

Chapitre IV :

Conception d'une micro-jauge de contrainte piézorésistive pour la détection de déformations dans les structures

IV.1.Introduction

Le capteur de déformation qu'on veut concevoir est constitué principalement de quatre jauges de contrainte piézorésistive. L'étude d'un tel capteur doit donc passer par une modélisation des comportements mécanique et électrique des jauges. Un modèle thermique sera aussi ajouter pour la prise en considération de l'effet de la température sur la réponse du capteur.

IV.2.Modélisation et conception du capteur de déformation

Nous avons opté, pour la mesure de la pression mécanique, pour la détection piézorésistive qui offre une réponse linéaire sur une large gamme de mesure. Cependant, cette technique de transduction présente une sensibilité non négligeable à la température. Une étude de l'effet de la température sur la réponse de ce capteur sera donc présentée.

IV.2.1.Réponse mécanique du capteur

Un capteur de pression piézorésistif est composé d'une membrane de quelques millimètres de côté et quelques dizaines de microns d'épaisseur qui constitue le corps d'épreuve. Sous l'effet d'une pression mécanique appliquée, cette membrane se déforme pour

mesurer le degré de déformation de la structure à surveiller. Des jauges piézorésistives implantées en surface permettent de détecter cette déformation par une variation de résistance.

Nous allons établir dans ce qui suit les équations qui régissent le comportement mécanique de la membrane de silicium en se basant sur la théorie d'élasticité dans les cristaux cubique et sur la théorie des plaques minces.

La déformation de la membrane de Silicium due à l'application d'une pression homogène est calculée à partir de l'équation suivante :

$$W_N(u, v) = (1 - u^2)^2 \cdot (1 - v^2)^2 \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n k_{ij} u^i v^j \right] \quad (4.1)$$

La figure ci-dessous illustre la déformation de la membrane :

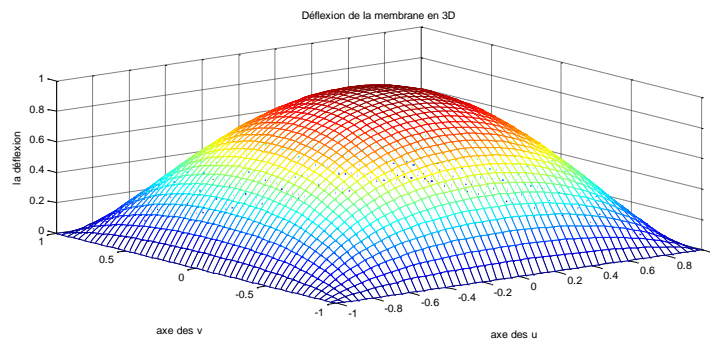


Figure IV.1: Déformation de la membrane.

Le tenseur des contraintes étant directement lié au tenseur de déformation, nous pouvons alors calculer et tracer la répartition des contraintes sur la surface de la membrane à partir des équations suivantes :

Nous avons aussi déterminé la pression maximale d'utilisation du capteur en fonction de ses paramètres géométriques :

$$P_{max} = \sigma_e \frac{h^2 D}{b^2 C_{11}} \left[\frac{1}{k_{00}(R) + k_{20}(R)} \right] \quad (4.3)$$

IV.2.1. Réponse électrique du capteur

La détection de la variation de pression se fait à travers la diffusion de jauges piézorésistives sur la surface de la membrane et de les monter en pont de Wheatstone pour assurer un maximum de sensibilité et une immunité contre les effets de température.

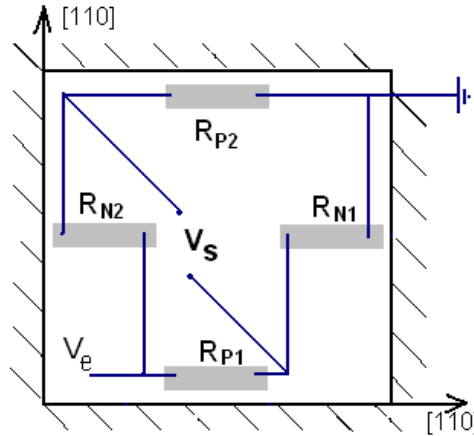


Figure IV.2: Disposition des jauges sur la membrane.

