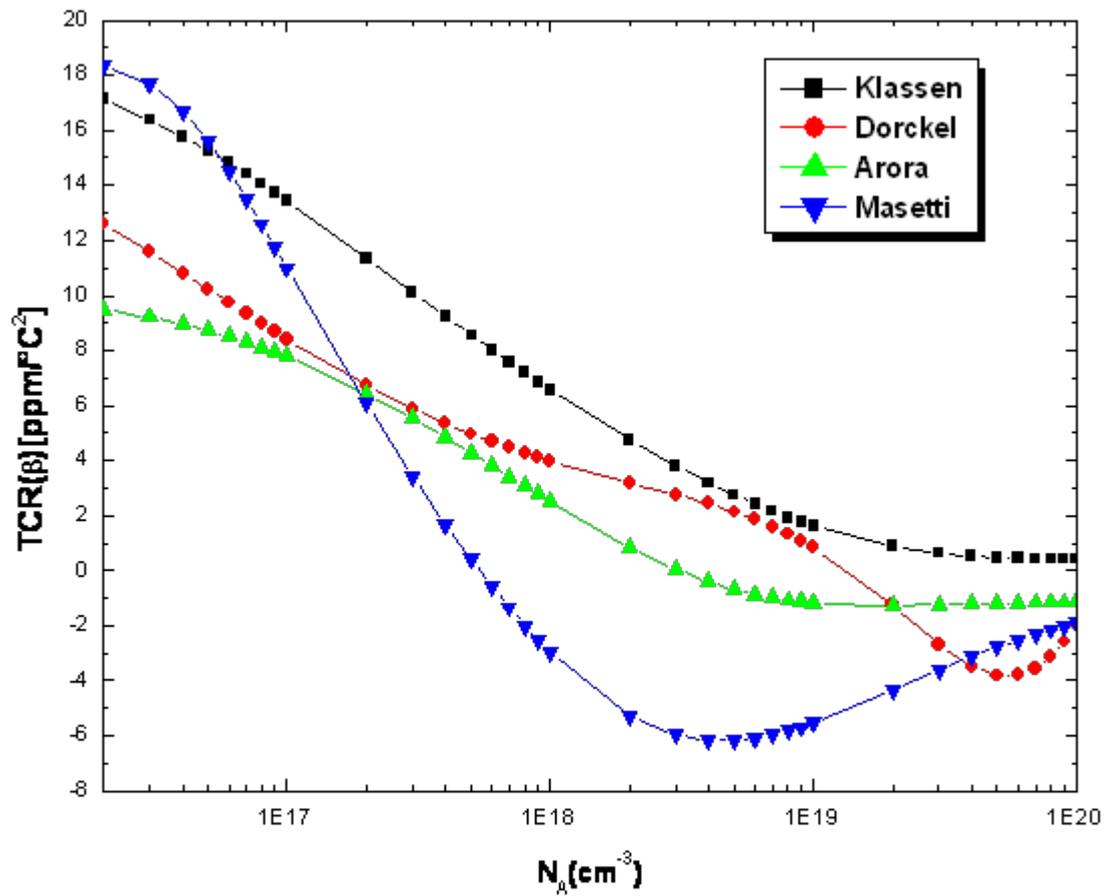


Figure 2.15 : Variations de β en fonction du dopage en utilisant les quatre modèles.

Les résultats obtenus montrent :

- Une variation importante des deux coefficients α et β en fonction du dopage .L'allure des courbes du coefficient du premier ordre α obtenue par les quatre modèles de mobilité et le modèle expérimental sont presque identiques, cependant le modèle expérimental présente des valeurs légèrement faibles par rapport à celles obtenues par les quatre modèles étudiés.
- Existence d'une valeur minimale de α pour tous les modèles, expérimental et théorique (200 à 900 ppm) qui varie selon le modèle utilisé.
- Dans toute la gamme du dopage, le modèle de MASETTI présente des valeurs beaucoup plus grandes que celles obtenues par les trois autres modèles.
- Dans l'intervalle du dopage indiqué 10^{17} à 10^{20} cm^{-3} , les courbes de variation du coefficient du deuxième ordre β obtenues par les trois modèles , Masetti, Arora et Dorckel , passent par zéro.

2.4. Tension d'offset :

L'aspect important de la modélisation des capteurs de pression piézo-resistifs a trait aux variations de la tension de décalage en fonction de la température. L'évolution des deux coefficients de température α et β en fonction du dopage, montre une faible variation pour les deux modèles Klaassen et Dorckel, pour cela nous avons choisi ces deux modèles pour présenter la variation de la tension d'offset en fonction de la température pour une tension d'alimentation constante $V_A=5v$.

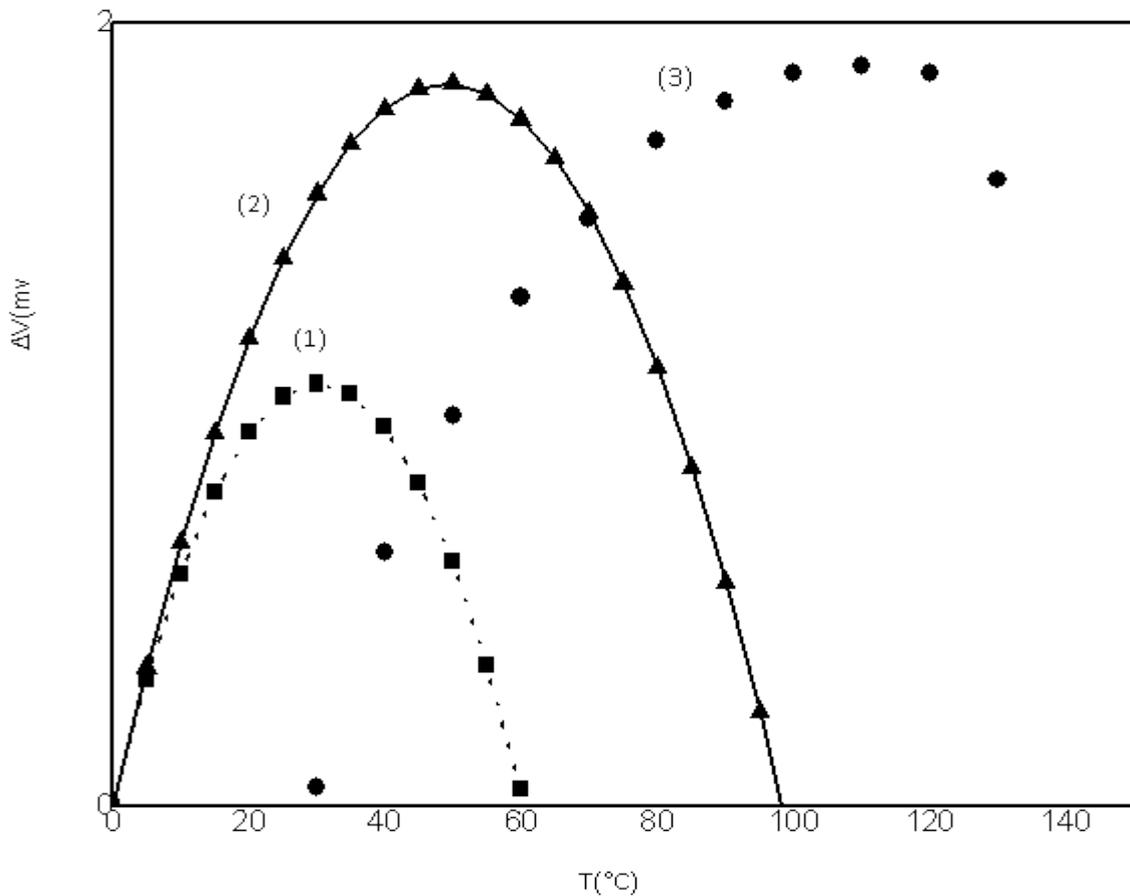


Figure 2.16 : Variation de la tension d'offset en fonction de la température

- (1) -- ■ - Klaassen [13]
- (2) —▲— Dorckel et Leturcq [14]
- (3) ●●● Points expérimentaux [12]

L'examen de ces trois courbes de variation de la tension d'offset montre que :

- l'aspect parabolique prédomine quand la température varie entre :
 - 0°C et 60°C pour le modèle de Klaassen.
 - 0°C et 100°C pour le modèle de Dorckel
 - 0°C et 120°C pour le modèle expérimental

- Une valeur maximale de la tension d'offset :
 - 1mv à 25°C pour Klaassen.
 - 1,75mv à 50°C pour Dorckel.
 - 1,85mv à 110°C pour le modèle expérimental

CHAPITRE 3

EFFETS COMBINES DU COEFFICIENT DE PIEZORESISTIVITE
 π_{44} et LES DEUX COEFFICIENTS DE TEMPERATURE α ET β
SUR LE COMPORTEMENT RESISTIF DU SILICIUM TYPE p

3.1 Introduction

Tous les travaux de recherche sur la technique d'implantation ionique montrent bien la variation de la concentration du dopage en fonction de la profondeur de pénétration des dopants dans le Silicium suivant différents modèles [23][24][25]. Nous avons vu dans les chapitres précédents que le dopage influe sur le coefficient de piézorésistivité π_{44} et sur les coefficients de température du premier et du second ordre α et β . Ces hypothèses physiques permettent la création d'un nouveau modèle physique traduisant les effets thermiques et mécaniques sur le comportement résistif du Silicium.

3.2 Présentation du modèle :

Le modèle tient compte des importantes variations des coefficients α , β et π_{44} en fonction du dopage pour déterminer le comportement résistif du silicium. Un développement mathématique basé sur des équations physiques dans le champ de la piézorésistivité nous a permis, de proposer un modèle comportant deux expressions analytiques de variations de la résistance du silicium. Dans le premier cas où le silicium est sous une pression nulle ce qui montre théoriquement l'absence des contraintes internes ($\sigma=0$), nous présentons l'expression de variation de la résistance en fonction de la température selon les deux coefficients de température de premier et du second ordre (α et β), dans le deuxième cas où on a une variation thermique négligeable, c'est-à-dire autour de la température ambiante ($T=T_0$), nous présentons la variation de la résistance seulement en fonction de deux paramètres, contrainte σ et coefficient de piézoésistivité π_{44} [26][27].

3.2.1 Effet thermique et mécanique sur le comportement résistif du silicium

L'influence de la température T et des contraintes mécaniques σ dues à l'application d'une pression P sur le silicium est généralement rapprochée par l'équation suivante [5] :

$$R(\sigma, T) = R(0, T)(1 + \pi_{44}(N, T)\sigma) \quad (3.1)$$

$R(\sigma, T)$ est la résistance du silicium sous l'effet des deux paramètres, température T et contrainte σ

$R(0, T)$ est la résistance à $\sigma = 0$ (pression nulle), elle dépend uniquement de la température selon un polynôme du deuxième ordre, sous la forme suivante :

$$R(0, T) = R(0, T_0) \left(1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 \right) \quad (3.2)$$

$R(0, T_0)$ est la résistance à température ambiante et à pression nulle, $\sigma = 0$ et $T = T_0$

α et β sont les coefficients de température du premier et du second ordre respectivement

$\pi_{44}(N, T)$ est le coefficient de piézorésistivité, c'est une fonction du dopage N et de la température T, pour une concentration des atomes de bore comprise entre $[10^{16} \text{ cm}^{-3} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}]$, ce coefficient a été approximé par la formule suivante [5]:

$$\pi_{44}(N, T) = \pi_{44}(N, T_0)(1 + \gamma(T - T_0)) \quad (3.3)$$

Où $\pi_{44}(N, T_0)$ est le coefficient de piézorésistivité à température ambiante T_0 et il dépend de la concentration des dopants N.

γ est le coefficient de la dérive thermique de $\pi_{44}(N, T)$, σ est la contrainte interne due au silicium lors de l'application d'une pression

On pose $\Delta T = T - T_0$, donc:

$$R(\sigma, T) = R(0, T_0) \left(1 + \alpha(\Delta T) + \beta(\Delta T)^2 \right) \left(1 + \pi_{44}(T_0) \left(1 + \gamma \Delta T \right) \sigma \right) \quad (3.4)$$

Développant cette formule nous aurons :

$$R(\sigma, T) = R(0, T_0) \left[\begin{array}{l} 1 + \alpha(\Delta T) + \beta(\Delta T)^2 + \pi_{44}(T_0)\sigma + \alpha\pi_{44}(T_0)\sigma(\Delta T) + \beta\pi_{44}(T_0)\sigma(\Delta T)^2 + \\ \pi_{44}(T_0)\sigma\gamma(\Delta T) + \alpha\pi_{44}(T_0)\sigma\gamma(\Delta T)^2 + \beta\pi_{44}(T_0)\sigma\gamma(\Delta T)^3 \end{array} \right]$$

On suppose que les termes en ΔT^3 sont négligeables donc :

$$R(\sigma, T) = R(0, T_0) \left[1 + \pi_{44}(T_0)\sigma + [\alpha + \alpha\pi_{44}(T_0)\sigma + \pi_{44}(T_0)\sigma\gamma](\Delta T) + [\beta + \beta\pi_{44}(T_0)\sigma + \alpha\pi_{44}(T_0)\sigma\gamma](\Delta T)^2 \right]$$

La dérive thermique du coefficient de piézorésistivité γ a une variation négative [5], elle a le même ordre de grandeurs que α pour cela on peut admettre que $|\alpha| \approx |\gamma|$ et $\alpha\gamma$ est négligeable par rapport à β dans ce cas il est évident que :

$$\alpha + \gamma \rightarrow 0 \text{ et } \beta + \alpha\gamma \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow R(\sigma, T) = R(0, T_0) \left(1 + \pi_{44}(T_0)\sigma + \alpha(\Delta T) + \beta(\Delta T)^2 \right) \quad (3.5)$$

La formule (3.5) décrit les effets combinés des deux paramètres, la pression et la température selon les trois coefficients, le premier est dû à la piézorésistivité du Silicium, les deux autres coefficients sont dus au comportement thermique du Silicium.

3.2.1.1 Méthodologie de discrétisation

Comme nous l'avons vu précédemment, la concentration des dopants des atomes de Bore, influe d'une façon directe sur les coefficients de piézorésistivité ainsi sur les coefficients de température du premier et du second ordre, pour cette raison nous avons pensé à étudier l'influence du profil de dopage sur le comportement résistif du Silicium.

Sachant que la majorité des porteurs, soient minoritaires ou majoritaires participent à la conduction, à ce moment là nous avons tenté au premier lieu à discrétiser tout le profil en deux segments, chacun correspond aux dopages N_1 et N_2 (figure 3.1), ce qui implique que le courant dans la région dopée sera divisé en deux, dans ce cas on peut considérer que la résistance du silicium peut être équivalente aux deux résistances $R_1(\sigma, T)$ et $R_2(\sigma, T)$ montées en parallèle où $R_1(\sigma, T) \propto (N_1)$ et $R_2(\sigma, T) \propto (N_2)$ (figure 3.1).

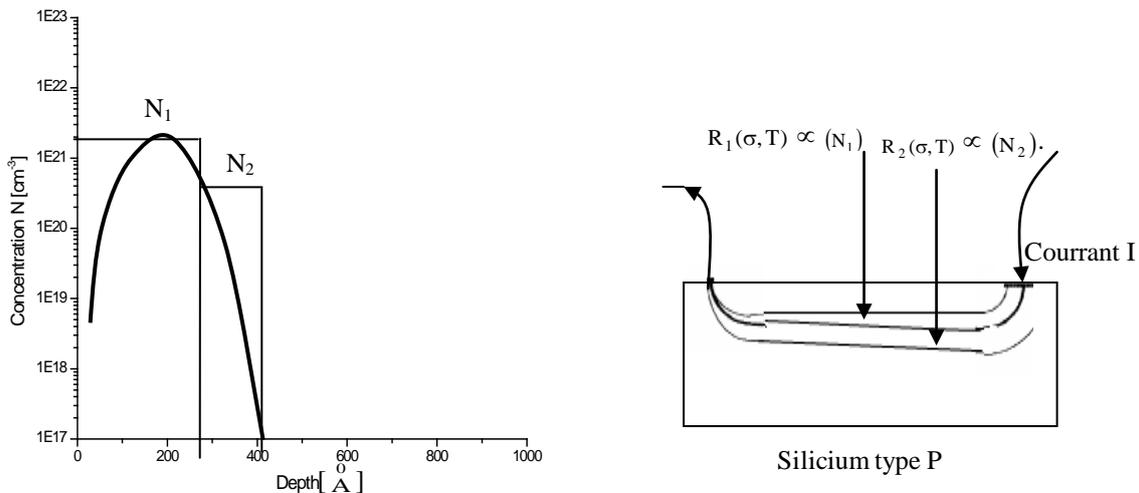


Figure 3.1 Méthodologie de discrétisation de dopage en deux résistances montées en parallèle

Dans ce cas la résistance équivalente peut être écrite sous l'expression suivante :

$$R_{eq}(\sigma, T) = \frac{R_1(\sigma, T)R_2(\sigma, T)}{R_1(\sigma, T) + R_2(\sigma, T)} \quad (3.6)$$

Selon l'expression (3.5), les expressions des résistances $R_1(\sigma, T)$, $R_2(\sigma, T)$ s'écrivent:

$$R_1(\sigma, T) = R_1(0, T_0) \left(1 + \pi_{44(1)}(T_0)\sigma + \alpha_1(\Delta T) + \beta_1(\Delta T)^2 \right) \quad (3.7)$$

$$R_2(\sigma, T) = R_2(0, T_0) \left(1 + \pi_{44(2)}(T_0)\sigma + \alpha_2(\Delta T) + \beta_2(\Delta T)^2 \right) \quad (3.8)$$

Si on pose: $a = \alpha_1 + \beta_1\Delta T$ and $b = \alpha_2 + \beta_2\Delta T$

Ainsi nous aurons:

$$R_1(\sigma, T) = R_1(0, T_0) \left(1 + \pi_{44(1)}(T_0)\sigma + a(\Delta T) \right) \quad (3.9)$$

$$R_2(\sigma, T) = R_2(0, T_0) \left(1 + \pi_{44(2)}(T_0)\sigma + b(\Delta T) \right) \quad (3.10)$$

Donc la résistance équivalente sera :

$$R_{eq}(\sigma, T) = \frac{R_1(0, T_0)R_2(0, T_0) \left(1 + \sigma\pi_{44(1)}(T_0) + a(\Delta T) \right) \left(1 + \sigma\pi_{44(2)}(T_0) + b(\Delta T) \right)}{R_1(0, T_0) \left(1 + \sigma\pi_{44(1)}(T_0) + a(\Delta T) \right) + R_2(0, T_0) \left(1 + \sigma\pi_{44(2)}(T_0) + b(\Delta T) \right)}$$

$$R_{eq}(\sigma, T) = \frac{R_1(0, T_0)R_2(0, T_0)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)} \left[\frac{1 + \left(\frac{\sigma\pi_{44(1)}(T_0) + \sigma\pi_{44(2)}(T_0) + \sigma b\pi_{44(1)}(T_0)(\Delta T) + \sigma a\pi_{44(2)}(T_0)(\Delta T) + a(\Delta T) + b(\Delta T)}{\sigma a\pi_{44(2)}(T_0)(\Delta T) + a(\Delta T) + b(\Delta T)} \right)}{1 + R_1(0, T_0) \left(\frac{1 + \sigma\pi_{44(1)}(T_0) + a(\Delta T)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)} \right) + R_2(0, T_0) \left(\frac{1 + \sigma\pi_{44(2)}(T_0) + b(\Delta T)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)} \right)} \right]$$

On pose :

$$R_{eq}(0, T_0) = \frac{R_1(0, T_0)R_2(0, T_0)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)} \quad \text{elle représente la résistance équivalente des deux résistances}$$

$R_1(0, T_0)$ et $R_2(0, T_0)$ à température ambiante T_0 et pour le cas ($\sigma = 0$).

