

N° d'ordre :



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département d'Electronique



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : LAKEHAL Samira

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : Instrumentation et Maintenance Industriel

Thème

**Conception d'un capteur de pression capacitif
intelligent**

Soutenue le : 08/06/2015 devant le jury composé de :

GUERMAT Noubel
KOUDA Souhil
KENANE El Hadi
BENDIB Toufik

M.C.B - Université Mohamed Boudiaf -
M.C.B - Université Mohamed Boudiaf -
M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila
M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Président
Encadreur
Examineur
Examineur

Promotion : Juin 2015

Dédicace

*Je dédie ce fruit de mes années d'études aux
plus chers au monde à :*

*A la personne la plus chère pour moi
dans ce monde, ma mère qui est la fleur de
ma vie, le symbole de l'amour et la tendresse
qui s'est sacrifier pour mon bonheur et ma
réussite.*

*A mon père qui a fait de moi, ce que je suis
aujourd'hui.*

Mon Mari,

Mes frères et mes sœurs,

Tous mes amis sans exception.

Remerciements

Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout-puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

A Monsieur kouda . souhil, qu'il me soit permis de le remercier et de lui exprimer ma profonde reconnaissance pour son aide et ses encouragements au cours de ce travail, ses précieux conseils et la confiance dont il a fait preuve à mon égard et surtout pour le sujet intéressant qu'il m'a proposé.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les membres du Jury chargés d'examiner la soutenance de mon mémoire.

Je voudrais exprimer mon profond respect à tous les enseignants qui m'ont encadré durant toute la période de mes études au département d'électronique.

Finalement, je tiens à adresser notre très sincère remerciement à tous ceux qui m'aidé à accomplir ce travail.

Lakehal samira

Symbol	Description	Unite
CPS	Capacitive Pression Sensor	
ANN	Artificial Neural Network	
ANN-model	Modèle à base des réseaux de neurones	
INV-ANN	Modèle inverse à base des réseaux de neurones	
MLP	multilayer Perceptron	
P	Pression	Bar
S	Sensibilité	nF
T	Température	°C
NL	Non Linéarité	
V _{s1}	Tension de sortie de	mV
V _s	Tension de sortie d'ANN-INV	mV
ABM	Analog Behavioral Modelling	
S	le seuil d'estimation	
EQM	L'erreur Quadratique Moyenne	

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	2
Chapitre I: Etat de l'art	
I.1.Introduction.....	5
I.2.Définition d'un capteur.....	5
I.3.Principales caractéristiques des capteurs.....	5
I.3.1.Etendue de la mesure ou dynamique.....	6
I.3.2.Résolution.....	6
I.3.3.Fonction de transfert.....	6
I.3.4.Linéarité.....	7
I.3.5.Caractéristiques statistiques.....	9
I.3.6.Rapidité.....	9
I.3.7.Sensibilité.....	9
I.3.8.Limite de détection.....	9
I.4.Chaîne de mesure.....	10
I.5.Erreurs de capteur.....	11
I.6.Capteurs intelligent.....	13
I.6.1.Ce qu'on attend d'un capteur intelligent.....	14
I.6.2. Les approches de réalisation des capteurs intelligents.....	15
I.6.3.Domaines d'applications des capteurs intelligents.....	16
I.7.Conclusion.....	16
Chapitre II: Capteur de pression	
II.1.Introduction.....	18
II.2.Capteur de pression.....	18
II.3.Définition d'un capteur de pression.....	18
II.4. Capteur de pression capacitif.....	21
II.4.1.Principe de fonctionnement du CPS.....	21
II.4.2.Structure du CPS.....	22
II.4.3.Mécanisme de détection.....	23
II.4.4. Réponse du CPS en pression paramétrée en température.....	24
II.5. Capteur de pression piézorésistif.....	25
II.5.1. La piezorésistivité.....	25
II.5.2. Facteur de jauge.....	26