Dans un tel montage, la tension de sortie au repos s'écrit :

$$V_{S0} = \left(\frac{R_{N1}}{R_{P1} + R_{N1}} - \frac{R_{P2}}{R_{N2} + R_{P2}} \right) V_e \tag{4.4}$$

Sous l'effet d'une pression appliquée à la membrane, les valeurs des résistances varient et dans le cas de résistances appairées deux à deux ($R_{P1}=R_{P2}$) et ($R_{N1}=R_{N2}$), la tension de sortie s'écrit :

$$\frac{\Delta V_S}{V_e} = \left[\left(R_{N1} \left(1 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) - R_{P1} \left(1 + \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \right) / \left(R_{N1} \left(1 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) + R_{P1} \left(1 + \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \right) \right] \tag{4.5}$$

IV.2.3. Réponse thermique du capteur

Les jauges piézorésistive sont très sensibles à la variation de température. Ceci oblige de faire une étude de l'effet de la température sur les caractéristiques du capteur. En connaissant les variations de la mobilité en fonction de la température, on peut tracer les courbes de la variation relative de la résistivité en fonction du dopage et de la température.

La variation relative de résistivité sera donc exprimée par la relation suivante, où R_0 est la résistance à la température ambiante, α et β sont respectivement, les coefficients de température de 1^{er} et de 2^{ème} ordre :

$$\frac{\Delta R}{R_0}(T) = \alpha T + \beta T^2 \tag{4.6}$$

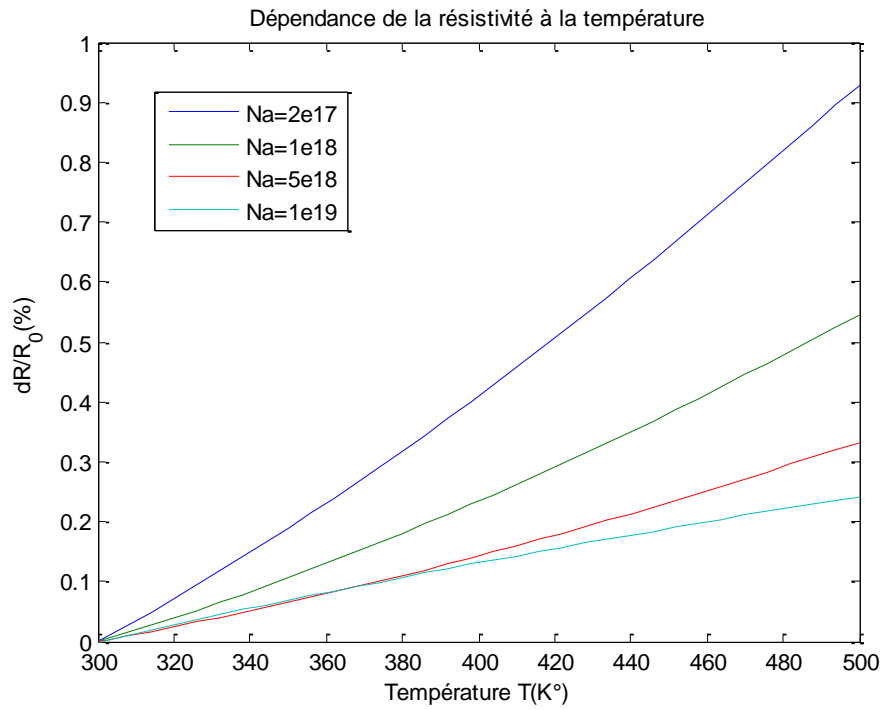


Figure IV.3: Modèle de Arrora.