L'expression de $R_{eq}(\sigma, T)$ devient :

$$R_{eq}(\sigma, T) = R_{eq}(0, T_0) \left[\frac{1 + ((\pi_{44(1)}(T_0) + \pi_{44(2)}(T_0))\sigma + (\sigma b \pi_{44(1)}(T_0) + \sigma a \pi_{44(2)}(T_0) + a + b)(\Delta T))}{\left((R_1(0, T_0)\pi_{44(1)}(T_0) + R_2(0, T_0)\pi_{44(2)}(T_0))\sigma + \right)} \right]$$

$$1 + \frac{aR_1(0, T_0)(\Delta T) + bR_2(0, T_0)(\Delta T)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)}$$

Remplaçant a et b par leurs expressions:

$$R_{eq}(\sigma, T) = R_{eq}(0, T_0) \left[\frac{1 + ((\pi_{44(1)}(T_0) + \pi_{44(2)}(T_0))\sigma + (\sigma \pi_{44(1)}(T_0)(\alpha_2 + \beta_2(\Delta T)) + \sigma \pi_{44(2)}(T_0)(\alpha_1 + \beta_1(\Delta T)) + a + b)(\Delta T))}{\left((R_1(0, T_0)\pi_{44(1)}(T_0)\sigma + R_1(0, T_0)(\alpha_1 + \beta_1(\Delta T))(\Delta T) + R_2(0, T_0)\pi_{44(2)}(T_0)\sigma + \right)} \right]$$

$$1 + \frac{R_2(0, T_0)(\alpha_2 + \beta_2(\Delta T))\Delta T}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)}$$

$$R_{eq}(\sigma, T) = R_{eq}(0, T_0) \left[\frac{1 + ((\pi_{44(1)}(T_0) + \pi_{44(2)}(T_0))\sigma + (\pi_{44(1)}(T_0)\alpha_2\sigma + \pi_{44(2)}(T_0)\alpha_1\sigma + \alpha_1 + \alpha_2)(\Delta T)) + (\sigma \pi_{44(1)}(T_0)\beta_2 + \sigma \pi_{44(2)}(T_0)\beta_1 + \beta_1 + \beta_2)(\Delta T)^2}{\left((R_1(0, T_0)\pi_{44(1)}(T_0) + R_2(0, T_0)\pi_{44(2)}(T_0))\sigma + R_1(0, T_0)(\alpha_1 + \beta_1(\Delta T))(\Delta T) + \right)} \right] \quad (3.11)$$

$$1 + \frac{R_2(0, T_0)(\alpha_2 + \beta_2(\Delta T))(\Delta T)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)}$$

La formule (3.11) décrit bien les effets combinés des deux paramètres, pression et température en fonction des coefficients de piézorésistivité $\pi_{44(1)}$ et $\pi_{44(2)}$ et des coefficients de température du premier et du second ordre (α_1, α_2) et (β_1, β_2) des deux résistances montées en parallèle $R_1(\sigma, T)$ et $R_2(\sigma, T)$.

3.2.1.1.1 Influence de la température en absence de pression:

En absence de pression, les contraintes mécaniques sont nulles ($\sigma = 0$) la formule (3.11) devient :

$$R_{eq}(0, T) = R_{eq}(0, T_0) \left[\frac{1 + (\alpha_1 + \alpha_2)(\Delta T) + (\beta_1 + \beta_2)(\Delta T)^2}{1 + \left(\frac{(R_1(0, T_0)\alpha_1 + R_2(0, T_0)\alpha_2)(\Delta T) + (R_1(0, T_0)\beta_1 + R_2(0, T_0)\beta_2)(\Delta T)^2}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)} \right)} \right] \quad (3.12)$$

Maintenant si on considère que tout le profil du dopage peut être discrétiser en un nombre infinie des résistances montées en parallèles pour différentes valeurs du dopage , la formule (3.12) de la résistance équivalente sera comme suit :

$$R_{eq}(0, T) = R_{eq}(0, T_0) \left[\frac{1 + (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)(\Delta T) + (\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n)(\Delta T)^2}{1 + \left(\frac{(R_1(0, T_0)\alpha_1 + R_2(0, T_0)\alpha_2 + \dots + R_n(0, T_0)\alpha_n)(\Delta T) + (R_1(0, T_0)\beta_1 + R_2(0, T_0)\beta_2 + \dots + R_n(0, T_0)\beta_n)(\Delta T)^2}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0) + \dots + R_n(0, T_0)} \right)} \right]$$

Donc :

$$R_{eq}(0, T) = R_{eq}(0, T_0) \frac{1 + (\Delta T) \sum_{i=1}^n \alpha_i + (\Delta T)^2 \sum_{i=1}^n \beta_i}{1 + \frac{(\Delta T) \sum_{i=1}^n R_i(0, T_0) \alpha_i + (\Delta T)^2 \sum_{i=1}^n R_i(0, T_0) \beta_i}{\sum_{i=1}^n R_i(0, T_0)}} \quad (3.13)$$

Cette formule décrit les effets des deux coefficients α et β pour les différentes valeurs du dopage sur le comportement résistif du Silicium . La résistance du silicium type P ici est équivalente à un nombre de résistances infinie montées en parallèle, chacune possède ses propres coefficients α et β

On peut généraliser la formule (3.13) pour établir la formule de la résistivité en fonction des coefficients de température du premier et du second ordre.

Si on considère qu'un barreau semi conducteur de longueur L et section S, dopé par des atomes de Bore , sa résistance à température T s'écrit sous la forme suivante:

$$R_{eq}(0, T) = \rho_{eq}(0, T) \times L/S \quad (3.14)$$

$\rho_{eq}(0, T)$ est la résistivité équivalente à température T donc :

$$\rho_{eq}(0, T) = \rho_{eq}(0, T_0) \frac{1 + (\Delta T) \sum_{i=1}^n \alpha_i + (\Delta T)^2 \sum_{i=1}^n \beta_i}{1 + \frac{(\Delta T) \sum_{i=1}^n \rho_i(0, T_0) \alpha_i + (\Delta T)^2 \sum_{i=1}^n \rho_i(0, T_0) \beta_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i(0, T_0)}} \quad (3.15)$$

Cette expression décrit le comportement thermique de la résistivité équivalente du silicium liée aux coefficients de température (du premier et deuxième ordre) [11].

Utilisant les valeurs des coefficients de température obtenues dans le chapitre précédent nous avons tracé la variation de la résistivité en fonction de la température (figure 3.2).

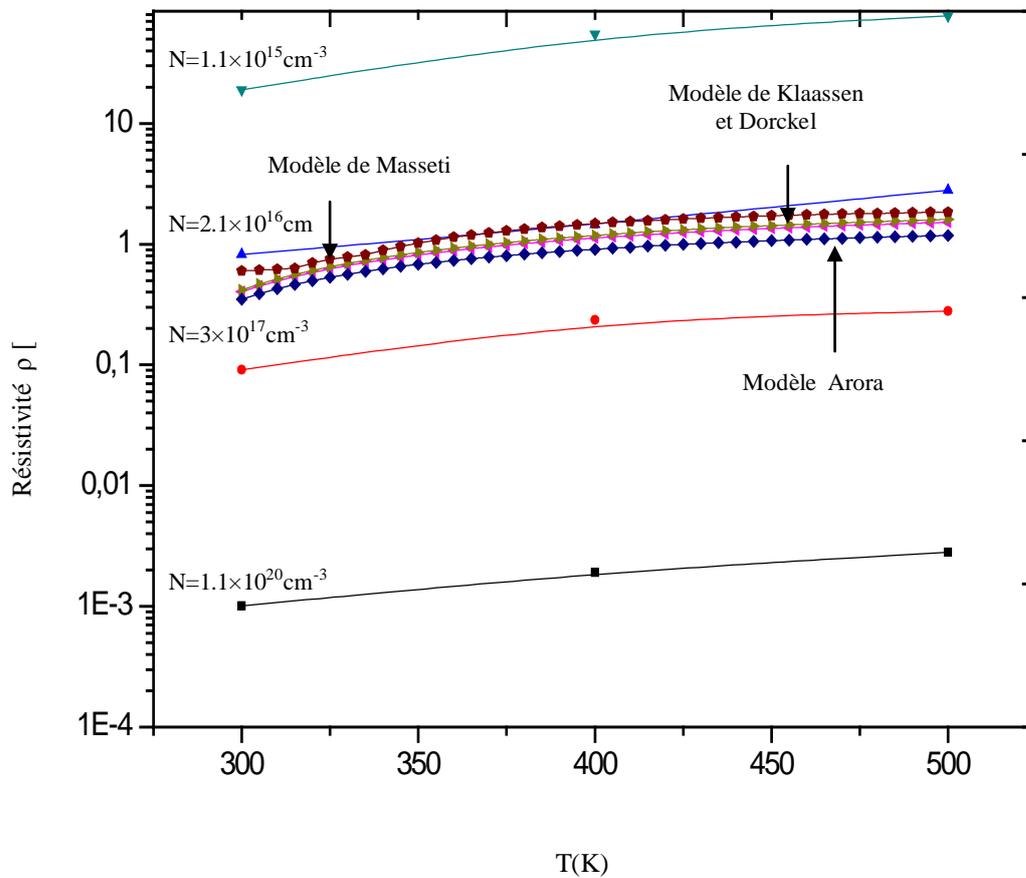


Figure 3.2 : Variation de la résistivité du silicium expérimental[28][29] et théorique en fonction du dopage

l'évolution des courbes de variations de la résistivité obtenues par les deux modèles Dorckel et Klaassen sont quasiment identiques, se situent entre les deux courbes de variations de la résistivité obtenu par deux autres modèles Masetti et Arora .

On a constaté que les variations obtenues de la résistivité par les quatre modèles sont comprises entre les points expérimentaux relevés entre $2.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [28][29].

3.2.1.1.2 Influence de la Pression sur le comportement résistif du Silicium à température ambiante:

A température ambiante ($\Delta T \rightarrow 0$), l'expression (3.11) de la résistance devient :

$$R_{eq}(\sigma, 0) = R_{eq}(0, T_0) \left[\frac{1 + \sigma(\pi_{44(1)}(T_0) + \pi_{44(2)}(T_0))}{1 + \sigma \left(\frac{R_1(0, T_0)\pi_{44(1)}(T_0) + R_2(0, T_0)\pi_{44(2)}(T_0)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0)} \right)} \right] \quad (3.16)$$

Généralisation sur un nombre infinie de résistances montées en parallèles pour les différentes valeurs du dopage l'expression (3.16) devient:

$$R_{eq}(\sigma, T_0) = R_{eq}(0, T_0) \left[\frac{1 + \sigma(\pi_{44(1)}(T_0) + \pi_{44(2)}(T_0) + \dots + \pi_{44(n)}(T_0))}{1 + \sigma \left(\frac{R_1(0, T_0)\pi_{44(1)}(T_0) + R_2(0, T_0)\pi_{44(2)}(T_0) + \dots + R_n(0, T_0)\pi_{44(n)}(T_0)}{R_1(0, T_0) + R_2(0, T_0) + \dots + R_n(0, T_0)} \right)} \right]$$

Donc :

$$R_{eq}(\sigma, T_0) = R_{eq}(0, T_0) \frac{1 + \sigma \sum_{i=1}^n \pi_{44(i)}}{1 + \sigma \frac{\sum_{i=1}^n R_i(0, T_0) \pi_{44(i)}}{\sum_{i=1}^n R_i(0, T_0)}} \quad (3.17)$$

La formule (3.17) décrit l'effet des contraintes sur le comportement de la résistance du Silicium en fonction des coefficients de piézorésistivité π_{44} et pour les différentes valeurs du dopage.

Si on veut calculer la sensibilité du Silicium en fonction des coefficients de piézorésistivité π_{44} :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1 + \sigma \sum_{i=1}^n \pi_{44(i)}}{1 + \sigma \frac{\sum_{i=1}^n R_i(0, T_0) \pi_{44(i)}}{\sum_{i=1}^n R_i(0, T_0)}} - 1 \quad (3.18)$$

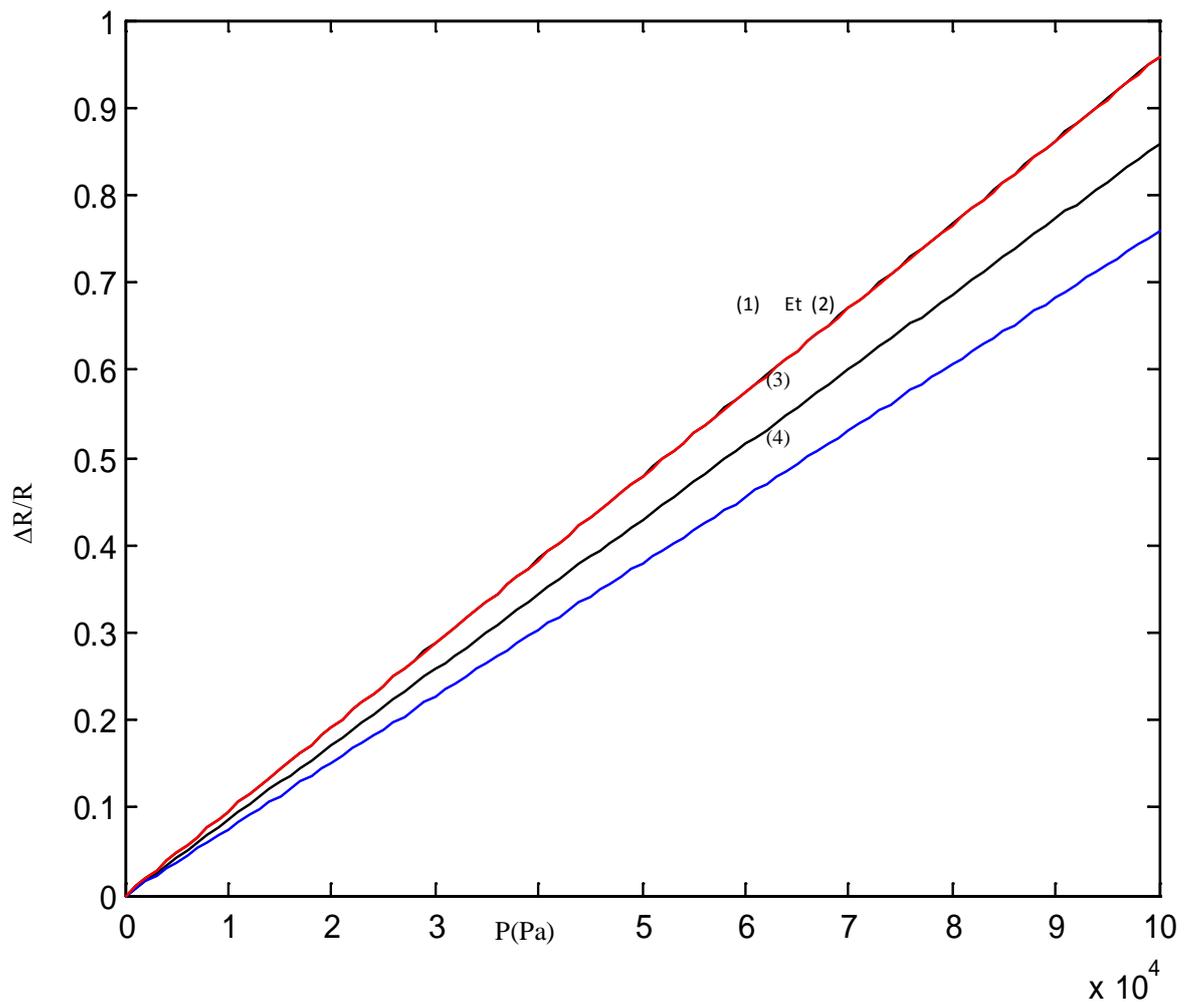


Figure 3.3 Variation de la résistance relative équivalente $\Delta R/R$ en fonction de Pression P

- (1) Et (2) Modèles de Dorckel et Masseti
- (3) Modèle de Klaassen
- (4) Modèle de Arora

La figure 3.3 montre la variation de la résistance relative équivalente en fonction de la pression P, les courbes (1), (2),(3) et (4) représentent les variations pour les quatre modèles utilisés, il est intéressant de noter que l'augmentation est presque linéaire dans la gamme de pression du 0-100 kPa.

3.3 Conclusion

Ce chapitre se focalise sur une étude approfondie du comportement thermomécanique de la résistance du silicium. Nous avons présenté un nouveau modèle comportant deux expressions analytiques, la première représente la résistivité en fonction de la température et des deux coefficients du premier et du deuxième ordre α et β , la deuxième expression décrit la résistance relative équivalente en fonction des coefficients de piézorésistivité π_{44} et les contraintes mécaniques σ .

CHAPITRE 4

PRINCIPES DE COMPENSATION DE LA DERIVE THERMIQUE DE LA TENSION D'OFFSET DES CAPTEURS DE PRESSION PIEZORESISTIFS

4.1 Introduction

La réalisation des piezoresistances des capteurs de pression piézorésistifs sur la membrane s'effectue par la technique d'implantation ionique ou par diffusion. La modélisation des jauges piézoresistifs par les quatre modèles étudiés dans les chapitres précédents montre bien qu'ils ont une variation non linéaire en fonction de la température, dopage et pression [30][31].

D'autres travaux de recherches qui ont étudié le comportement thermoélectrique des capteurs de pression au silicium ont constaté que les jauges piézoresistifs varient aussi en fonction de la tension d'alimentation du pont [32][33]. Ils ont présenté la variation de la dérive thermique de la tension d'offset, Après quelques années ce phénomène a été expliqué par les effets du courant inverse dans la jonction PN [34].

Pour minimiser la dérive thermique de la tension d'offset plusieurs travaux de recherches ont été effectués dans ce domaine [35][36][37][38][39][40]. Le présent chapitre propose deux techniques de compensation, La première sera présentée dans la première partie de ce chapitre, où nous nous sommes basés sur les résultats expérimentaux obtenus par Yicai et al [33], pour cela notre travail a été consacré sur l'utilisation des thermistances CTP et CTN montées en série ou en parallèle avec le pont de WHEATSTONE. La deuxième technique sera présentée dans la seconde partie, elle repose sur le dépôt d'une couche uniforme d'aluminium sur la partie supérieure de la membrane (Ecran).

4.2 Théorie du pont

Lorsque les quatre piézorésistances sont électriquement connectées en pont de Wheatstone (figure 4.1).

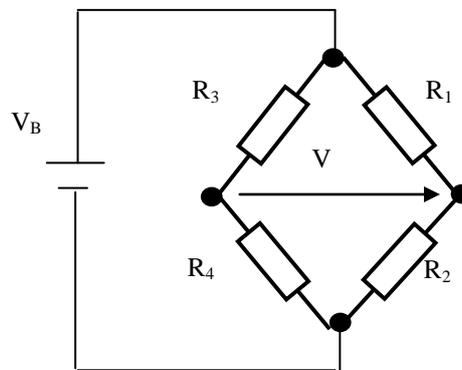


Figure 4.1 : Les quatre piézoresistances électriquement connectées en pont de WHEATSTONE

A pression nulle ($P = 0$) la tension de sortie du pont devrait être comme suit :

$$V_{\text{off}} = V_B \frac{S_O}{K} \quad \text{où } V_B \text{ est la tension d'alimentation du pont et :}$$

$$S_O = R_1 R_3 - R_2 R_4$$

$$K = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)$$

4.2.1 Le pont de Wheatstone est sous une tension d'alimentation variable V_B mais à température ambiante :

La tension de sortie du pont pour un capteur de pression peut s'écrire sous la forme suivante :

$$V = V_B \frac{S}{K} \quad (4.1)$$

Où :

$$S = (R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4) = S_0 + \Delta S \quad (4.2)$$

Et

$$K = (R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 - \Delta R_4) \approx \text{const} \quad (4.3)$$

$$S_0 = R_1 R_3 - R_2 R_4$$

$$\Delta S = R_1 R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + R_2 R_4 \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{2\Delta R_i}{R_i} (R_1 R_3 + R_2 R_4) \quad (i = 1-4)$$

S_0 est appelée la l'offset du pont à pression nulle. ΔS s'appelle l'offset efficace du pont sous la pression P.