Sommaire

II.5.3. Principe de fonctionnement.....	27
II.5.4. Positionnement de jauges piézorésistives sur le corps d'épreuve.....	29
II.6.Conclusion.....	30
Chapitre III: Modélisation directe du capteur	
III.1.Introduction.....	32
III.2.Modèle du capteur de pression capacitif CPS.....	32
III.3.Modélisation du CPS.....	33
III.3.1.Choix de la base de données.....	33
III.3.2.Création d'une base de validation.....	34
III.3.3.L'apprentissage du réseau de neurones.....	34
III.3.4.Mesure de la performance du modèle obtenu.....	39
III.4.Modèle ANN du CPS sur PSPICE.....	40
III.5 .Confirmation du comportement capacitif du modèle CPS.....	42
III.6. Convertisseur Capacité / Tension (CVC).....	43
III.5.Conclusion.....	44
Chapitre IV: Modèle intelligent (INV-ANN)	
IV.1.Introduction.....	47
IV.2.La conception du capteur intelligent.....	47
IV.3.Modélisation du capteur intelligent.....	48
IV.4.Modélisation du correcteur INV-ANN.....	48
IV.4.1.L'apprentissage du réseau de neurones.....	49
IV.4.2.Mesure de la performance du modèle obtenu.....	51
IV.5.Modèle INV-ANN du CPS sur PSPICE.....	52
IV.6.Modélisation du capteur intelligent.....	52
IV.7.Test du capteur intelligent.....	53
IV.8.Test pour un cycle de pression.....	53
IV.9.Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Bibliographies	

Introduction

générale

Introduction générale:

La mesure de pression est un domaine vieux de plusieurs siècles, dont le développement a été motivé par l'importance de ses applications technologiques [1]. Dans cet égard, les capteurs de pression sont largement utilisés dans plusieurs domaines (santé, automobile, électromagnétisme, ..et.), et sont employés dans la vie de tous les jours pour transformer des événements mécaniques en signal électrique [2-4].

Les capteurs classiques montrent une caractéristique de transfert non linéaire. De plus l'influence de la température sur le modèle physique est notable dans un milieu de travail assez complexe [5]. Pour ce fait on a adopté les réseaux de neurones comme méthode générale de linéarisation. Ce principe, qui tend à se développer, fait appel au concept de 'capteur 'Intelligent'.

La majorité des capteurs de pression disponibles sur le marché, sont des capteurs extrêmement sensibles à la température et ne peuvent fonctionner correctement sans l'addition de circuits de compensation [6]. Il s'agit donc d'associer au capteur une structure électronique permettant d'effectuer des corrections, afin d'obtenir une information précise sous forme numérique, donc directement exploitable et pouvant être par exemple facilement raccordé à un réseau industriel.

Dans ce mémoire, nous présentons les réseaux de neurones artificiels (ANNs) comme un modèle de correction, afin de corriger la réponse du capteur de pression capacitif (CPS), en se basant sur les avantages qu'offrent les ANNs à savoir, une grande adaptation aux divers problèmes. Nous présentons aussi les ANNs comme un modèle de correction.

L'environnement MATLAB est utilisé pour reproduire les résultats expérimentaux du capteur de pression, la programmation sur MATLAB permet d'ajuster les courbes de réponses du capteur à modélisé et de créer une base de données pour ce modèle et une autre pour la vérification. L'apprentissage du réseau de neurones est également un programme écrit en MATLAB qui est élaboré pour obtenir un réseau de neurones similaire au capteur.

Le simulateur PSPICE est utilisé pour concevoir un modèle ANN simulé à partir du modèle mathématique obtenu par MATLAB. Un réseau de boîtes ABM (ABM Analog Behavioral Modelling) de la bibliothèque PSPICE nous permet d'implanter notre capteur dans le simulateur OrCad.

Introduction générale

Des simulations, à l'aide de PSPICE, sont ainsi nécessaires pour confirmer la reproduction fidèle de comportement du capteur de pression.

Dans le but de corriger a non linéarités de la réponse et d'éliminé les dirive de température, nous avons établi un programme au moyen de l'environnement MATLAB, qui va créer une nouvelle base de donnés linéaire. L'apprentissage de cette nouvelle base de données nous donne le modèle inverse INV-ANN dit aussi correcteur. Notons que ce composant est totalement différent de l'ANN qui reproduit le comportement du capteur par contre le INV-ANN joue le rôle d'un correcteur de réponse.

Le travail réalisé dans le cadre de ce sujet est reporté sur ce mémoire sous forme de quatre chapitres. Le premier chapitre est un état de l'art sur les capteurs en générale se qui concerne aussi les capteurs intelligents.

Le chapitre II, est consacré à la présentation des capteurs de pression, les modes de transaction, les types de capteur de pression...etc.