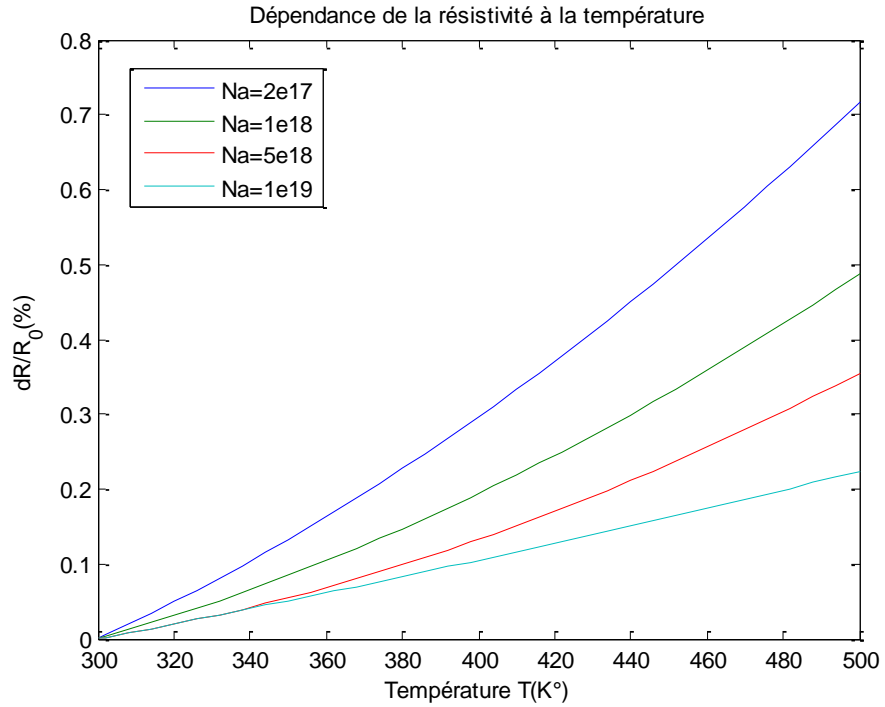


Figure IV.4: Modèle de Dorckel.

Une interpolation des courbes de ces courbes avec l'équation (4.6) nous donne les valeurs des coefficients α et β en fonction du dopage pour les deux modèles cités ci-dessus.