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = kP \therefore \Delta S = 2kP(R_1 R_3 + R_2 R_4) \quad (4.4)$$

où P est la pression exercée sur la membrane, k est un facteur constant , ΔR_i est la variation des quatre résistances causée par l'application d'une pression P .

Introduisant l'expression (4.2) dans l'expression (4.1), nous obtenons :

$$V = V_B \left(\frac{S_0}{K} + \frac{\Delta S}{K} \right) = V_{\text{off}} + V_{\text{sig}} \quad (4.5)$$

Où :

$$V_{\text{off}} = V_B \frac{S_0}{K} \quad (4.6)$$

Est appelé la tension d'offset à pression nulle :

$$V_{\text{sig}} = V_B \frac{\Delta S}{K} \quad (4.7)$$

Où V_{sig} est appelé le signal de sortie efficace, il est proportionnel à la pression .

Le gradient de l'expression (4.1) par rapport à la tension V_B du pont , nous donne :

$$\frac{\partial V}{\partial V_B} = \frac{S}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial S}{\partial V_B} = \frac{S_0 + \Delta S}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial(S_0 + \Delta S)}{\partial V_B} \quad (4.8)$$

Quand $P=0$, donc $\Delta S = 0$ et $V_{sig} = 0$ alors :

$$\frac{\partial V_{off}}{\partial V_B} = \frac{S_0}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial S_0}{\partial V_B} \quad (4.9)$$

Les résistances du pont varient en fonction de l'alimentation V_B selon une approximation du premier degré autour d'une certaine valeur d'alimentation V_0 :

$$R_i = R_i(0)[1 + a_i(V_B - V_0)] \text{ avec } a_i < 0 \text{ ou } > 0$$

Donc :

$$R_i R_j = R_i(0)R_j(0)[1 + (a_i + a_j)(V_B - V_0) + a_i a_j (V_B - V_0)^2] \quad (i, j = 1, 3 \text{ ou } 2, 4)$$

$$\frac{\partial S_0}{\partial V_B} = \frac{\partial(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{\partial V_B} \approx (a_1 + a_3)R_1(0)R_3(0) - (a_2 + a_4)R_2(0)R_4(0) = A \quad (4.10)$$

L'étude expérimentale de Yicai montre bien que les jauges piézorésistifs sont des jonctions PN qui varient en fonction de la tension d'alimentation , pour cela le terme A peut être facilement identifier à partir des courbes expérimentaux des variations des résistance du pont [33] .

Introduisant le terme A dans l'expression (4.9), cette formule devrait être comme suit :

$$\frac{\partial V_{off}}{\partial V_B} = \frac{S_0}{K} + \frac{V_B}{K} A \quad (4.11)$$

Le pont de Wheatstone est en état d'équilibre à une tension lorsque :

$$S_0 = 0$$

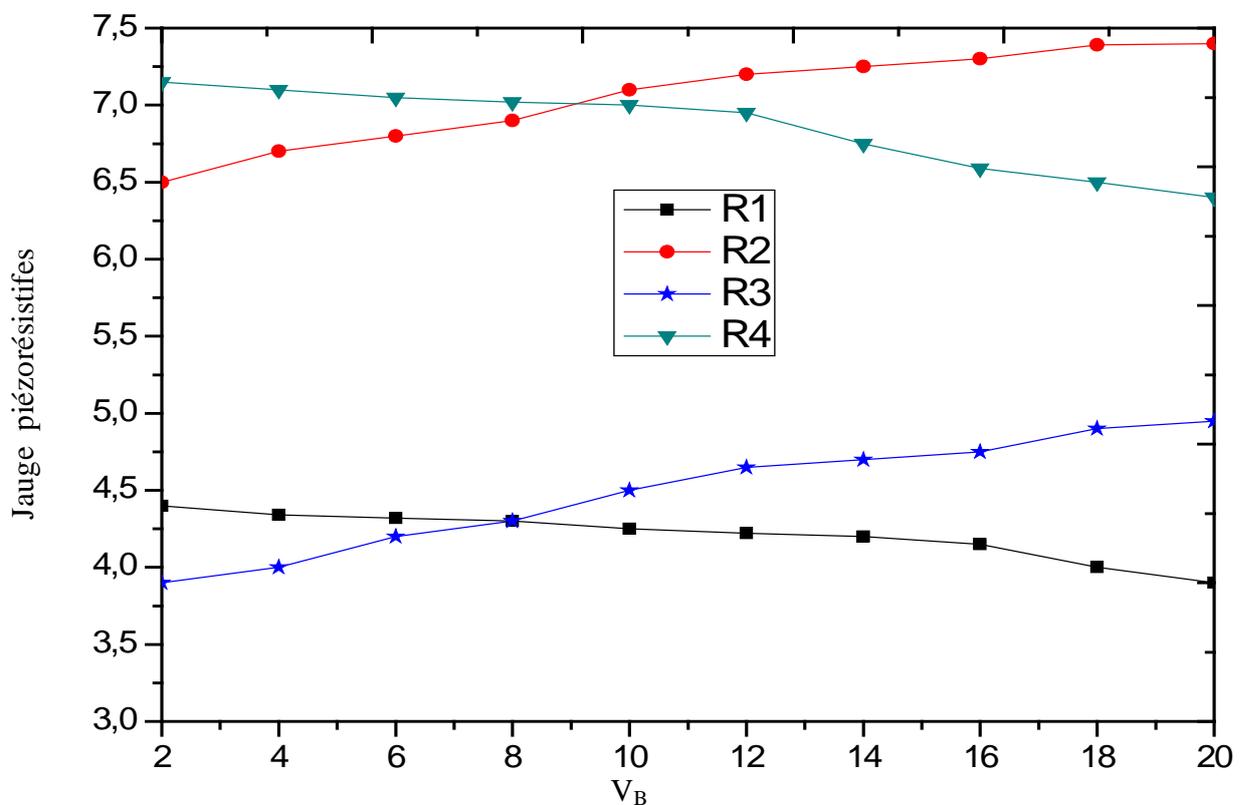
Donc $V_{off} = 0$, mais :

$$\left. \frac{\partial V_{off}}{\partial V_B} \right|_{V_0} = \frac{V_B}{K} A \neq 0 \quad (4.12)$$

Intégrant l'expression (4.11) nous aurons :

$$v_{\text{off}} = \int_{V_0}^{V_B} \left(\frac{SO}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) dV_B \quad (4.13)$$

La figure 4.2 montre bien la non linéarité des piézorésistances R_1, R_2, R_3 et R_4 en fonction de la tension d'alimentation du pont V_B , les deux résistances (R_1, R_4) diminuent en fonction de la tension d'alimentation, par contre les deux autres résistances (R_2, R_3) augmentent en fonction de la tension d'alimentation, on observe bien que les deux résistances R_2 et R_4 se coupent à une tension 9V, les deux autres (R_1, R_3) se coupent à 8V



Figure(4.2) : Variation des jauges piézorésistives en fonction de la tension d'alimentation [33]

4.2.2 Le pont de Wheatstone est sous une tension d'alimentation V_B constante mais à température variable :

Dans cette partie nous avons considéré que le pont de Wheatstone est sous une tension d'alimentation V_B constante mais à température variable, cette analyse consiste à étudier et à évoluer le comportement en température du pont. Nous avons adopté la méthode de gradient en température.

$$\frac{\partial V_{\text{off}}}{\partial T} = \frac{V_B}{K} \frac{\partial S_O}{\partial T} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial S_O}{\partial T} = \frac{\partial (R_1 R_3 - R_2 R_4)}{\partial T}$$

Comme nous l'avons vu dans le troisième chapitre une jauge piézorésistive varie en fonction de la température selon un polynôme de deuxième ordre :

$$R_i(T) = R_i(T_0) (1 + \alpha_i \Delta T + \beta_i \Delta T^2) \quad (4.15)$$

Soit i le numéro de la jauge piézorésistif dans le pont ($i=1,2,3$ ou 4)

α_i et β_i sont les coefficients de température du premier et du second ordre correspondant aux quatre jauges piézoresistives R_1 R_2 R_3 et R_4 ,

Donc :

$$\frac{\partial S_O}{\partial T} = \frac{\partial (R_1(T)R_3(T) - R_2(T)R_4(T))}{\partial T}$$

$$\approx [(\alpha_1 + \alpha_3) + 2T(\beta_1 + \beta_3)]R_1(T_0)R_3(T_0) - [(\alpha_2 + \alpha_4) + 2T(\beta_2 + \beta_4)]R_2(T_0)R_4(T_0) + 2 = \Lambda \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial V_{\text{off}}}{\partial T} = \frac{V_B}{K} \Lambda \quad (4.18)$$

Et

$$\Lambda = \frac{K}{V_B} \frac{\partial V_{\text{off}}}{\partial T}$$

4.3 Technique de compensation de la dérive thermique par l'utilisation du thermistance CTP ou CTN montées en série ou en parallèle avec le pont de WHEATSTONE :

Nous avons utilisé une méthode de compensation de la dérive thermique de la tension d'offset par l'utilisation des composants électroniques sensibles à la température, la valeur de la résistance augmente ou diminue en fonction de la température, pour cela nous avons choisi les thermistances. Nous avons étudié le comportement du système dans deux cas :

- Le capteur de pression piézoresistif est monté en série avec la thermistance .
- Le capteur de pression est monté en parallèle avec la thermistance ,

4.3.1 Compensation par l'utilisation d'une CTP montée en série avec le capteur :

La méthode consiste à monter une thermistance en série avec le pont de WHEATSTONE du capteur de pression cette dernière se caractérise par un coefficient de température B et une résistance $R(T_0)$ à température ambiante .

La thermistance CTP est une résistance sensible à la température avec un coefficient B positif , sa variation s'écrit écrit sous la forme suivante :

$$R_{th}(T) = R_{th}(T_0)(1 + B\Delta T)$$

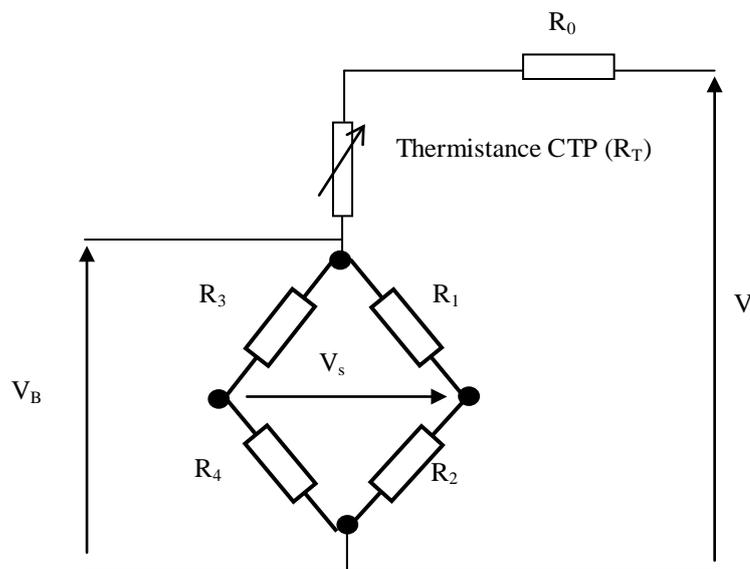


Figure (4.3) :Le pont de WHEATSTONE en série avec la thermistance CTP .

La tension V_B s'écrit en fonction de la tension V et du coefficient η :

$$V_B = \frac{V}{\eta} \quad (4.19)$$

η est un coefficient dépendant des paramètres de circuit :

$$\eta = \frac{R_B + R_0 + R_{th}(T_0)(1 + B\Delta T)}{R_B}$$

R_B est la résistance équivalente des quatre jauges piézorésistifs.

et

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}$$

R_0 résistance montée en série avec la thermistance R_{th} .

Dans ce cas

$$V_{off} = \frac{V_B S_0}{K} = \frac{V S_0}{K\eta} \quad (4.20)$$

La différentielle totale de V_{off} nous donne :

$$\begin{aligned} dV_{off} &= \left(\frac{\partial V_{off}}{\partial V} \right)_T dV + \left(\frac{\partial V_{off}}{\partial T} \right)_V dT \\ dV_{off} &= \left(\frac{\partial V_{off}}{\partial V} \right)_T dV + \left(\frac{\partial V_{off}}{\partial T} \right)_V dT \\ &= \left(\frac{S_0}{K\eta} + \frac{V}{K\eta} \frac{\partial S_0}{\partial V} \right)_T dV + \left(\frac{\partial U_{off}}{\partial V_B} \frac{\partial V_B}{\partial T} + \frac{V}{K\eta} \frac{\partial S_0}{\partial T} \right)_V dT \\ &= \left(\frac{S_0}{K\eta} + \frac{V}{K\eta} \frac{\partial S_0}{\partial V} \right)_T dT + \left[\left(\frac{S_0}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial S_0}{\partial V_B} \right) \times \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{d\eta}{dT} \right) + \left(\frac{V}{K\eta} \frac{\partial S_0}{\partial T} \right) \right]_V dT \\ &= \left(\frac{S_0}{K\eta} + \frac{V}{K\eta} A' \right)_T dV + \left[\left(\frac{S_0}{K} + \frac{V}{K} \frac{\partial S_0}{\partial V} \right) \times \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{d\eta}{dT} \right) + \frac{V}{K\eta} \Lambda \right]_V dT \end{aligned} \quad (4.21)$$

On pose $A' = \frac{\partial S_0}{\partial V}$ et $A = \frac{\partial S_0}{\partial T}$

Dans le cas idéal les quatre jauges sont identiques donc on peut considérer que S_0 a une valeur négligeable par rapport aux autres termes.

l'expression (4.21) sera simplifiée comme suit :

$$dV_{\text{off}} = \left(\frac{V}{K\eta} A' \right)_T dV + \left[\left(\frac{V}{K} A' \right) \times \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{d\eta}{dT} \right) + \frac{V}{K\eta} \Lambda \right]_V dT \quad (4.22)$$

La méthode consiste à compenser la dérive thermique par la dérive électrique pour cela il faut que le terme suivant soit nul :

$$\frac{V}{K} A' \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{d\eta}{dT} \right) + \frac{V}{K\eta} \Lambda = 0$$

Donc la tension d'alimentation du pont qui annule la dérive thermique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$V = \frac{A'}{A} \frac{\eta}{\frac{d\eta}{dT}}$$

Avec

$$\frac{d\eta}{dT} = \eta_1 \eta_2 + \eta_3$$

Où :

$$\eta_1 = \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{R_B} \right) = -R(T_0) \left[\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + 2\Delta T(\beta_1 + \beta_2)}{(R_1(T_0) + R_2(T_0))^2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_4 + 2\Delta T(\beta_3 + \beta_4)}{(R_3(T_0) + R_4(T_0))^2} \right]$$

$$\eta_2 = R_0 + R_{th}(T_0)(1 + BT)$$

$$\eta_3 = \frac{BR_{th}(T_0)}{R_B}$$

La tension V_{off} peut être établie par l'intégral de la formule (4.21) :

$$V_{\text{off}} = \int_{V_0}^V \left(\frac{S_0}{K\eta} + \frac{V}{K\eta} A' \right) dV \quad (4.23)$$

Où V_0 la limite inférieure pour laquelle V_{off} est nulle, cependant la limite supérieure de l'intégrale V correspond à la tension appliquée au pont pour lequel la dérive thermique est juste compensée par la dérive électrique.

➤ **Le premier cas** : Le pont de Wheatstone est en série avec :

- Une résistance R_0 de 10K
- Une thermistance CTP où : $R_{th}(T_0) = 10K$ et $B = 0.0055$

Nous avons tracé la variation de la tension d'offset V_{Off} en fonction de la tension d'alimentation V_B avec les différentes températures : $0^\circ C$, $30^\circ C$, $50^\circ C$, $80^\circ C$ et $100^\circ C$.

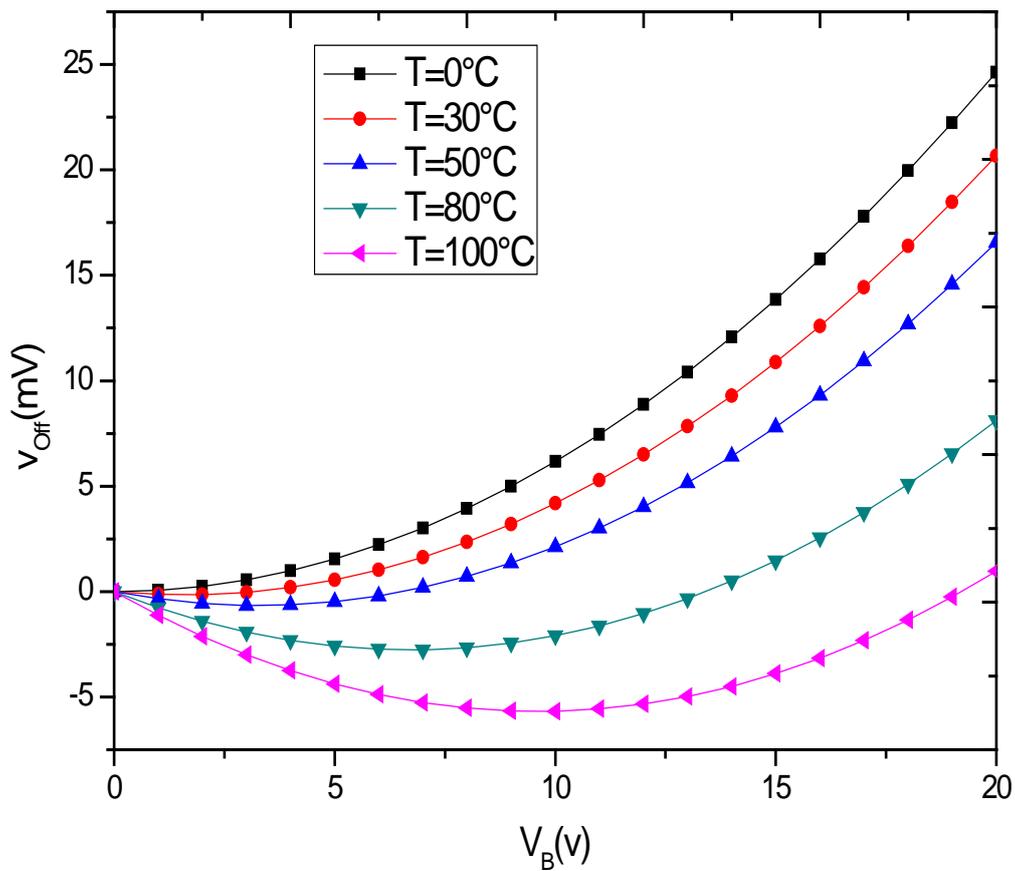


Figure (4.4) : Variation de la dérive thermique de la tension d'offset en fonction de la tension d'alimentation V_B pour différentes valeurs de températures.

L'examen de ces courbes de variation montre bien la non linéarité de cette tension, où elle prend une forme plus au moins parabolique. Sa valeur diminue plus que la température augmente, cette tension s'annule pour différentes valeurs de V, Le tableau (4.1) regroupe les valeurs approximatives de la tension d'alimentation qui peuvent compenser la tension d'offset :

T (°C)	0	30	50	80	100
V(V)	0	3V	6,5V	13V	19V

Tableau (4 .1) : Valeurs de tension d'alimentation qui peuvent éliminer la dérive thermique

➤ **Le deuxième cas** : Le pont de Wheatstone est en série avec :

- Une résistance R_0 de 15K
- Une thermistance CTP où : $R_{th}(T_0) = 10K$ et $B = 0.0055$

Nous avons tracé dans la figure (4.5) la variation de la tension d'offset V_{Off} en fonction de la tension d'alimentation V_B avec les différentes température : $0^\circ C$, $30^\circ C$, $50^\circ C$, $80^\circ C$ et $100^\circ C$.

L'examen de ces courbes montre que malgré leur similitude apparente, des différences sensibles apparaissent selon la température utilisée.

L'allure de variation est toujours non linéaire en fonction de la tension d'alimentation , on remarque aussi pour ce cas, que la dérive thermique diminue plus que la température augmente, dans ce cas la tension s'annule à des tension différentes que celles obtenues dans le premier cas, Le tableau (4.2) regroupe les valeurs de tensions qui peuvent éliminer la dérive thermique.

T (°C)	0	30	50	80	100
V(V)	0	4V	8V	16V	> 20V

Tableau (4 .2) : Valeurs de tension d'alimentation qui peuvent éliminer la dérive thermique

On constate que la résistance R_0 placée en série avec la thermistance joue un rôle important dans la détermination de la tension d'alimentation qui peut compenser la dérive thermique de la tension d'offset .

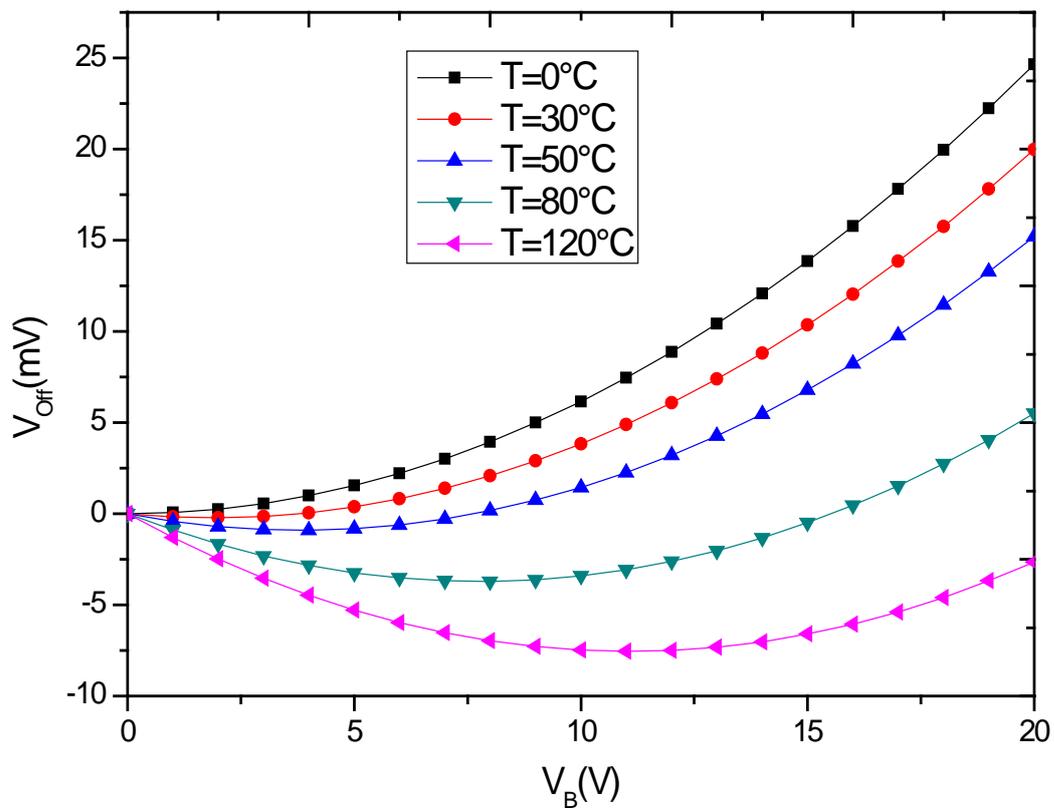


Figure (4.5) : Variation de la dérive thermique de la tension d'offset en fonction de la tension d'alimentation V_B pour les différentes valeurs de températures

4.3.2 Compensation par l'utilisation d'une thermistance CTN en parallèle avec le pont

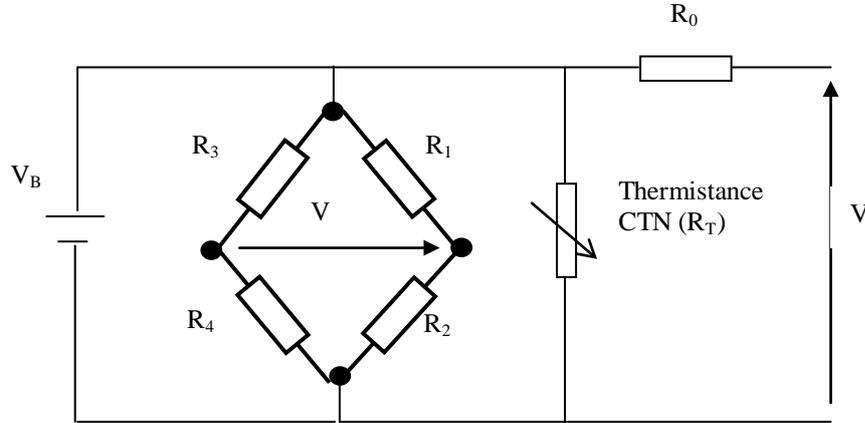


Figure 4.6 :Le pont de WHEATSTONE en parallèle avec la thermistance CTN .

D'après la figure 4.6 ,la tension d'offset s'écrit sous la forme suivante:

$$V_{\text{off}} = I_B \frac{S_0}{K} \quad (4.24)$$

$$S_0 = R_1 R_3 - R_2 R_4$$

$$K = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

Le courant total I est la somme des deux courants parcourues dans le pont de WHEATSTONE et dans la thermistance CTN , donc :

$$I = I_B + I_{\text{CTN}}, \quad (4.25)$$

La différentielle totale de l'équation (4.24) donne :

$$dV_{\text{off}} = \left(\frac{\partial V_{\text{off}}}{\partial I} \right)_T dI + \left(\frac{\partial V_{\text{off}}}{\partial T} \right)_V dT$$

$$= \left(\frac{S_0}{K} + \frac{I_B}{K} \frac{\partial S_0}{\partial I_B} \right)_T dI + \left(\frac{\partial V_{\text{off}}}{\partial I_B} \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \frac{\partial S_0}{\partial T} \right)_V dT$$

$$= \left(\frac{S_0}{K} + \frac{I_B R_B}{K} \frac{\partial S_0}{\partial V_B} \right) dI + \left[\left(\frac{S_B}{K} + \frac{I_B R_B}{K} \frac{\partial S_0}{\partial V_B} \right) \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \Lambda \right] dT$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{S_O}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) dI + \left[\left(\frac{S_O}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \Lambda \right] dT \\
 &= \left(\frac{S_O}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) dI + \left[\left(\frac{S_O}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \Lambda \right] dT
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

Où :

$$\Lambda = \partial S_O / \partial T, A = \partial S_O / \partial V_B = \eta \partial S_O / \partial V, \eta = V / V_B ,$$

Dans le cas où S_O est faible ou nulle la formule (4.26) devient :

$$dV_{\text{off}} = \left(\frac{V_B}{K} A \right)_T dI + \left[\left(\frac{V_B}{K} A \right) \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \Lambda \right]_I dT \tag{4.27}$$

Avec

$$I_{\text{CTN}} = \frac{V_B}{R_{\text{TH}}(0)(1+BT)}$$

Donc

$$\left(\frac{dI_B}{dT} \right)_I = - \frac{dI_{\text{CTN}}}{dT} = \frac{V_B}{R(0)} \frac{B}{(1+BT)^2} \approx \frac{V_B B}{R(0)} \tag{4.28}$$

La compensation de la dérive thermique par la dérive électrique implique que le deuxième terme de la formule (4.27) est nul , donc :

$$\frac{V_B B}{R(0)} \left(\frac{V_B}{K} A \right) + \frac{I_B}{K} \Lambda = 0; B = - \frac{\Lambda I_B R(0)}{A V_B^2} = \frac{\Lambda}{A} \frac{R(0)}{R_B V_B}$$

Et

$$V_B = - \frac{\Lambda}{A} \frac{R(0)}{B R_B}, V = \eta V_B = - \frac{\Lambda}{A} \frac{\eta R(0)}{\beta R_B} \tag{4.29}$$

$$V_{\text{off}} = \int \left(\frac{S_O}{K} + \frac{V_B}{K} \right) dI$$

$$V_{\text{off}} = \int_{V_O}^V \left[\frac{S_O}{K(R_O + R_B)} + \frac{V}{K\eta(R_O + R_B)} \right] dV \tag{4.30}$$

➤ **Le premier cas** : Le pont de Wheatstone est en parallèle avec :

- Une résistance R_0 de 30K
- Une thermistance CTN $R_{th}=5k$ et $B=-0.0055$

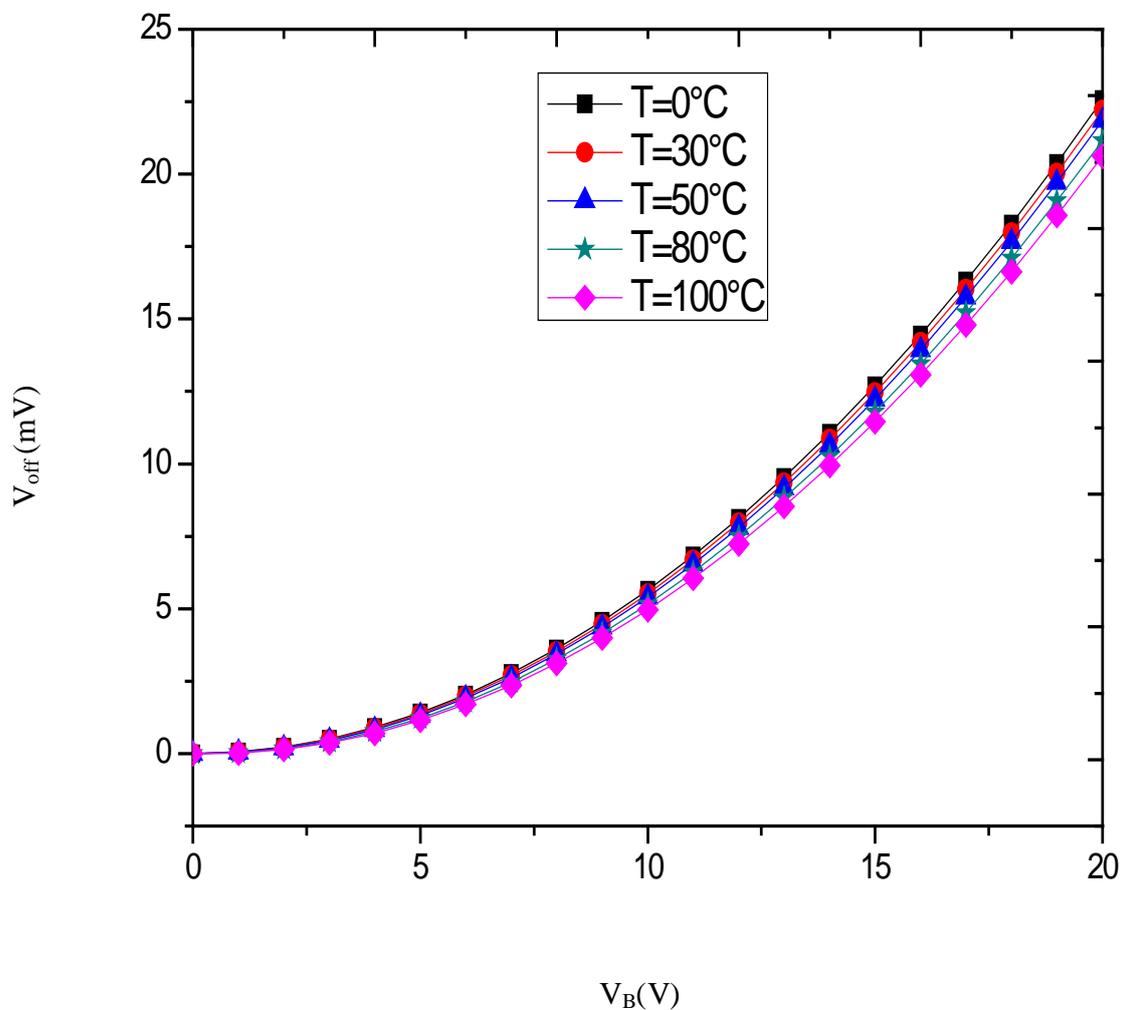


Figure (4.7) : Variation de la tension d'offset en fonction de la tension d'alimentation pour différentes valeurs de température.

➤ **Le deuxième cas** : Le pont de Wheatstone est en parallèle avec :

- Une résistance R_0 de 15K
- Une thermistance CTN $R_{th}=5k$ et $B=-0.0055$

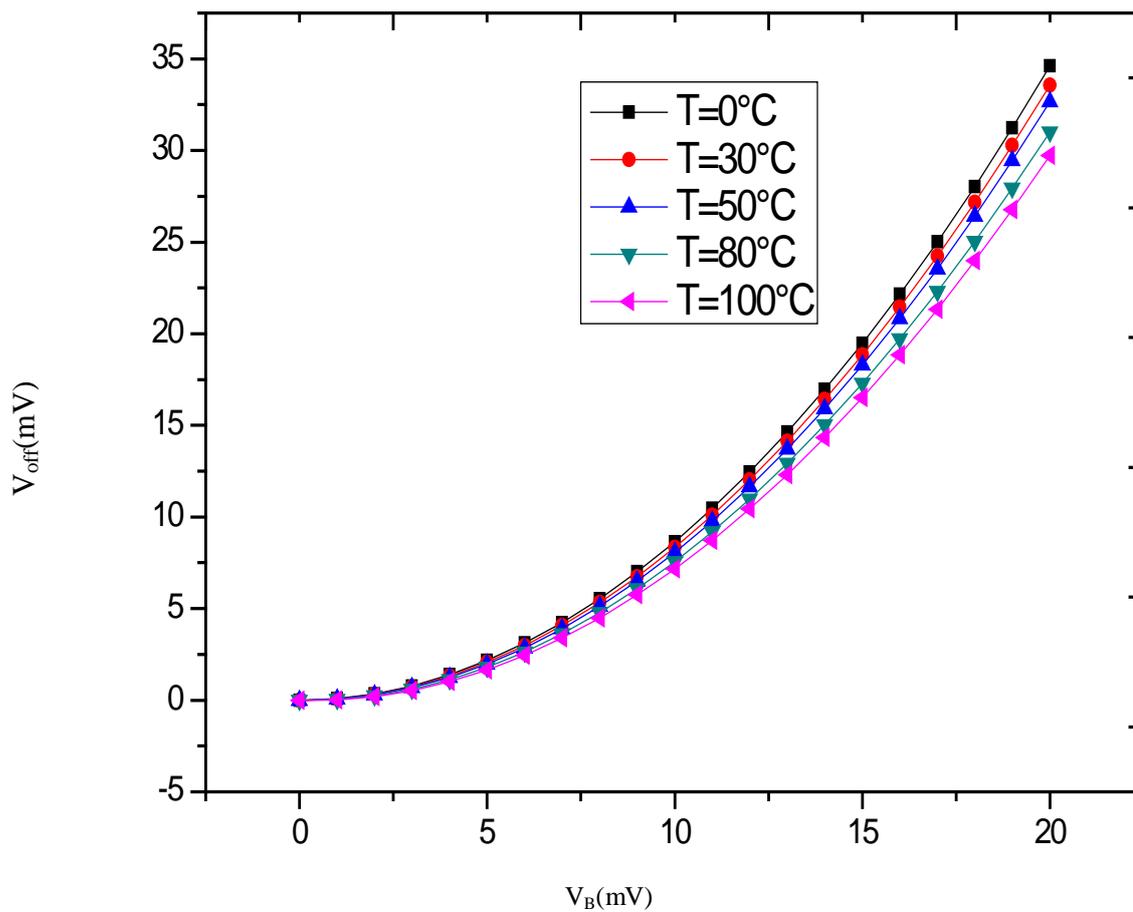


Figure (4.8) : Variation de la tension d'offset en fonction de la tension d'alimentation pour les différentes valeurs de températures

Avec l'utilisation d'une CTN , nous avons remarqué que la tension d'offset varie en fonction de la tension d'alimentation d'une façon non linéaire , Dans les deux cas étudiés la température influe d'une façon très remarquable , plus la température augmente plus la tension diminue, cependant on a remarqué que dans le deuxième cas la tension diminue plus rapidement que dans le premier cas.

4.4 Techniques de compensations par le dépôt d'une couche d'aluminium (Ecran) sur la partie supérieur de la membrane

Le travail expérimental effectué concerne l'étude et l'élaboration de jauges piézoresistives, nous avons mené à trait à l'étude expérimental des variations des jauges en fonction de la température ; en particulier nous avons étudié trois types de capteurs :

-Capteur avec membrane avec écran (L'écran est une couche très épaisse d'aluminium déposée au dessus de Nitrure de Silicium Si_3N_4)

- Capteur sans membrane avec écran.

- Capteur sans membrane et sans écran.

Le but de dépôt de cette couche est d'améliorer la réponse du capteur de pression , c'est-à-dire minimiser la dérive thermique de la tension d'offset[34].

L'étude en température s'est effectuée de $-35^{\circ}C$ à $120^{\circ}C$ et elle a consisté à relever les variations thermiques des quatre jauges. Nous avons comparé nos résultats de la tension d'offset avec un autre type de capteur de pression piézoresistif de la famille MOTOROLA c'est le MPX7050.

Dans une approche systématique et graduelle des phénomènes qui sont à la base de l'évolution thermique des caractéristiques des jauges piézorésistifs des trois types de capteurs qu'on a étudiés dans ce laboratoire , La deuxième méthode de compensation a consisté à étudier et à évoluer le comportement en température de chacun. C'est ainsi qu'après les avoir découplé électriquement l'un de l'autre, nous avons relevé, la variation thermique de chaque jauge pour une température qui varie entre $-30^{\circ}C$ et $120^{\circ}C$. La figure ci-dessous montre la configuration des quatre jauges implantées dans la membrane.

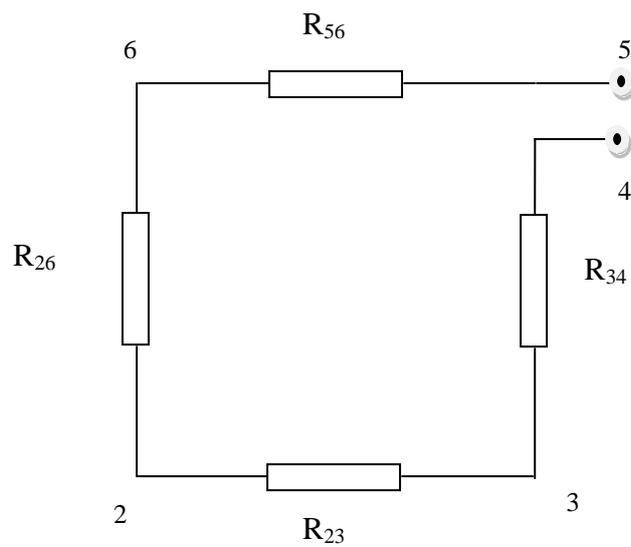
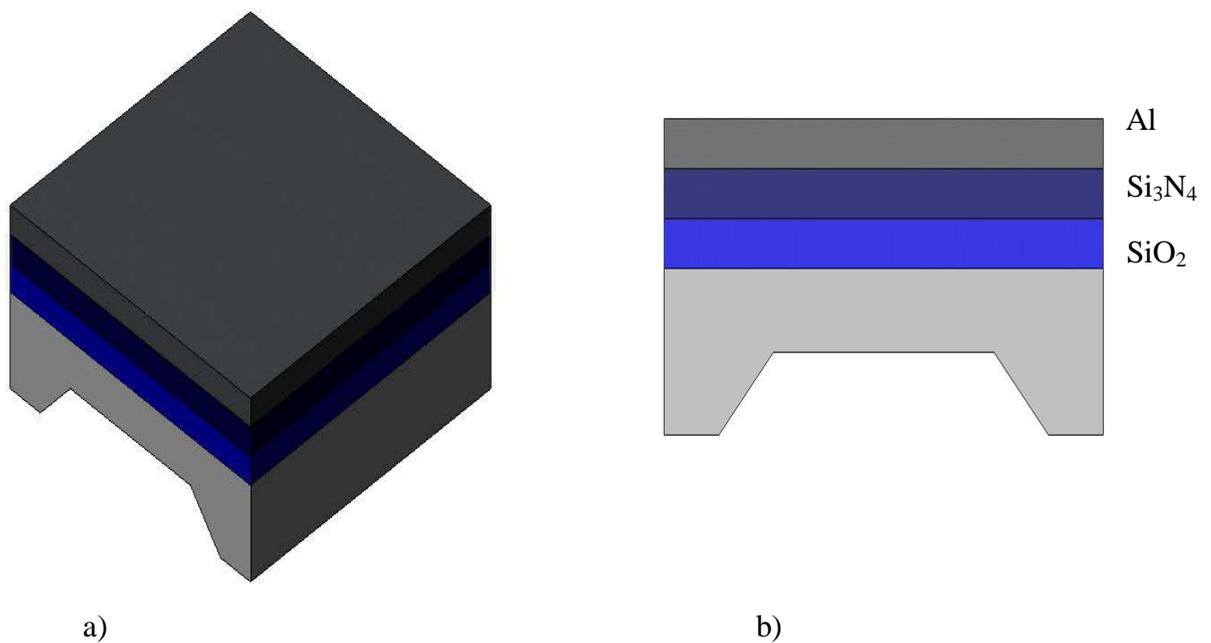


Figure (4.9) : Configuration des quatre jauges R_{56} , R_{26} , R_{23} et R_{34} étudiées pour les trois types de capteurs .