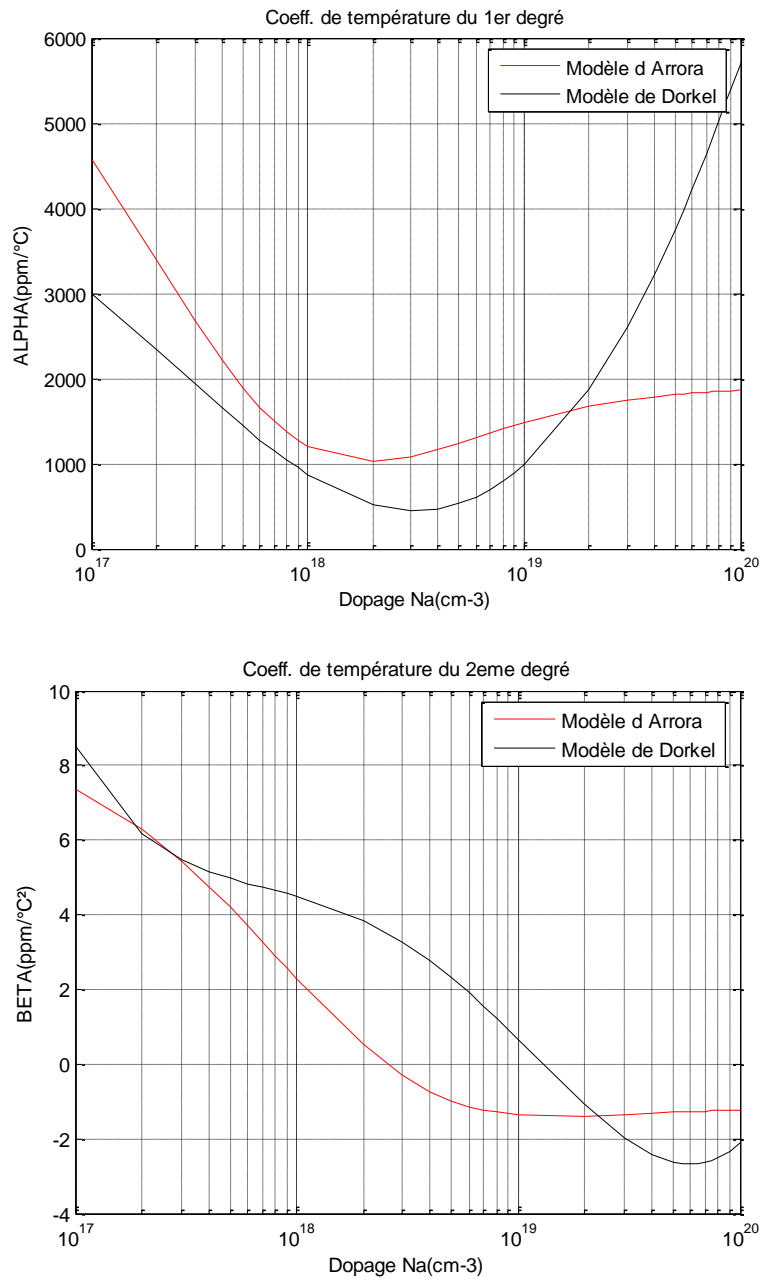


Figure IV.5: Extrapolation des coefficients thermique.

La sensibilité du pont en température ambiante est donnée par la relation :

$$\frac{\Delta V_S}{V_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} - \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \tag{4.7}$$

En remplaçant les variations relatives des résistances parallèles et normales par leurs expressions respectives on obtient l'expression qui décrit la tension de sortie du capteur en fonction de la pression :

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{\pi_{44}}{2} P \left(\frac{a}{h}\right)^2 (\bar{\sigma}_l - \bar{\sigma}_t) \tag{4.8}$$

On peut aussi tracer la variation de la sensibilité du capteur en fonction de la température et en fonction de la concentration de dopage des jauges piézorésistives.

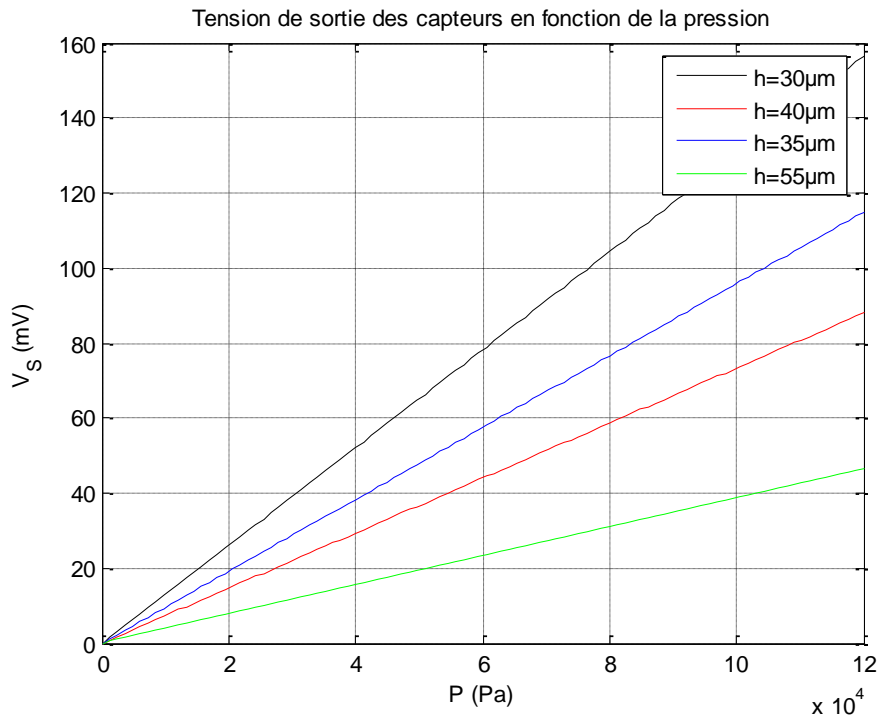


Figure IV.6: Courbe caractéristique du capteur.