4.4.1 Capteur avec membrane avec écran. :



La figure (4.10) : Capteur avec membrane avec écran :

- a) Vue en perspective
- b) Vue de coupe

Selon la configuration de la figure (4.9), nous avons caractérisé ce type des capteurs , nous avons relevé la valeur de chaque jauge à une température donnée, puis on a fait varier la température de -36°C à 120°C ,
Nous avons tracé dans la variation de la résistance des quatre jauges en fonction de la température figure (4.11).

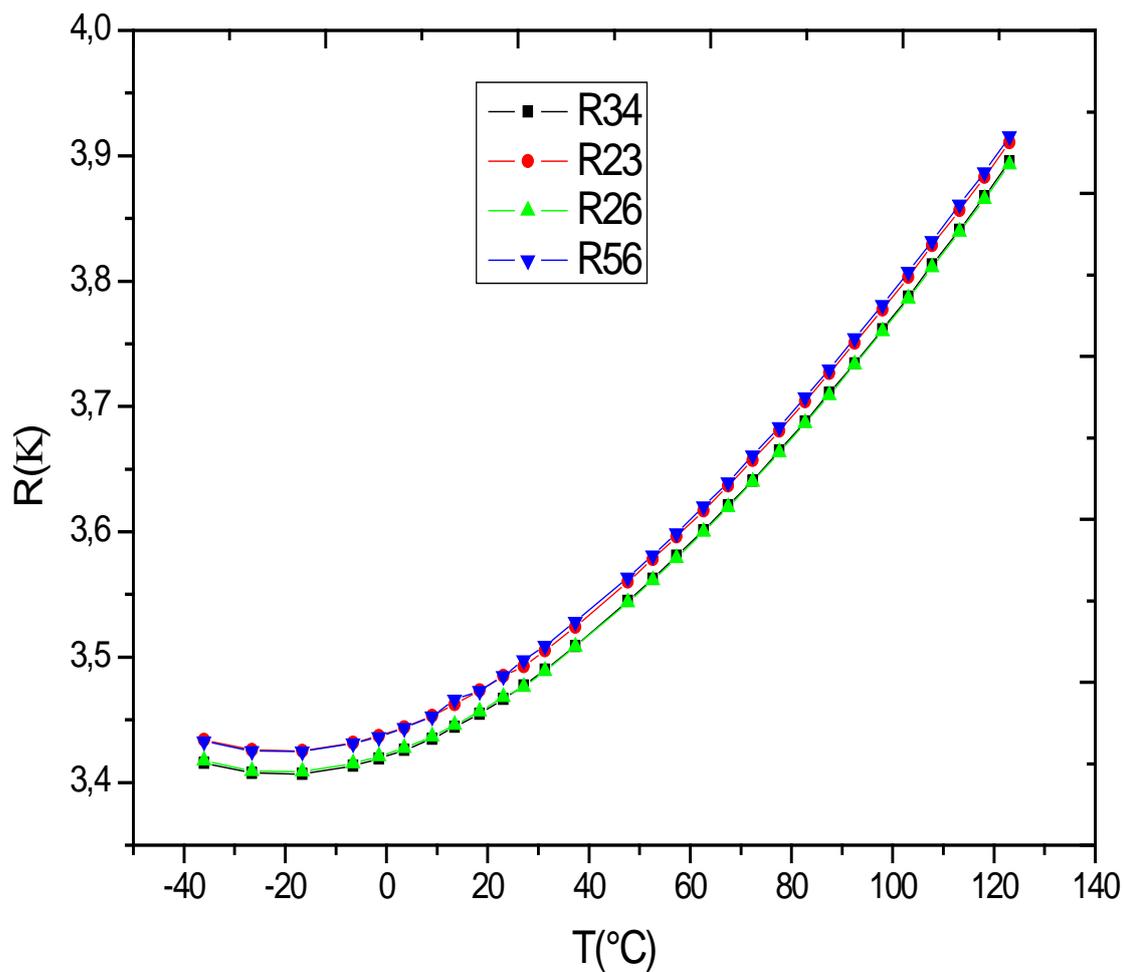


Figure (4.11) : Variation thermique des quatre jauges pour un capteur avec membrane avec écran

Les quatre jauges varient non linéairement en fonction de la température, le relevé des valeurs des quatre résistances nous a permis d'identifier les coefficients de température du premier et du second ordre de chaque jauge.

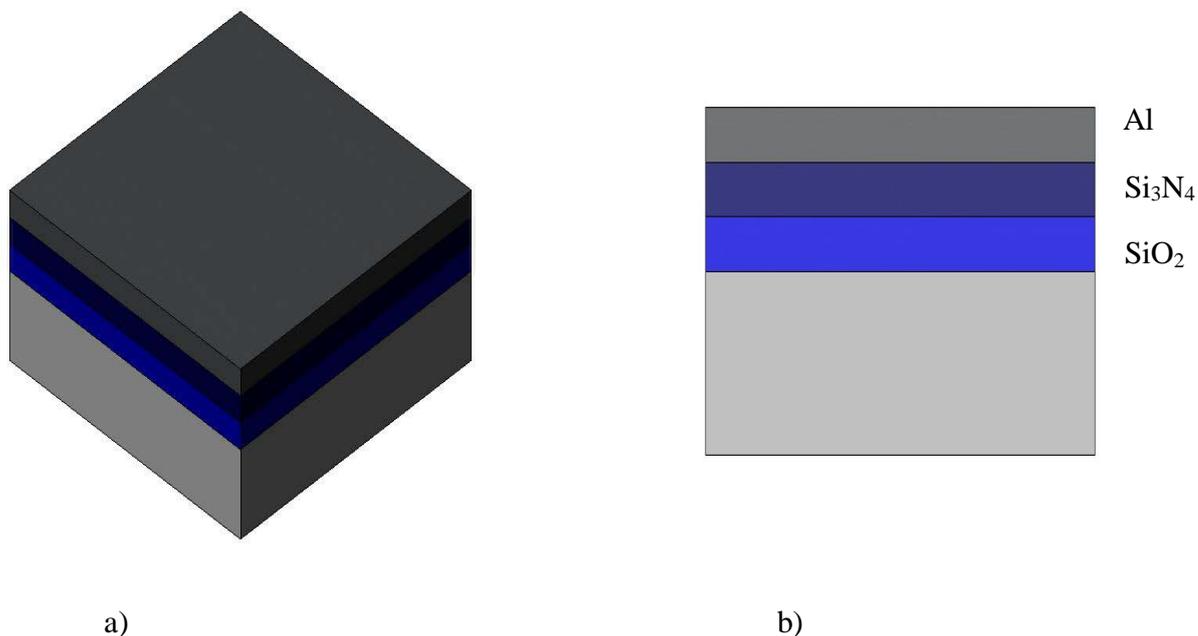
Le tableau (4.3) illustre les valeurs des coefficients de température du premier et du second ordre α et β

Jauge piézorésistif	Coefficient de température α	Coefficient de température β
R ₅₆	400ppm/°C	6.06 ppm/°C
R ₂₆	402 ppm/°C	5.92 ppm/°C
R ₂₃	400 ppm/°C	5.93 ppm/°C
R ₃₄	402 ppm/°C	6.09 ppm/°C

Tableau (4.3)

4.4.2 Capteur sans membrane avec écran.

Le deuxième capteur a été réalisé sans membrane avec écran



La figure (4.12) : Capteur sans membrane avec écran :

- a) Vue en perspective
- b) Vue de coupe

Nous avons relevé dans la figure (4.13) la variation thermique de la résistance des quatre jauges de ce type des capteurs.

De la même manière nous avons déterminé les coefficients de température du premier et du second ordre dans le tableau (4.4)

Jauge piézorésistif	Coefficient de température α	Coefficient de température β
R ₅₆	532 ppm/°C	5.43 ppm/°C
R ₂₆	501 ppm/°C	5.6 ppm/°C
R ₂₃	487 ppm/°C	5.24 ppm/°C
R ₃₄	562 pm/°C	4.8 ppm/°C

Tableau (4.4)

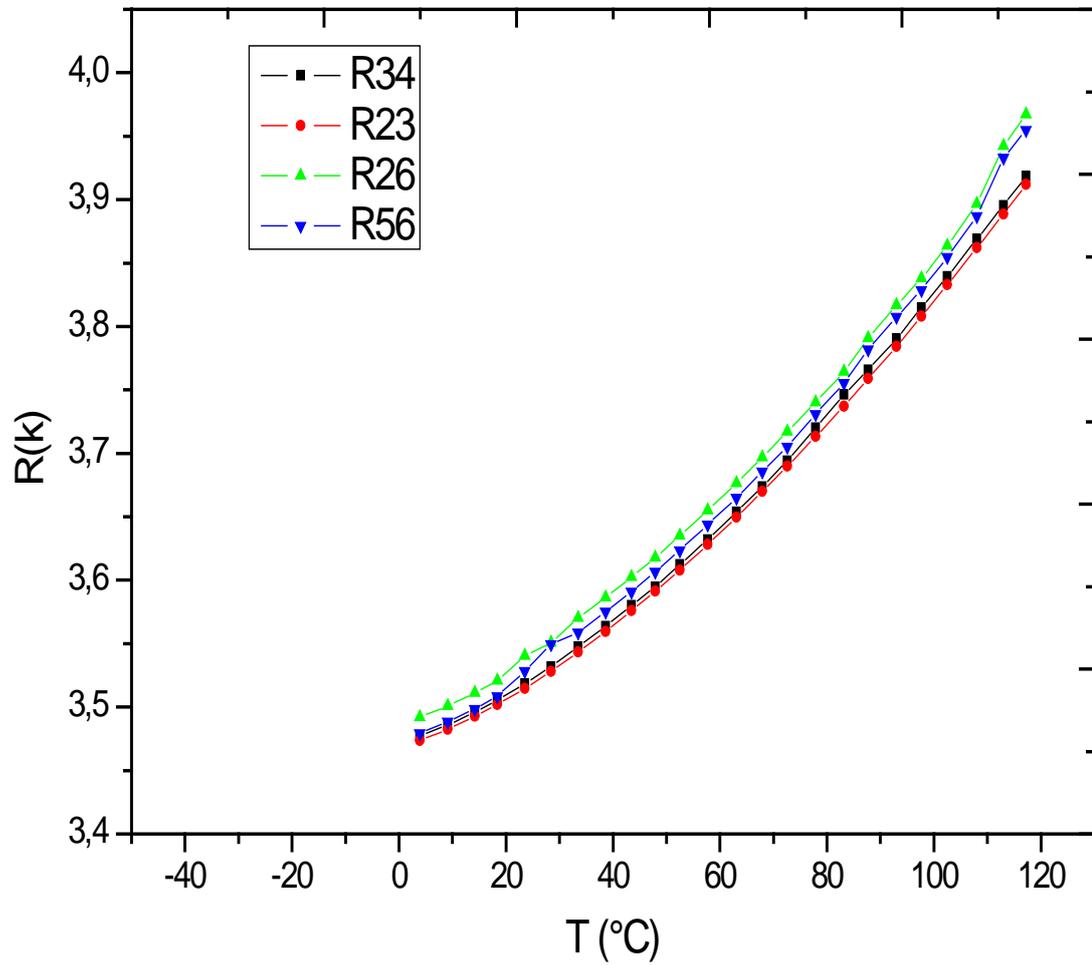
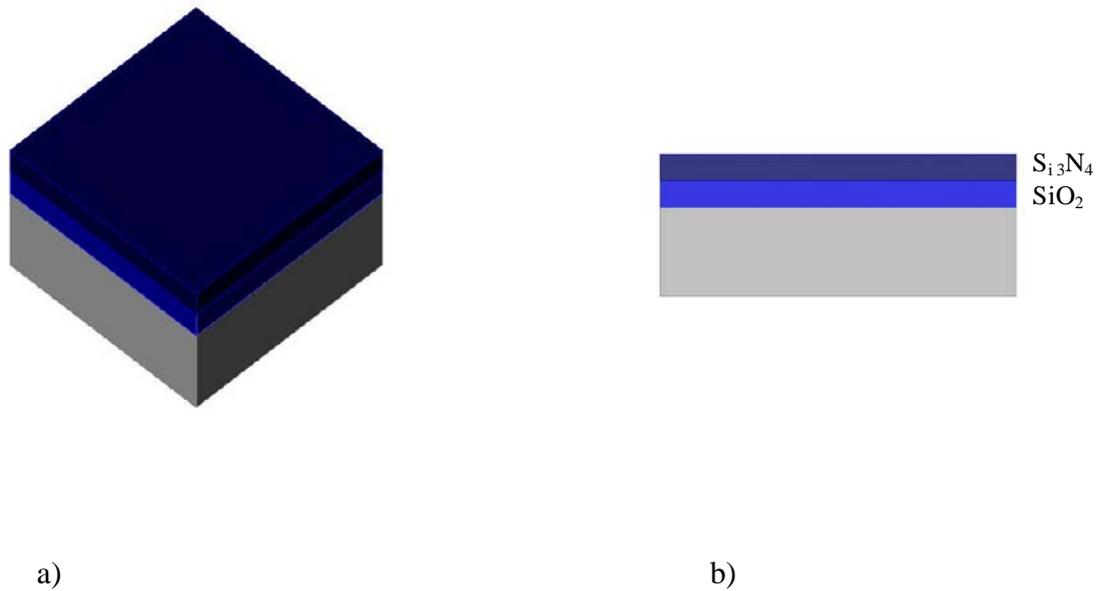


Figure (4.13) : Variation thermique des quatre jauges pour un capteur avec membrane sans écran

4.4.3 Capteur sans membrane sans écran :

Le troisième capteur a été réalisé sans écran sans membrane



La figure (4.14) : Capteur sans membrane sans écran :

a) Vue en perspective

b) Vue de coupe

La figure (4.15) montre l'évolution des quatre jauges d'un capteur de pression réalisé sans membrane et sans écran. On remarque toujours qu'il y a une non linéarité des jauges en fonction de la température.

Dans le tableau (4.5) , nous avons regroupé les valeurs des coefficients α et β

Jauge piézorésistif	Coefficient de température α	Coefficient de température β
R ₅₆	397 ppm°/C	5.97 ppm°/C
R ₂₆	388 ppm°/C	6.06 ppm°/C
R ₂₃	392 ppm°/C	6.06 ppm°/C
R ₃₄	397 ppm°/C	5.98 ppm°/C

Tableau (4.5)

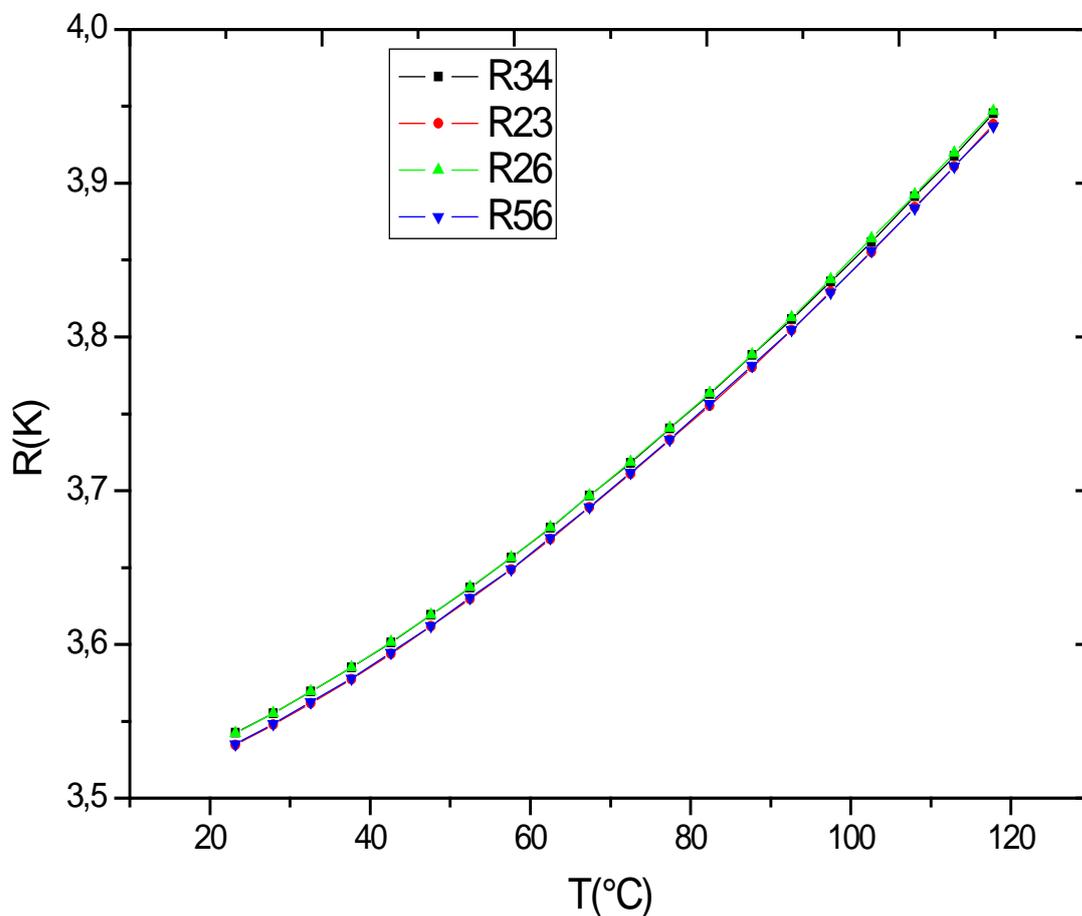


Figure (4.15) : Variation thermique des jauges pour un capteur sans membrane sans écran

4.5 Etude comparative du comportement thermique des trois types de capteurs :

La deuxième étape de notre travail consiste en une étude comparative de chaque jauge avec les autres jauges de même configuration pour les trois types de capteurs

4.5.1 Variation thermique de la jauge R_{56}

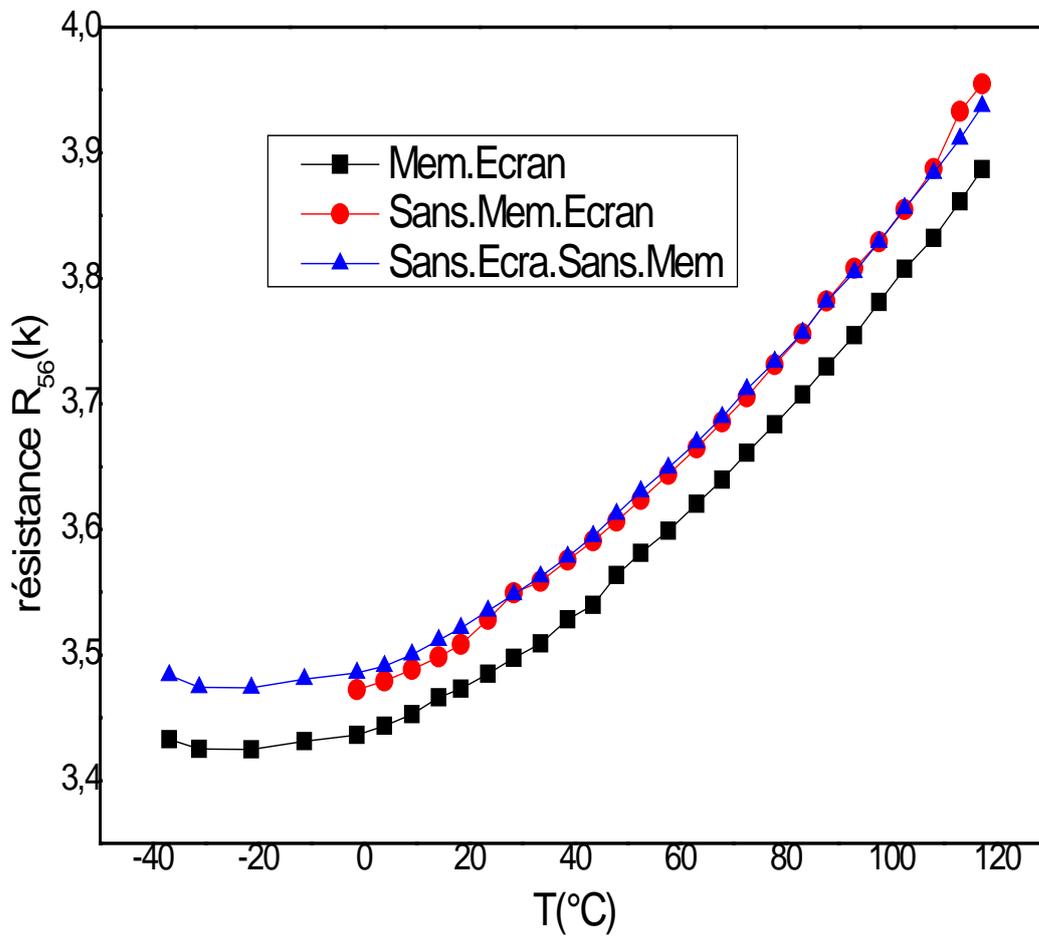


Figure (4.16) : Variation thermique de la jauge R_{56} pour les trois types de capteurs

4.5.2 Variation thermique de la jauge R_{26}

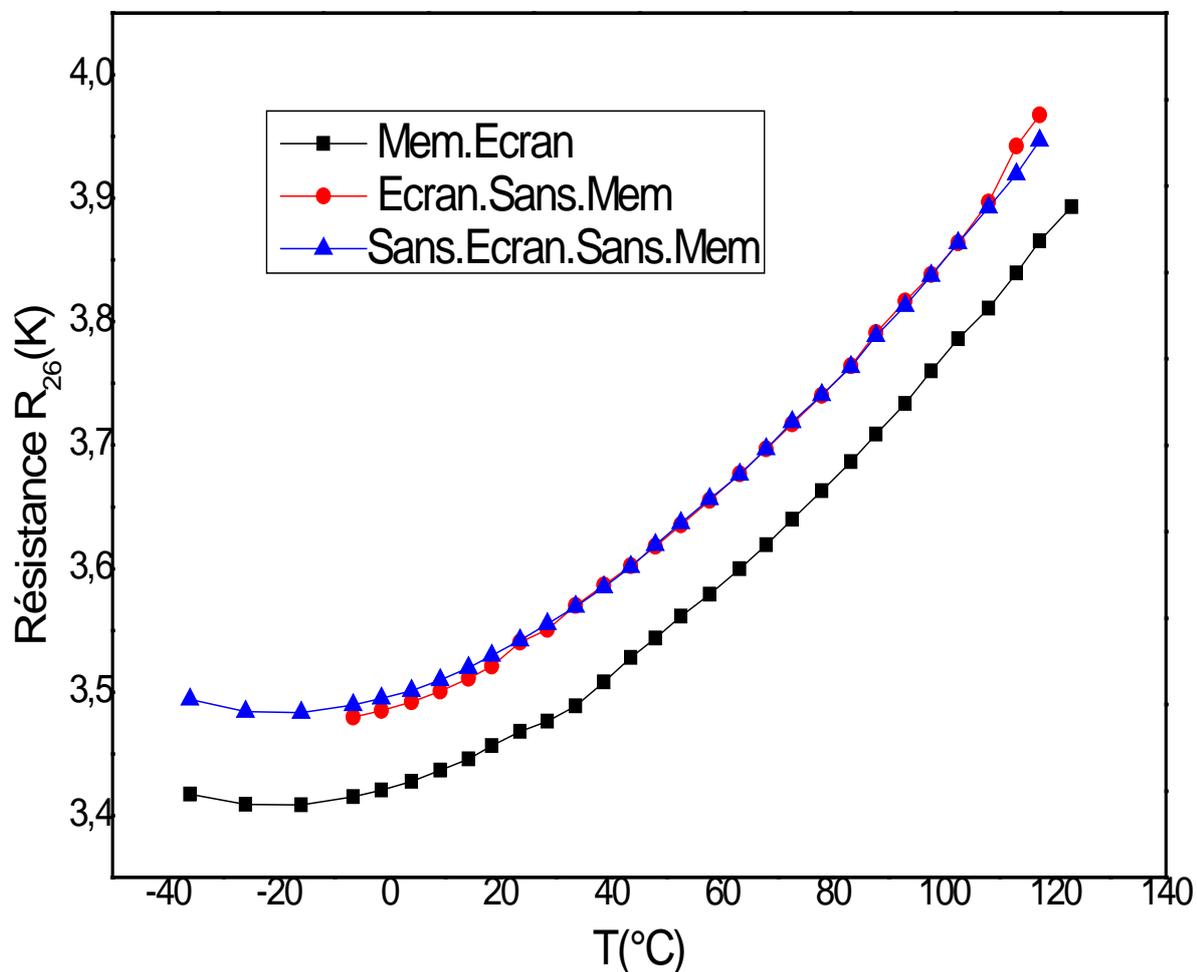


Figure (4.17) : Variation thermique de la jauge R_{26} pour les trois types de capteurs

4.5.3 Variation thermique de la jauge R_{23} :

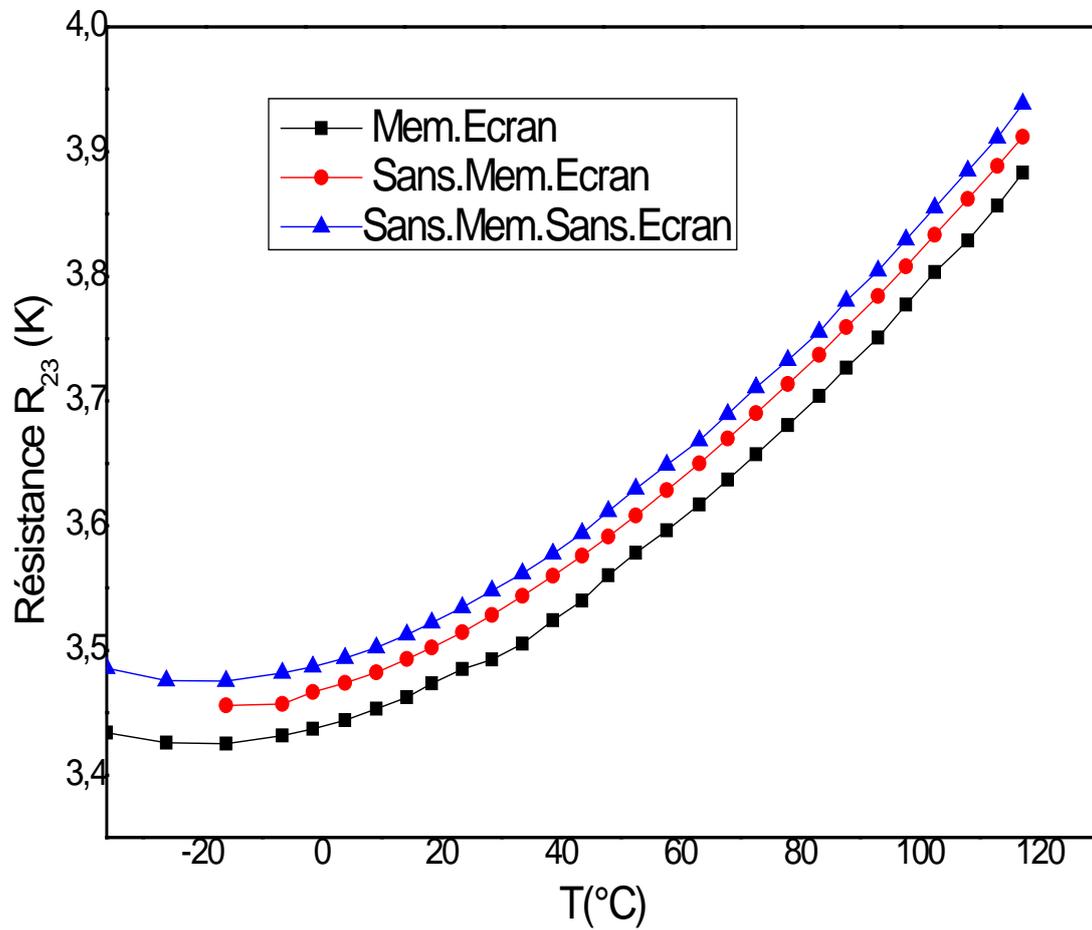


Figure (4.18) : Variation thermique de la jauge R_{23} pour les trois types de capteurs

4.5.4 Variation thermique de la jauge R_{34} :

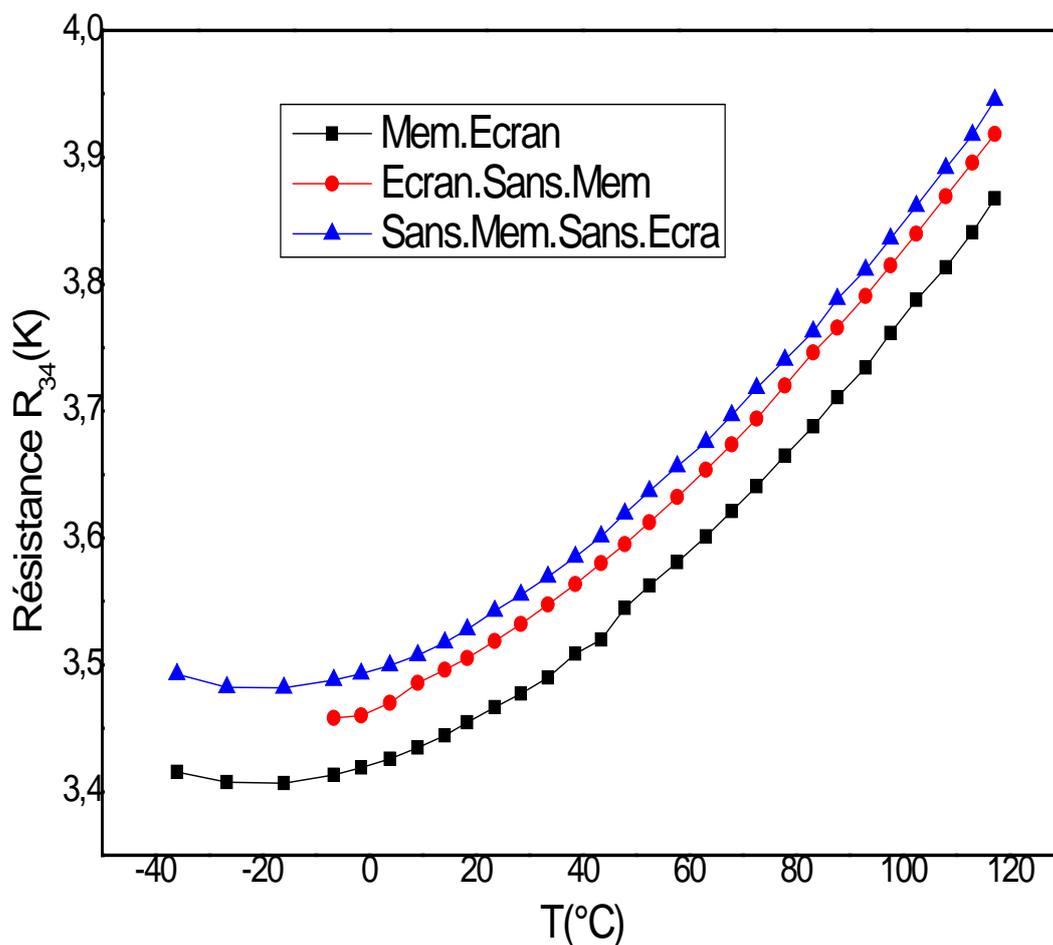


Figure (4.19) : Variation thermique de la jauge R_{34} pour les trois types de capteurs

En adoptant la même démarche que celle de la première partie de l'étude expérimentale, nous examinons successivement :

- Les variations des résistances en fonction de la température ont toutes des allures non linéaire pour les jauges étudiées pour les coefficients de température du premier et du second ordre α et β données dans les trois tableaux (4.3), (4.4) et (4.5) .
- Si on prend la température 25°C comme une température de référence ou température ambiante on peut constater un décalage de la valeur des résistances :
 - Les deux jauges parallèles aux deux bords de la membrane R_{56} et R_{23} correspondant aux deux capteurs sans membrane avec écran et sans écran sans membrane , il est de l'ordre de 45Ω , par rapport au capteur avec écran avec membrane .
 - Les deux autres jauges perpendiculaires aux deux autres bords de la membrane R_{34} et R_{23} correspondant aux deux capteurs sans membrane avec écran et sans écran sans membrane , il est de l'ordre de 75Ω par rapport au capteur avec écran avec membrane .

4.6 Comportement de la dérive thermique de la tension d'offset :

Nous avons présenté dans cette partie la variation thermique de la tension d'offset des trois types de capteur étudiés , après une comparaison de nos résultats obtenus avec deux autres types de capteur de pression , le premier est le capteur conventionnel sans écran avec membrane [12], le deuxième capteur c'est le type MPX7050 de la famille MOTOROLA, qui a été caractérisé en fonction de la température.

4.6.1 La dérive thermique de la tension d'offset pour les trois types de capteurs :

la dérive thermique de la tension d'offset , peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta V_0(T)}{V_A} = \frac{R_{56}(T_0)R_{26}(T_0)}{[R_{56}(T_0) + R_{26}(T_0)]^2} [(\alpha_{56} - \alpha_{26})\Delta T + (\beta_{56} - \beta_{26})\Delta T^2] - \frac{R_{34}(T_0)R_{23}(T_0)}{[R_{34}(T_0) + R_{23}(T_0)]^2} [(\alpha_{34} - \alpha_{23})\Delta T + (\beta_{34} - \beta_{23})\Delta T^2]$$

Avec $\alpha_{56}, \alpha_{26}, \alpha_{34}, \alpha_{23}$ et $\beta_{56}, \beta_{26}, \beta_{34}, \beta_{23}$ représentent respectivement les coefficients de température de premier et deuxième ordre des résistances R_{56}, R_{26}, R_{34} et R_{23} du pont de Wheatstone.

En utilisant les tableaux (4.3), (4.4) et (4.5) donnant les valeurs des coefficients de température du premier et du second ordre des trois capteurs étudiés , nous avons tracé dans la figure (4.20) la variation de la dérive thermique de la tension d'offset des trois types de capteurs .

D'après l'évolution des trois courbes tracés, on a constaté que :

- La température influe considérablement pour un capteur réalisé sans écran sans membrane.
- La variation de la dérive thermique d'un capteur sans membrane avec écran est une courbe non linéaire, présente des valeurs plus au moins similaire avec celles obtenus par un capteur réalisé avec écran avec membrane ayant une variation linéaire , cette caractéristique peut être compenser par l'utilisation d'un montage comportant un amplificateur différentiel le LM358 et un capteur de température de précision le LM335 .

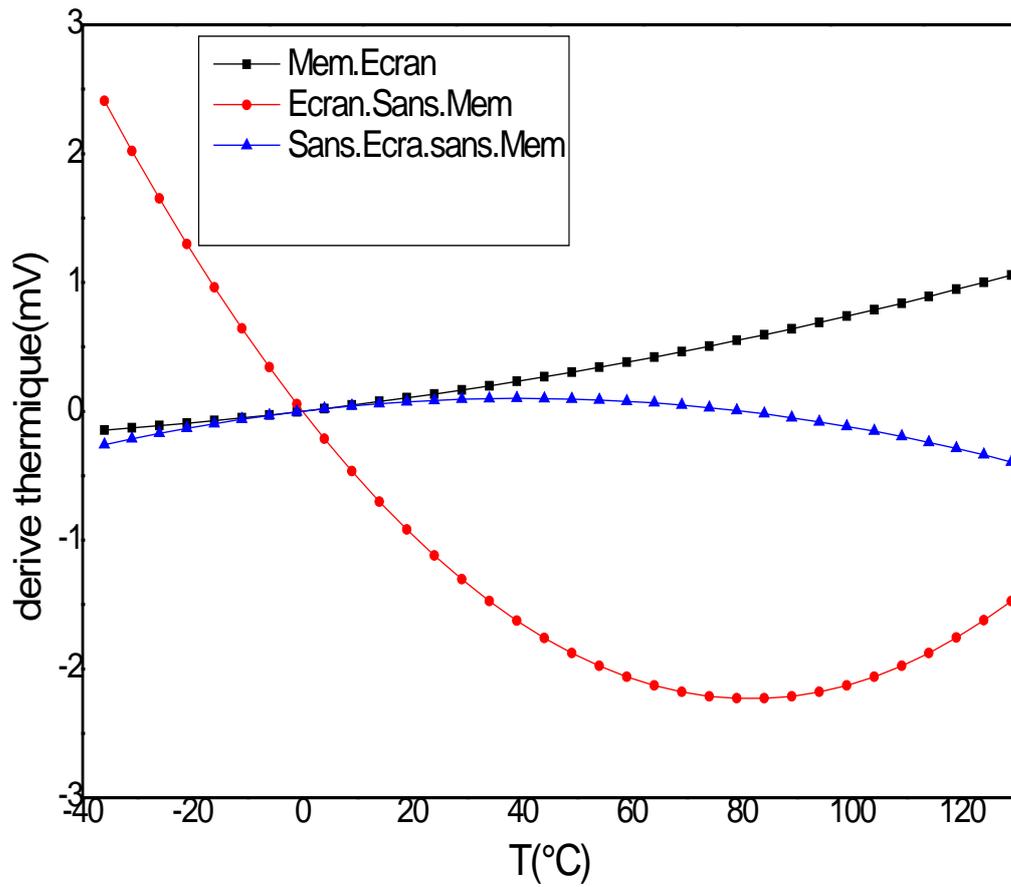


Figure (4.20) : Variation de la dérive thermique des trois types de capteurs

4.6.2 Capteur avec écran avec membrane – capteur sans écran avec membrane :

Pour confirmer la logique de nos estimations sur l'influence de l'écran sur le comportement thermiques des capteurs , nous avons représenté dans la figure (4.21) l'évolution en température de la dérive thermique des deux types de capteurs , avec écran avec membrane et sans écran avec membrane [12] ,

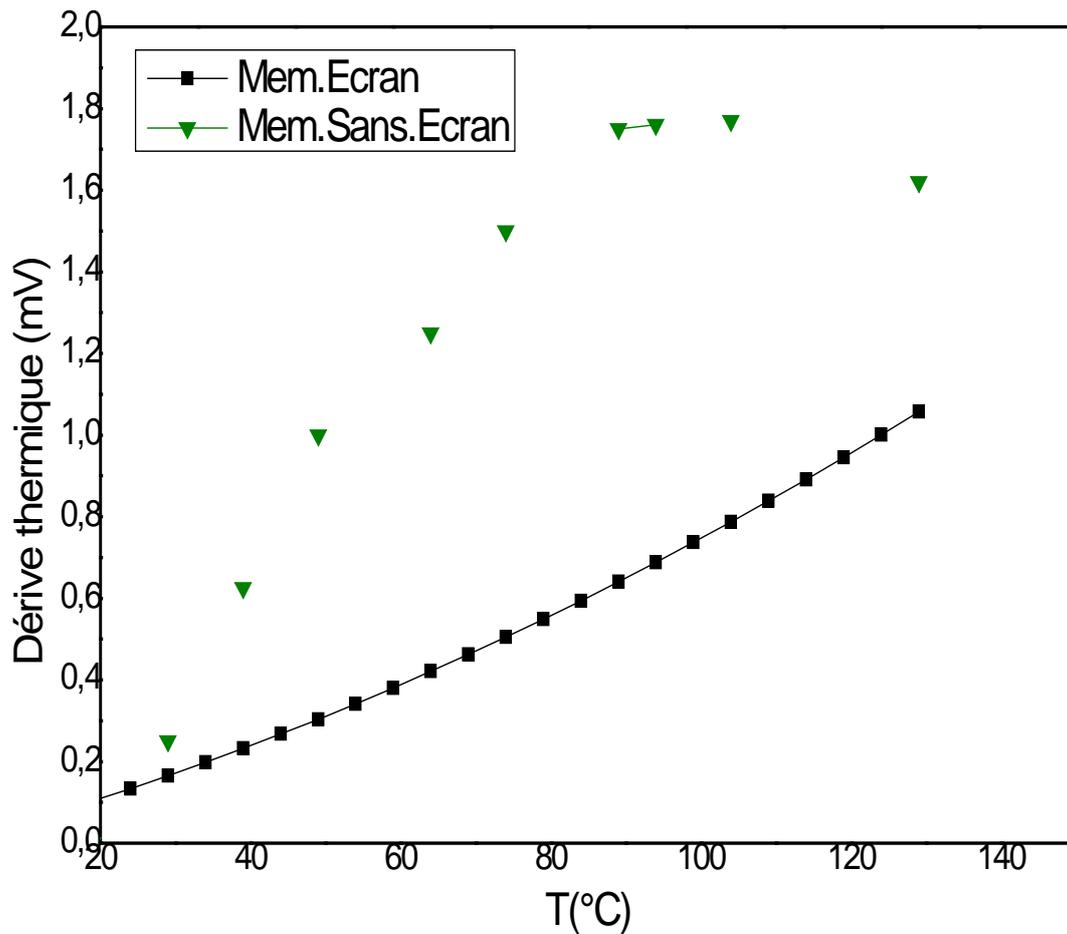


Figure (4.21) : Variation de la dérive thermique de la tension d'offset en fonction de la température des deux types de capteurs

Il est aisé de constater que le type des capteurs réalisés sans écrans avec membrane présentent des valeurs élevées de la dérive thermique par rapport aux ce qui sont réalisés avec écran avec membrane.