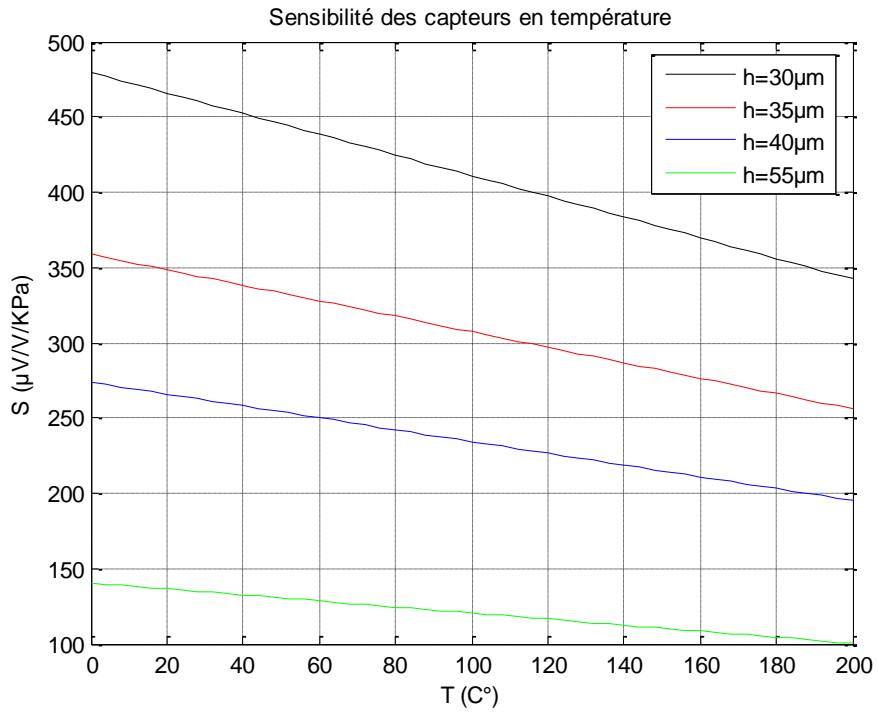


Figure IV.7: Effet de la température sur la sensibilité du capteur.

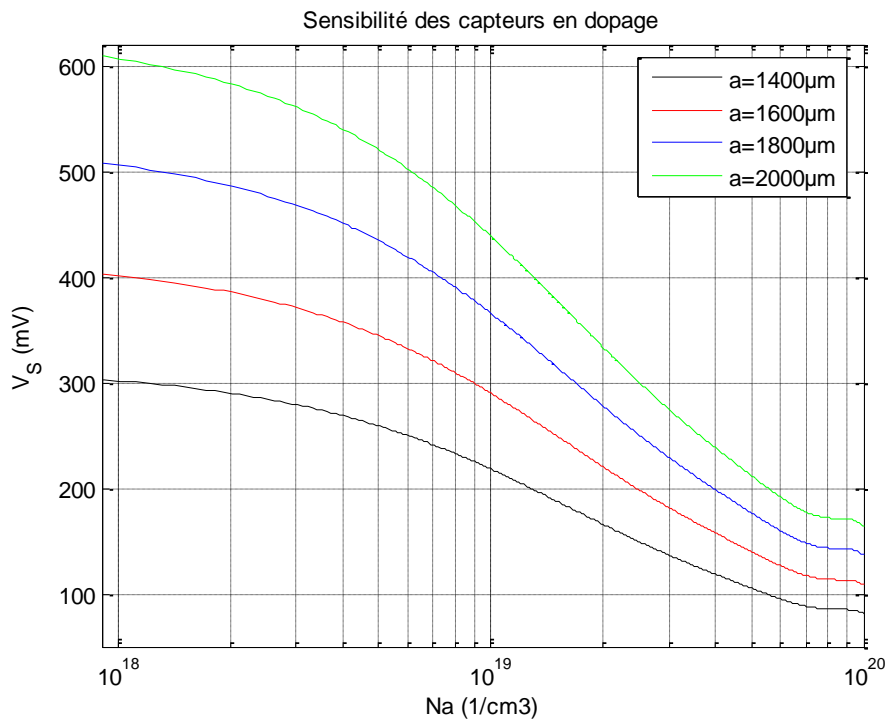


Figure IV.8: Effet du dopage sur la sensibilité du capteur.

IV.2.4.Récapitulatif

En rassemblant les éléments de modélisation précédents, on peut construire un modèle global. Ce modèle prend en compte le comportement mécanique, électrique et thermique de notre capteur. La force de ce modèle réside dans sa simplicité qui se traduit donc par un temps de calcul très réduit. De plus, c'est un modèle très flexible car il permet au concepteur de créer son capteur avec les caractéristiques qu'il souhaite en jouant sur les paramètres influant qu'on a définis précédemment. Cependant, et comme on l'a mentionné précédemment, l'amélioration de certaines caractéristiques du capteur entraîne la dégradation d'un ou de plusieurs d'autres caractéristiques. Par exemple, l'amélioration de la sensibilité du capteur entraîne souvent une perte en robustesse et en immunité contre les effets de la température, et vice versa. Ceci est dû à la manière dont les paramètres influent sur les caractéristiques du capteur. Certains paramètres influent les caractéristiques de manière proportionnelle linéaire ou exponentielle. D'autres de manière inversement proportionnelle linéaire ou exponentielle.