Dans une gamme de température supérieur à 30°C , nous avons constaté que le capteur sans écran présente des valeurs de la dérive thermique deux fois plus que celui avec écran.

Comme exemple : à température 80°C , le capteur réalisé sans écran a une valeur $\Delta V = 1.5\text{mV}$, alors que celui réalisé avec écran présente un $\Delta V = 0.58\text{mV}$.

4.6.3 Capteur avec écran avec membrane –capteur type MOTOROLA MPX 7050 [41] :

Dans notre étude nous avons caractérisé aussi un autre type des capteurs de pression piézorésistifs , c'est le MOTOROLA MPX 7050, ce capteur mesure des pressions allant jusqu'à 50 kPa , actuellement cette famille des capteurs est disponible sur le marché des composants .

De 25°C à 75°C la dérive thermique varie entre 0.25mV à 0.5mV , a delà de 75°C, cette tension augmente d'une rapidement pour atteindre 1.50mV à une température de 130°C

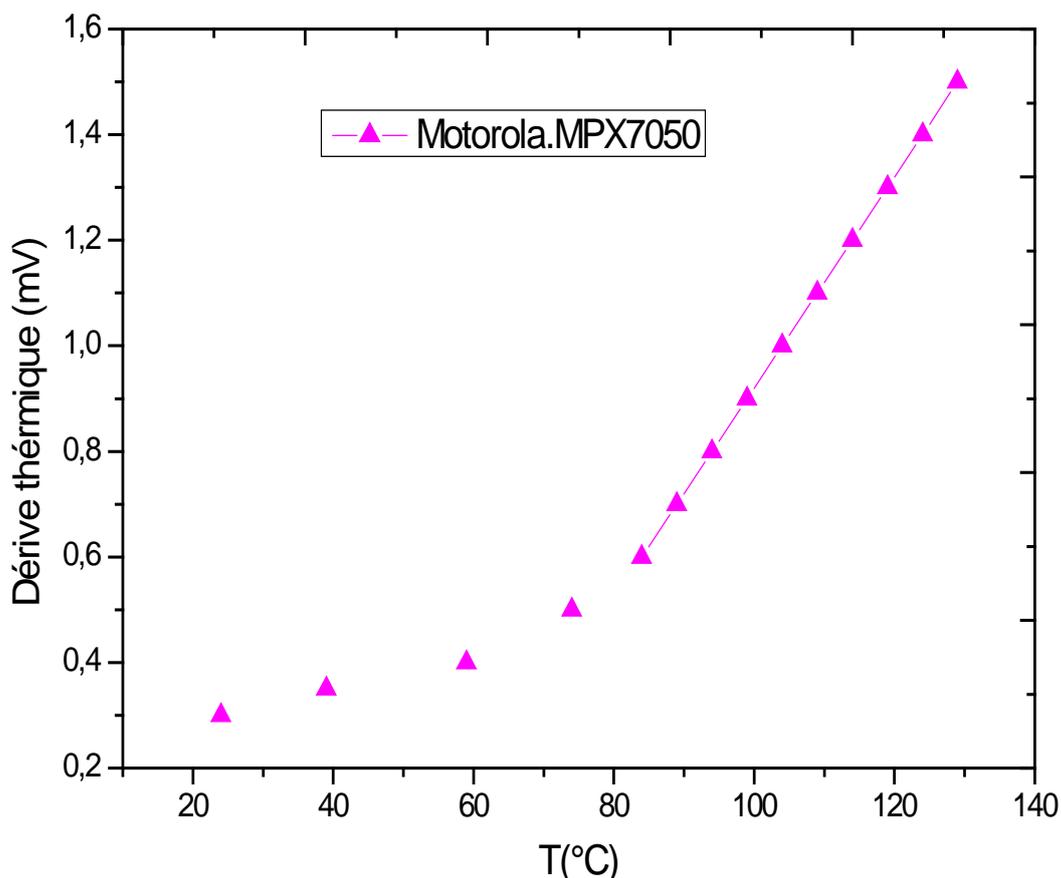
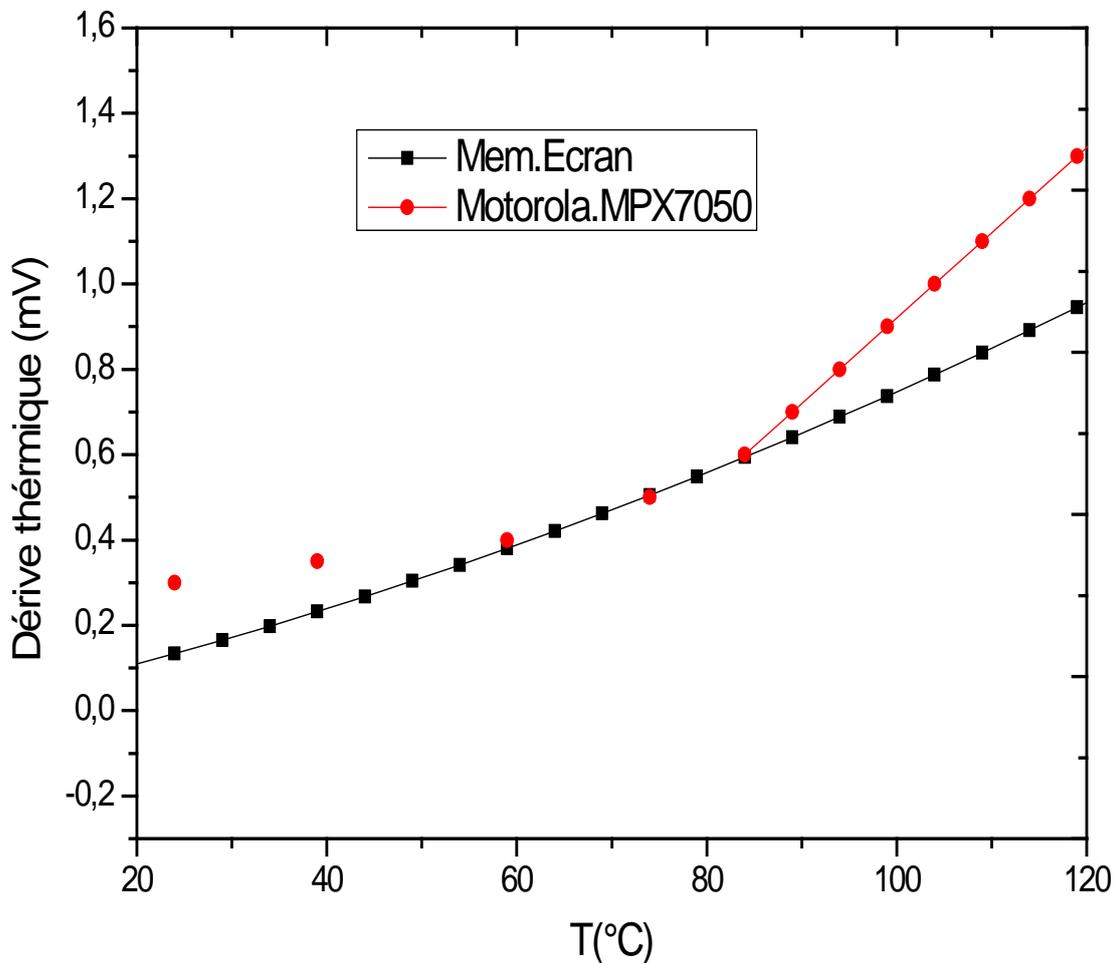


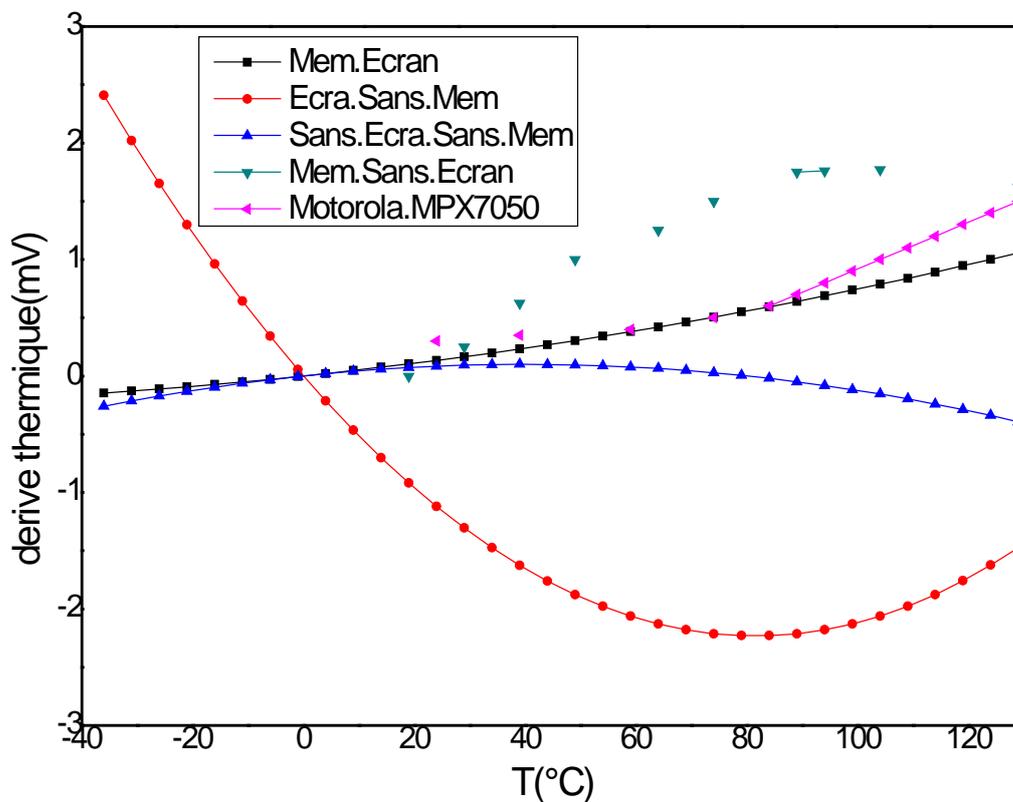
Figure (4.22) :Caractéristique de la dérive thermique de la tension d'offset pour le MOTOROLA MPX 7050

Nous avons regroupé dans la figure (4.23) les deux caractéristiques des deux types des capteurs avec écran avec membrane et le type MOTOROLA MPX 7050



Figure(4.23) : Caractéristiques thermiques des deux type des capteurs ,avec écran et le MOTOROLA MPX7050

La figure (4.23) montre bien que le capteur réalisé avec écran présente des faibles dérives thermiques par rapport à celui qui est de la famille MOTOROLA, dans la gamme de température entre 60°C et 85°C les valeurs de la dérive thermique des deux types des capteurs sont similaires.



Figure(4.24) : Caractéristiques thermiques des cinq types des capteurs étudiés

La figure (4.24) regroupe toutes les variations de la dérive thermique des cinq capteurs étudiés, capteur avec écran avec membrane, sans écran avec membrane, sans membrane avec écran, sans écran sans membrane et le type MOTOROLA MPX7050

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressé par les techniques de compensation de la dérive thermique de la tension d'offset , nous avons proposé deux techniques, la première est basée sur l'utilisation de la dérive électrique où on a vu que la dérive électrique peut compenser la dérive thermique par l'utilisation des capteurs de température CTP et CTN , la deuxième technique est une étude expérimentale qui consiste en une caractérisation des trois types de capteurs de pression piézorésistif. Nous avons constaté que le dépôt d'une couche d'aluminium au dessus de la membrane minimise la dérive thermique et ainsi améliore la réponse du capteur.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Une chaîne de mesure de pression apporte le traitement nécessaire au signal de mesure délivré par le capteur de pression, Ce paramètre physique joue un rôle primordiale dans cette chaîne de mesure, notre but essentiel de cette thèse est de définir les paramètres de non idéalités dans les capteurs de pression piézoresistifs en vue de minimiser et corriger les défauts qui peuvent entraîner à une mesure idéal de pression .

Les travaux qui font l'objet de ce mémoire s'inscrivent dans cette conclusion et se voudraient une contribution aux différents aspects liés à la conception et à la réalisation des capteurs de pression constitués par une membrane et des jauges de contraintes en Silicium monocristallin,

Dans le premier chapitre nous avons déterminé les capteurs de pression piézoresistifs ,dans une théorie exhaustive nous avons expliqué largement le phénomène de piézoresistivité , qui traduit le principe de base de fonctionnement des capteurs de pression piézoresistifs , partant du silicium le cœur d'un capteur de pression piézoresistif et ces caractéristiques physiques , thermiques et piézoresistives , nous sommes arrivé à déterminer les éléments essentiels qui peuvent construire ce capteur de pression , la membrane et les jauges piézoresistifs.

C'est pour la première fois que le Silicium poreux se présente comme un matériau de base dans la fabrication des capteurs de pression piézoresistifs, nous avons constaté qu'il a une sensibilité élevée par rapport au silicium monocristallin.

La modélisation des deux coefficients de température du premier et du second ordre a été l'objet du chapitre 2 , quatre modèles de mobilité ont été consacré pour l'étude détaillé de ces deux coefficients , le modèle de Klaassen, Arora , Dorckel et Masetti, l'étude de la mobilité ainsi la variation de la résistivité en fonction de la température nous a permis d'exploiter la méthode d'interpolation pour déterminer les valeurs des coefficients de température du premier et du second ordre , nous avons tracé l'évolution en dopage de ces deux coefficients, En faisant le regroupement de ces courbes de variations nous sommes arrivés aux résultats suivants :

L'allure du coefficient du premier ordre α obtenu par les quatre modèles de mobilité est presque la même, seulement dans le modèle de MASETTI dans toute la gamme de dopage ce coefficient présente des valeurs beaucoup plus grande que ceux obtenus avec les trois autres modèles ou la valeur de α est minimale entre 10^{18} cm^{-3} et 10^{19} cm^{-3} .

Dans l'intervalle du dopage indiqué le coefficient du deuxième ordre β présente une variation de pente négative pour les quatre modèles, ces valeurs sont beaucoup plus petites dans les modèles de MASETTI et ARORA par rapport aux modèle de KLAASSEN et DORCKEL. L'examen de ces trois courbes de variation de la tension d'offset montre que l'aspect parabolique prédomine quant la température varie entre pour les modèles étudiés .

L'aspect de discrétisation du profil de dopage en un nombre de segments bien définis fait l'objectif du chapitre 3 , ce modèle tient compte des importantes variations des coefficients, β et π_{44} en fonction du dopage pour arriver à une détermination suffisante du comportement résistif du silicium. Un développement mathématique basé sur des équations physiques de la piézoresistivité nous a permis, de proposer un modèle comportant deux expressions

analytiques de variations de la résistance du silicium. Dans le premier cas où le silicium est sous une pression nulle ce qui montre théoriquement l'absence des contraintes internes ($\sigma=0$), nous présentons l'expression de variation de la résistance en fonction de la température selon les deux coefficients de température de premier et du second ordre (α et β), dans le deuxième cas où on a une variation thermique négligeable, c'est-à-dire autour de la température ambiante ($T=T_0$), nous présentons la variation de la résistance seulement en fonction de deux paramètres, contrainte σ et coefficient de piézoésistivité α_{44} .

L'application du modèle nous a permis d'aboutir aux variations de la résistivité en fonction de la température par les quatre modèles.

On a constaté que la résistivité obtenues par les deux modèles Dorckel et Klaassen sont quasiment identiques, légèrement faibles par rapport au modèle de Masetti et un peu plus élevées par rapport au modèle de Arora.

les variations obtenues de la résistivité par les quatre modèles sont comprises entre les points expérimentaux relevés entre $2.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Le dernier chapitre est le siège d'un ensemble de techniques de compensation de la dérive thermique de la tension d'offset, deux méthodes de compensations proposées, la première est fondée sur l'utilisation de la dérive électrique, où nous avons vu qu'elle peut compenser la dérive thermique de la tension d'offset par l'utilisation des capteurs de température CTP et CTN en série ou en parallèle avec le pont de Wheatstone.

La deuxième technique expérimental repose sur le dépôt d'une couche d'aluminium sur la face supérieure de la membrane de et l'élaboration de jauges piézoresistives, nous avons mené à trait à l'étude expérimental des variations des jauges en fonction de la température ; en particulier nous avons étudié trois types de capteurs :

- Capteur avec membrane avec écran (L'écran est une couche très épaisse d'aluminium déposée au dessus de Nitrure de Silicium Si_3N_4)
- Capteur sans membrane avec écran.
- Capteur sans membrane et sans écran.

Le but de dépôt de cette couche est d'améliorer la réponse du capteur de pression, c'est-à-dire minimiser la dérive thermique de la tension d'offset[34].

L'étude en température s'est effectuée de -35°C à 120°C et elle a consisté à relever les variations thermiques des quatre jauges. Nous avons comparé nos résultats de la tension d'offset avec un autre type de capteur de pression piézoresistif de la famille MOTOROLA c'est le MPX7050.

Dans une approche systématique et graduelle des phénomènes qui sont à la base de l'évolution thermique des caractéristiques des jauges piézoresistifs des trois types de capteurs qu'on a étudiés dans ce laboratoire, La deuxième méthode de compensation a consisté à étudier et à évoluer le comportement en température de chacun. C'est ainsi qu'après les avoir découplé électriquement l'un de l'autre, nous avons relevé, la variation thermique de chaque jauge pour une température qui varie entre -30°C et 120°C . La figure ci-dessous montre la configuration des quatre jauges implantées dans la membrane.

Les techniques de compensations ont montrées que l'utilisation des peuvent compenser la dérive thermique de la tension d'offset et cela par l'utilisation de la dérive électrique , l'étude expérimental que nous a effectuée nous a permis de constater que le dépôt d'une couche d'aluminium (écran) au dessus de la membrane peut minimiser l'influence de la température sur la dérive thermique de la tension d'offset.

References Bibliographiques

- [1] S.P.Timoshenko, S.Woinowsky.Krieger
Theory of plates and shells
M.C Graw Hill, 1982
- [2] A.Boukabache, P.Menini, P.Pons
Les capteurs de pression
Techniques d'ingenieur, 2000
- [3] A.Boukabache
Conception , Modelisation et réalisation d'un capteur de pression piezoresistif à faible derive thermique
Doctorat d'état , Fevrier 1993, Université de Constantine
- [4] C.S.Smith
Piezoresistance effects in Germanium and Silicon
Physical Review , Vol.94, N°1 , p.42, April 1954
- [5] Yozo Kanda "A graphical representation of the piezoresistance coefficients in Silicon"
IEEE Trans. On Electron Devices , Vol.29, N°1, Jan. 1982
- [6] D.Tanaskovic , Z.Djuric , Z.Lazic
Influence of impurty distribution on thermal coefficients of resistivity and piezoresistivity of diffused layers in Silicon
Proc .20th International Conference on Microelectronics (MIEL'Nis, Serbia ,12-14 September 1995
- [7] L. T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers," Appl. Phys. Lett., vol. 57, p.1046, 1990.
- [8] O. N. Tufte, P. W. Chapman, and D. Long, "Silicon diffused element piezoresistive diaphragms," J. Appl. Phys., vol. 33, pp. 3322–3327, 1962.
- [9] Chirasree Pramanik and Hiranmay Saha
"Piezoresistive Pressure Sensing by Porous Silicon Membrane"
IEEE Sensors Journal , Vol 6, N° 2 , April 2006
- [10] D. S. McLachlan, "A new interpretation of percolation conductivity results with large critical regimes," Solid State Commun., vol. 60, pp. 821–825, 1986.

- [11] **M. Raslain**, A.Chaabi, A.Boukabache
“Contribution à l’identification des phénomènes perturbant l’idéalité du fonctionnement des capteurs de pression piézorésistifs au silicium”
Revue Science et technologie B, Constantine, N°28, Décembre 2008, pp 29-36
- [12] A.Boukabache, P.Pons, G.Blasquez, Z.Dibi,” Characterisation and modelling of the mismatch of TCRs and their effects on the drift of the offset voltage of piezoresistive pressure sensors,” Sensors and actuators A, 2000, 84, pp 292-296
- [13] D.B.klaassen.
A unified mobility for denice simulation- I. Model equations and concentration dependence
Solid-state electronics vol,n 7, pp 953-959, 1992
- [14] J.M Dorckel and P.H.Leturcq
Carrier mobilities in Silicon Semi –Empirically related to temperature doping and injection level.
Solid-state electronics, vol 24, n°9, pp 821-825, 1981.
- [15] N.D.Arora, J.R.Hauser, AND D.J.Rulson, IEEE transactions on Electron Devices, vol ED-29, p 292 (1982).
- [16] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi, “Modeling of carrier concentration in Arsenic-, Phosphorus-, and Boron-Doped Silicon,” IEEE Transactions on electron devices, 1983, Vol. ED-30, NO 7, pp.764-769
- [17] W.M. Bullis, F. H. Brewere, C. D. Kolstad, L. J.SWARTZENDRUBER,” Temperature coefficient or resistivity of Silicon and Germanium near room temperature” Solid-State Electronics, 1968, Vol. 11, pp. 639-646.
- [18] K.E.Petresen ,Silicon as a mechanical material,1982, proc.IEEE, Vol.70, n°5, pp 420-457
- [19]-K.Matsuda, K.Suzuki and Y.Kanda, 1993, Design of a pressure sensor compensated for nonlinear piezoresistance effect, Proc. 7th Inter.Conf on Solid-State Sensors and Actuators , pp 221-223 Yokohama, Japan
- [20] S,Shirousu,S. Kimijima,S, Sato
Offset temperature drift of silicon pressure sensor, proc.2nd sensor sympos, Tsukuba, japan, 1982, pp 157-161
- [21] C.Lombardi, S.Manzini, A.Saporito “ A physical Based Mobility Model for Numerical Simulation of Nonplanar Devices” ,Vol 7 ,1988, pp. 1164-1171
- [22] H.J.Kress, F.Bantien, J.Merek,M. Willmann, 1991, Silicon pressure sensor with integrated CMOS signal conditioning circuit and compensation of temperature coefficient, Sensors and Actuators A, pp 21-26

- [23] M. Delfino and J.M Deblasi “ boron ion implantation in silicon through selectively deposited tungsten films”, IEEE electron device letters , vol. EDL-6,pp 338-340, Jul 1985
- [24] V.I. Vaganov, “Construction problems in Sensors”, 1991, Sensors and Actuators, A28, pp.161-172
- [25] T. Takeda and A. Yoshii, “A two dimensional Boltzmann transport equation approach to ion implantation in silicon”, IEEE electron device letters , vol. EDL-4,pp 430-432, Dec 1983
- [26] **M. Ras Iain** and A.Chaabi “The combined Effects of Piezoresistance π_{44} and Temperature coefficient (α and β) in Resistive Behaviour of Silicon Type P) International Review on Modelling and Simulations , Praise Worthy Prize, Vol. 2 N.2 April 2009
- [27] S.I. Kozlovskiy, V.V. Nedostup, I.I. Boik ” First-order piezoresistance coefficients in heavily doped” ,Sensors And Actuators A,133,2007, pp. 72-81
- [28] S.S. Li “The dopant density and temperature dependence of hole mobility and resistivity in boron doped silicon, ”solid-state electron., vol. 21,no 10, pp. 1109-1117 , Oct .1978.
- [29] P.W. Chapman, O.N. Tufte, J. D.Zook, and D.Long , “Electrical properties of heavily doped silicon, “ J.Appl; phys., vol 34, no. 11, pp. 3291-3295 , Nov.1963.
- [30] T.Nishimoto et al. “ Temperature compensated piezoresistor fabricated by high energy ion omplantation ” , IEICE Trans. Electron devices, E 78-C , 1995 ,pp 152-156
- [31] **M.Ras Iain** and A.Chaabi, “Modelling of the thermal behaviour of the Offset Voltage of Piezoresistive pressure sensors”,CEE07,2nd International conference on electrical Engineering,2007, Coimbra-Portugal
- [32] S. Shirousu, S. Kimijima, S .Sato, “Offset temperature drift of silicon pressure sensor, Proc. 2nd sensor symp., Tsukuba, Japan, 1982, pp 157-161.
- [33] Yicai Sun, Xinyu Sun, Bing Sun, Qianhou Meng ” Electric drift of The bridge offset for pressure sensors end its utilization”, Sensors and Actuators A 58, 1997, pp 249-256
- [34] Yicai Sun, Zhenbin Gao, Li Qiang Tian, Yi Zhang “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, pp 125-132
- [35] M.Akbar and M.Shanblatt,” Tempearture compensation of piezoresistive pressure sensors ”, Sensors and Actuators A, 33, 1992, pp. 155-162
- [36] M. Leinonen, J. Juuti, H. Jantunen “ Interface circuit for resistive sensors utilizing digital potentiometers” ,Sensors and Actuators A, 138, 2007, pp.97-104
- [37] Francesca Campabadal, Josep Lluís Carreras, Enric Cabruja ” Flip-chip packaging of piezoresistive pressure sensors” , Sensors and Actuators A, 132, 2006, 415-419

[38] Marko Pavlin , Franc Novak “ Yield enhancement of piezoresistive pressure sensors for automotive applications” , Sensors and Actuators A, 141, 2008, 34-42

[39] V.Stankevic, C.Simkevicius “Application of Alluminium films as temperature sensors for the compensation of output thermal shift of silicon piezoresistive pressure sensors, Sensors and Actuators A 71 , 1998, pp.161-166

[40] Tsung-Lin Chou, Chen-Hung Chu, Chun-Te Lin, Kuo-Ning Chiang
“ Sensitivity analysis of packaging effects of silicon-based piezoresistive pressure sensor”
Sensors and Actuators A, 152, 2009 pp.29-38

[41] Motorola sensor device data MPX7050A

[42] A.Boukabache, P. Pons, ”Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor,”
electronics letters 28TH march 2002 vol. 38 N. 7, pp. 342-343.

Résumé

L'objet essentiel de ce travail de thèse consiste à une étude bien détaillé sur les paramètres physiques qui influent sur le bon fonctionnement des capteurs de pression piézo-resistifs. Le premier chapitre décrit une étude théorique sur deux types de capteurs de pression :

- Les capteurs de pression piézo-resistifs au Silicium monocristallin
- Les capteurs de pression à base de Silicium poreux

Dans les premiers types nous étudions la théorie de la piézo-résistivité avec les paramètres qui influent sur les coefficients de piézo-résistivité.

Dans le deuxième type nous présentons les caractéristiques physiques et mécaniques des membranes réalisées en Silicium poreux, ainsi leur utilisation dans la réalisation des capteurs de pression piézo-resistifs comme étant une nouvelle technologie de fabrication des capteurs de pression. Le deuxième chapitre est une approche théorique basée sur les modèles de mobilité dont l'objet et de modéliser les coefficients de température de premier et de second ordre (α et β) . Le troisième chapitre consiste à étudier l'effet combiné de ces deux coefficients de température et le coefficient de piézo-résistance π_{44} sur le comportement résistif du silicium type P . Le dernier chapitre propose deux techniques de compensation de la dérive thermique de la tension d'offset :

- la première est un développement mathématique basé sur des phénomènes physique avec lequel nous avons démontré comment la dérive électrique peut compenser la dérive thermique de la tension d'offset puis nous avons proposé l'utilisation des thermistance CTN et CTP selon deux montages différents, série et parallèle avec le pont de WHEATSTONE
- la deuxième est une étude expérimental consiste à déposer une couche d'aluminium sur la membrane pour minimiser la dérive thermique de cette tension .

ملخص :

الهدف الأساسي من هذا العمل المقدم في هذه الأطروحة يتمحور حول دراسة معمقة للخصائص الفيزيائية التي تؤثر على الوظيفة الجيدة لملتقطات الضغط البييزومقاومية. الفصل الأول منها هو عبارة عن دراسة نظرية حول ملتقطات الضغط المصنوعة من السيلسيوم أحادي البلور و يقدم كذلك الخصائص الفيزيائية للسيلسيوم المجوف ، وكذا إستعماله في صناعة لملتقطات الضغط ، وقد إكتشف أن له خصائص جيدة في هذا المجال . . الفصل الثاني هو عبارة عن دراسة نظرية حول المعاملات الحرارية من الدرجة الأولى و الثانية α و β . أما الفصل الثالث فيقدم التأثير المزدوج لهذه المعاملات الحرارية وكذا المعامل البييزومقاومي π على الخاصية المقاومة للسيلسيوم. الفصل الأخير يقترح تقنيتين لتخفيض التغير الحراري لإشارة المخرج عند السكون ، التقنية الأولى تتلخص في حساب رياضي أين نوضح أن التغير الكهربائي يمكن أن يخفض من التغير الحراري وذلك يربط مقاومة حرارية من نوع CTN أو CTP على التسلسل أو التوازي مع جسر وينسطون ، التقنية الثانية عبارة عن دراسة تطبيقية تهدف إلى التحسين التكنولوجي في مراحل وإنجاز ملتقطات الضغط بإستعمال الالومنيوم .

ANNEXE



50 kPa High Z_{in} , On-Chip Temperature Compensated & Calibrated Silicon Pressure Sensors

The new MPX7050 series pressure sensor incorporates all the innovative features of Motorola's MPX2000 series family including the patented, single piezoresistive strain gauge (X-ducer) and on-chip temperature compensation and calibration. In addition, the MPX7050 series has a high input impedance of typically 10 k Ω for those portable, low power and battery-operated applications. This device is suitable for those systems in which users must have a dependable, accurate pressure sensor that will not consume significant power. The MPX7050 series device is a logical and economical choice for applications such as portable medical instrumentation, and remote sensing systems with 4–20 mAmp transmission.

Features

- Temperature Compensated Over 0°C to +85°C
- Unique Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Easy to Use Chip Carrier Package Options
- Available in Differential and Gauge Configurations
- Ratiometric to Supply Voltage
- $\pm 0.25\%$ Linearity

Application Examples

- Portable Medical Instrumentation
- Remote Sensing Systems

Figure 1 shows a schematic of the internal circuitry on the stand-alone pressure sensor chip.

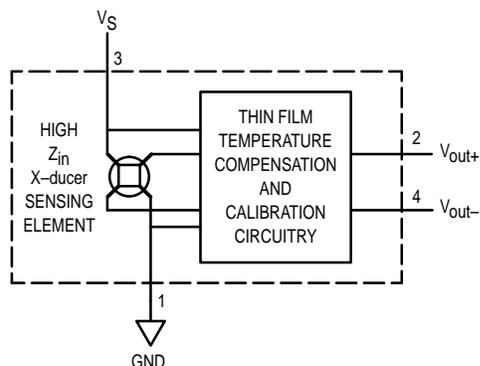


Figure 1. Temperature Compensated Pressure Sensor Schematic

VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

The differential voltage output of the X-ducer is directly proportional to the differential pressure applied.

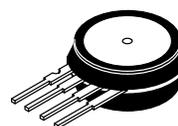
The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure side (P1) relative to the vacuum side (P2). Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum side (P2) relative to the pressure side (P1).

Senseon and X-ducer are trademarks of Motorola, Inc.

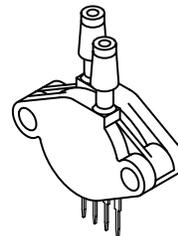
REV 3

MPX7050 SERIES

0 to 50 kPa (0 to 7.25 psi)
40 mV FULL SCALE SPAN
(TYPICAL)



**BASIC CHIP
CARRIER ELEMENT
CASE 344-15, STYLE 1**



**DIFFERENTIAL
PORT OPTION
CASE 344C-01, STYLE 1**

NOTE: Pin 1 is the notched pin.

PIN NUMBER			
1	Gnd	3	V _S
2	+V _{out}	4	-V _{out}

MPX7050 SERIES

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Overpressure ⁽⁸⁾ (P1 > P2)	P _{max}	200	kPa
Burst Pressure ⁽⁸⁾ (P1 > P2)	P _{burst}	500	kPa
Storage Temperature	T _{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T _A	-40 to +125	°C

OPERATING CHARACTERISTICS (V_S = 10 Vdc, T_A = 25°C unless otherwise noted, P1 > P2)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	P _{OP}	0	—	50	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V _S	—	10	16	Vdc
Supply Current	I _o	—	1.0	—	mAdc
Full Scale Span ⁽³⁾	V _{FSS}	38.5	40	41.5	mV
Offset ⁽⁴⁾	V _{off}	-1.0	—	1.0	mV
Sensitivity	ΔV/ΔP	—	0.80	—	mV/kPa
Linearity ⁽⁵⁾	—	-0.25	—	0.25	%V _{FSS}
Pressure Hysteresis ⁽⁵⁾ (0 to 50 kPa)	—	—	±0.1	—	%V _{FSS}
Temperature Hysteresis ⁽⁵⁾ (-40°C to +125°C)	—	—	±0.5	—	%V _{FSS}
Temperature Effect on Full Scale Span ⁽⁵⁾	TCV _{FSS}	-1.0	—	1.0	%V _{FSS}
Temperature Effect on Offset ⁽⁵⁾	TCV _{off}	-1.0	—	1.0	mV
Input Impedance	Z _{in}	5000	—	15,000	Ω
Output Impedance	Z _{out}	2500	—	6000	Ω
Response Time ⁽⁶⁾ (10% to 90%)	t _R	—	1.0	—	ms
Warm-Up	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁹⁾	—	—	±0.5	—	%V _{FSS}

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Weight (Basic Element Case 344-15)	—	—	2.0	—	Grams
Common Mode Line Pressure ⁽⁷⁾	—	—	—	690	kPa

NOTES:

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self-heating.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using end point method, over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
 - TcSpan: Output deviation at full rated pressure over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Common mode pressures beyond specified may result in leakage at the case-to-lead interface.
- Exposure beyond these limits may cause permanent damage or degradation to the device.
- Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

LINEARITY

Linearity refers to how well a transducer's output follows the equation: $V_{out} = V_{off} + \text{sensitivity} \times P$ over the operating pressure range. There are two basic methods for calculating nonlinearity: (1) end point straight line fit (see Figure 2) or (2) a least squares best line fit. While a least squares fit gives the "best case" linearity error (lower numerical value), the calculations required are burdensome.

Conversely, an end point fit will give the "worst case" error (often more desirable in error budget calculations) and the calculations are more straightforward for the user. Motorola's specified pressure sensor linearities are based on the end point straight line method measured at the midrange pressure.

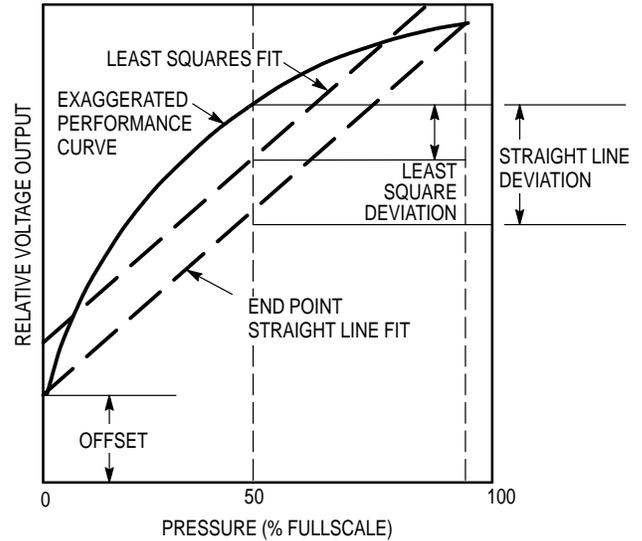


Figure 2. Linearity Specification Comparison

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION and CALIBRATION

Figure 3 shows the output characteristics of the MPX7050 series at 25°C. The output is directly proportional to the differential pressure and is essentially a straight line.

The effects of temperature on Full Scale Span and Offset are very small and are shown under Operating Characteristics.

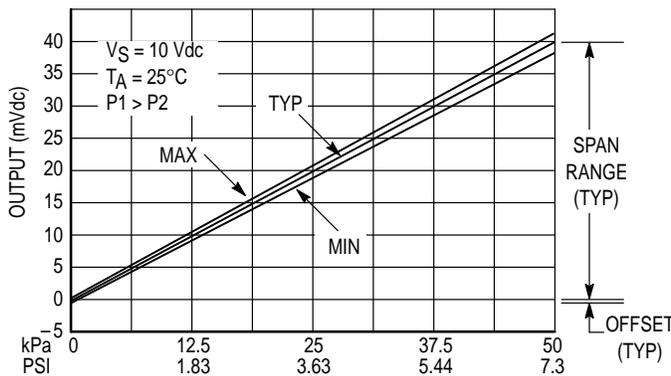


Figure 3. Output versus Pressure Differential

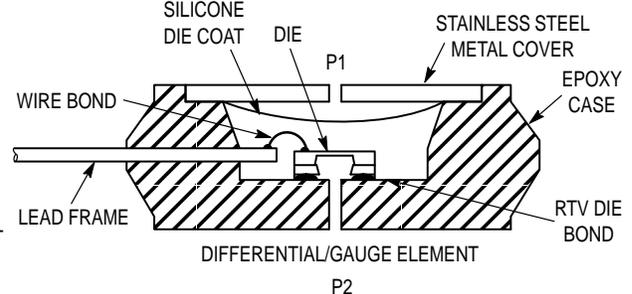


Figure 4. Cross-Sectional Diagram (not to scale)

Figure 4 illustrates the differential or gauge configuration in the basic chip carrier (Case 344-15). A silicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

Characteristics and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media other than dry air may have adverse effects on sensor performance and long term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

The MPX7050 series pressure sensor operating charac-