IV.3.Simulation et résultats

Dans cette partie nous allons faire la conception d'une plateforme pour la surveillance de la santé des structures. Cette plateforme sera composée des différents capteurs et de la chaîne d'acquisition, modélisés dans la section précédente.

A partir des modèles physiques déjà élaborés en partie II, nous allons créer des modèles comportementaux pour chaque capteur et le simuler sous Matlab à l'aide de l'outil Simulink. Nous allons donner dans ce qui suit les structures internes du capteur de déformation. Ce modèle, constitué de cinq sous-blocs, simule un capteur de pression mécanique piézorésistif en prenant en compte l'effet de la température sur la valeur nominale des jauges et sur les coefficients de piézorésistivité.

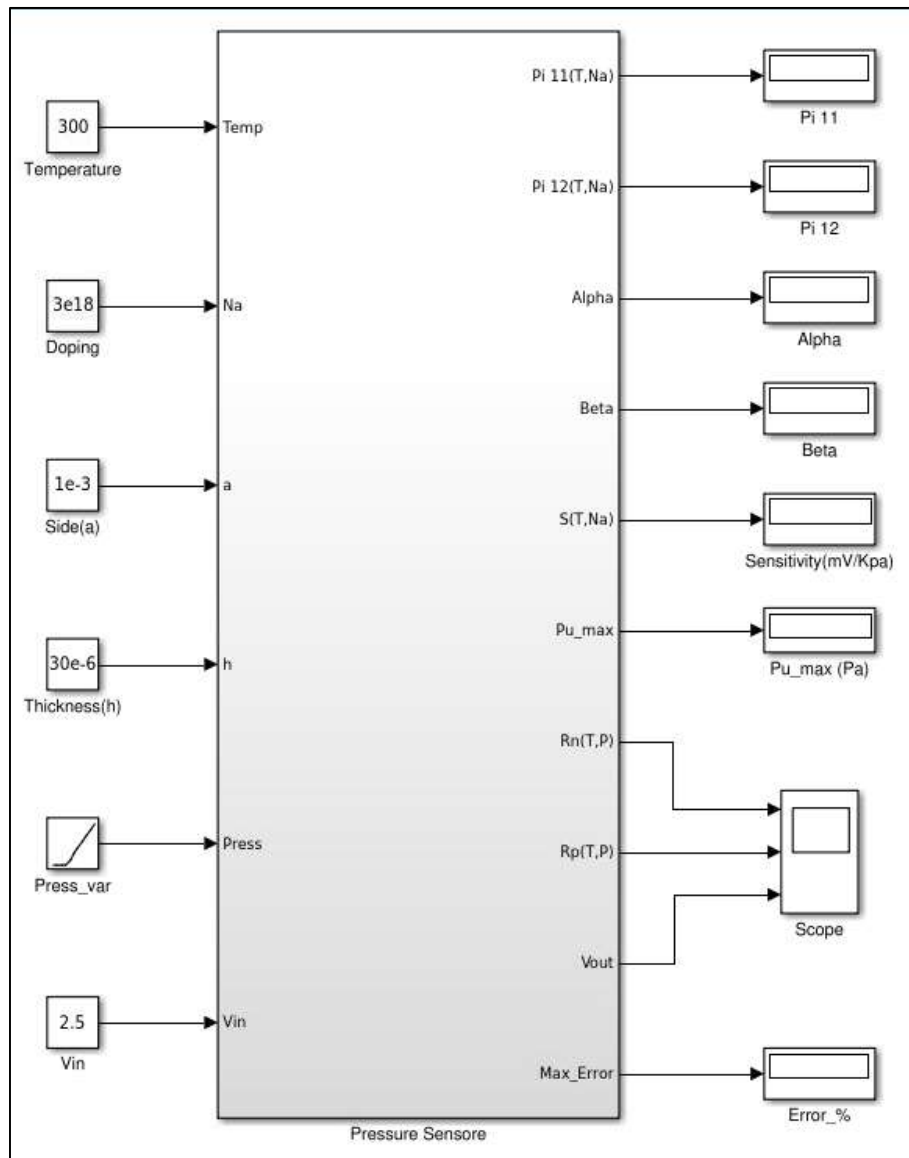


Figure IV.9: Structure externe du capteur de déformation sur Simulink.

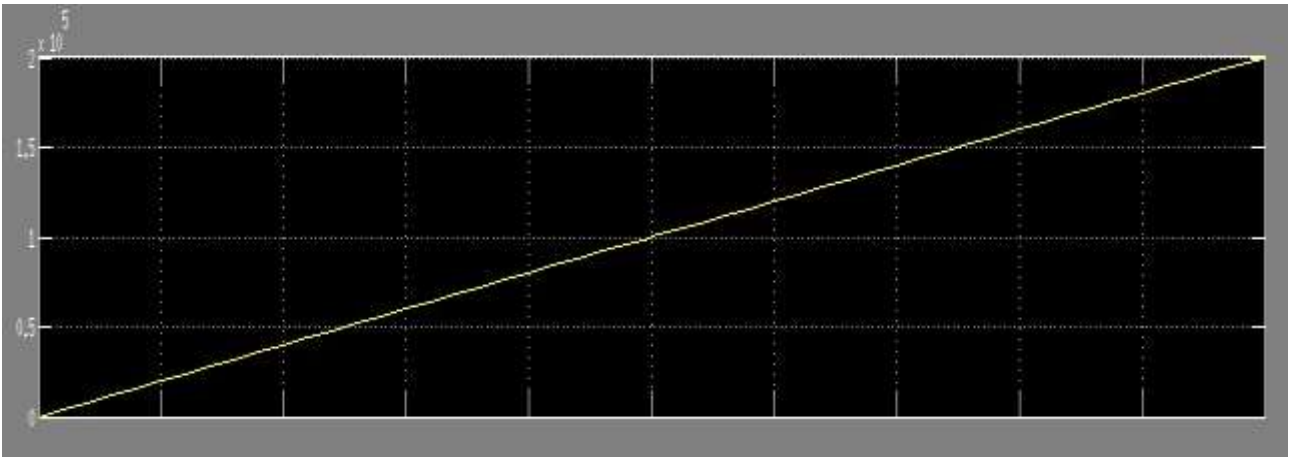


Figure IV.10: Pression mécanique appliquée (de 0 à 2 Bar).

Ce capteur peut mesurer des pressions mécaniques de l'ordre de quelques Bars. En jouant sur les paramètres géométriques de la membrane, on peut augmenter cette valeur.

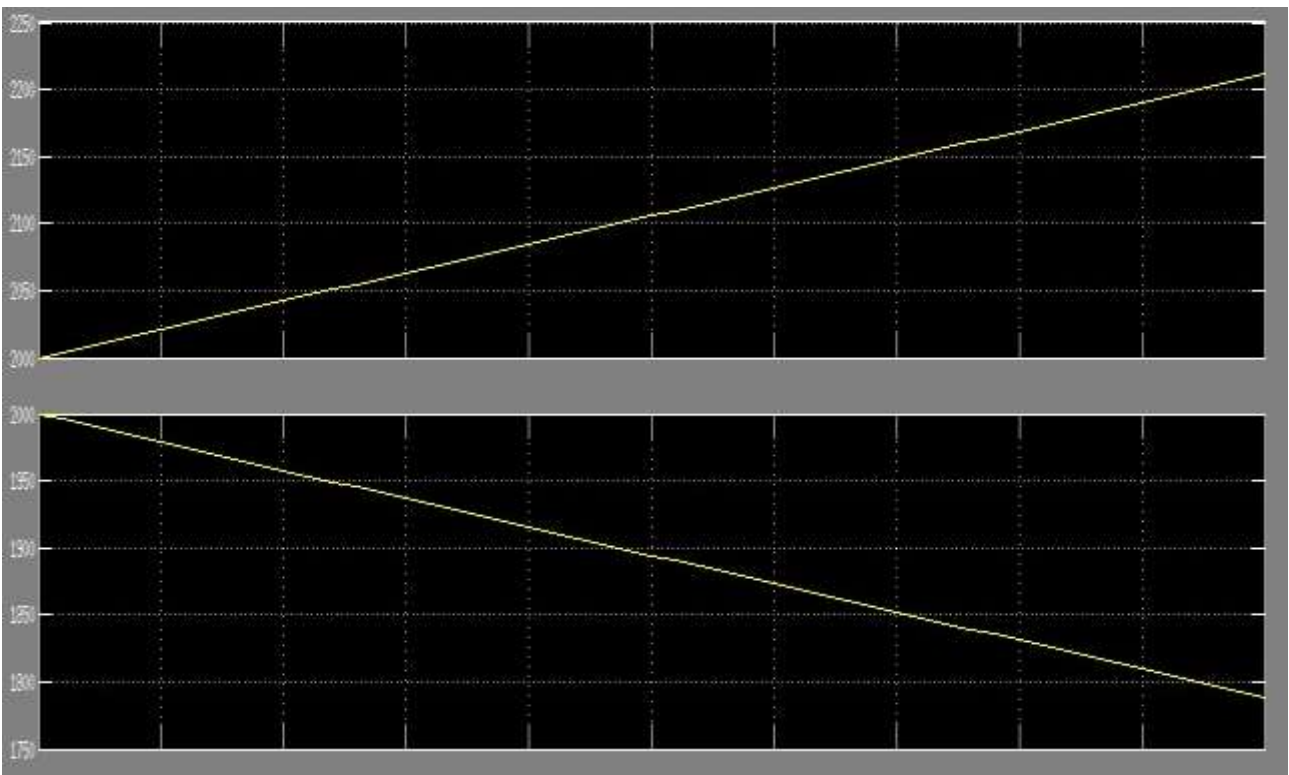


Figure IV.11: Variation des résistance Normale et parallèles.

On voit bien que le sens de variation des jauges parallèles et normales est inversé. Ce qui offre une sensibilité maximale à notre capteur.

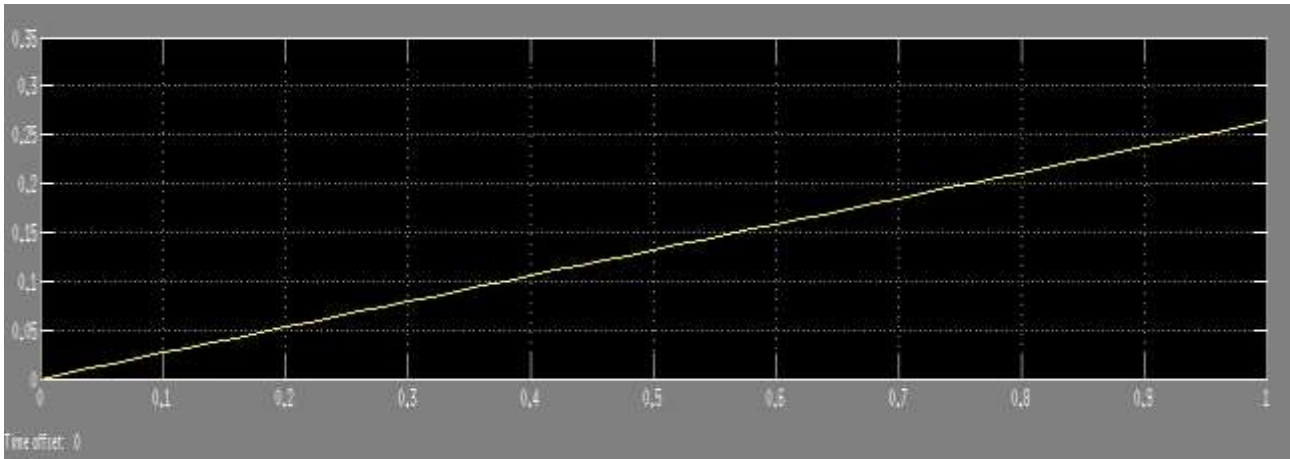


Figure IV.12: Variation des résistance Normale et parallèles.

La tension de sortie du capteur est de l'ordre de 0,3 Volts. Ce qui constitue une très bonne sensibilité de ce capteur. Les effets de température ont été pris en considération dans le modèle globale du capteur.