Le chapitre III décrits le modèle ANN adopté pour le capteur utilisé et le convertisseur capacité tension ainsi que les simulations effectuées par Orcad PSPICE

Enfin, le dernier chapitre présentera les différentes étapes de la conception du modèle inverse INV-ANN et son implantation sur le simulateur PSPICE ainsi que les différentes simulations effectués.

Chapitre I:

Etat de l'art

I.1.Introduction

L'objectif des travaux réalisés et exposés au sein de ce mémoire concerne la conception d'un capteur de pression intelligent. Ce premier chapitre a pour objectif d'introduire quelques principes de base des capteurs. Dans un premier temps, le principe de fonctionnement ainsi que les principales caractéristiques d'un capteur seront présentés de façon générale. Ensuite, sont rappelées quelques notions permettant de mieux cerner les principes de base des capteurs dits intelligents.

I.2.Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif chargé de prélever une grandeur physique à mesurer et de la transformer en une grandeur exploitable (figure I.1). Dans la plupart des cas il s'agit d'un élément transducteur destiné à la mesure proprement dite : conversion d'une grandeur physique du processus en une grandeur (généralement électrique) d'entrée du système de mesure. Par exemple un manomètre est un capteur de pression, dont la sortie est une tension électrique dépendant de la pression. Un thermocouple est un capteur de température, dont la sortie est une tension électrique dépendant de la température [7,8]. Cette conversion est représentée en général par une équation mathématique qui découle directement de la loi physique exploitée dans le capteur, au besoin corrigée et complétée par des termes de type expérimental [9,10].

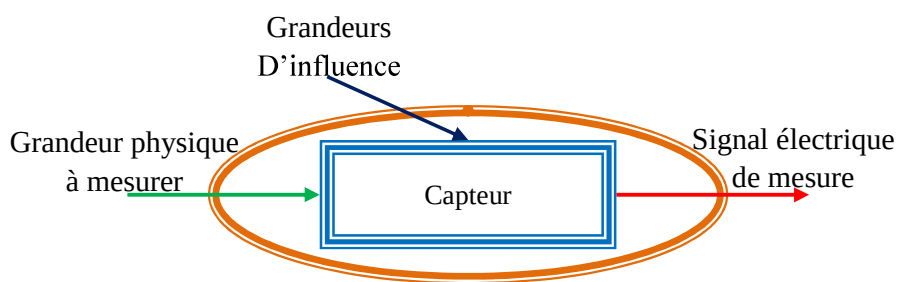


Fig. I.1-Schéma de principe d'un capteur.

I.3.Principales caractéristiques des capteurs

Suivant les applications souhaitées, le choix d'un capteur adéquat nécessite l'établissement préalable d'un cahier des charges dans lequel sont énumérés :

- - le type de l'événement à détecter,
- - la nature de cet événement,
- - la grandeur de l'événement,

- - l'environnement de l'événement,
- - etc.

A partir de ces paramètres, le choix du capteur est effectué. Par ailleurs, l'utilisation d'un capteur dans les meilleures conditions, nécessite un étalonnage qui permet de connaître les incertitudes de mesure relatives aux paramètres caractéristiques du capteur. Un certificat d'étalonnage d'un capteur contient généralement les caractéristiques suivantes : étendue de mesure, résolution, fonction de transfert, linéarité, caractéristiques statistiques, temps de réponse, sensibilité, limite de détection, etc.

Des définitions métrologiques plus complètes, très bien élaborées et plus précises de ces paramètres sont présentées dans le Vocabulaire International de Métrologie (VIM)[11], dans le Guide pour l'expression de l'Incertitude de Mesure (GUM de l'anglais : Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) ou encore dans les publications[12].En revanche, un bref rappel de la définition de ces paramètres est présenté dans la suite de ce paragraphe.

I.3.1.Etendue de la mesure ou dynamique

Elle définit la zone dans laquelle les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données.

I.3.2.Résolution

Elle correspond à la plus petite variation de la grandeur que le capteur est susceptible de déceler. La résolution R_m dépend non seulement de la caractéristique des instruments de mesure associés au capteur mais aussi du rapport signal sur bruit du capteur.

I.3.3.Fonction de transfert

Elle donne la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Elle est donnée par une courbe en régime permanent (Figure I.2) et ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

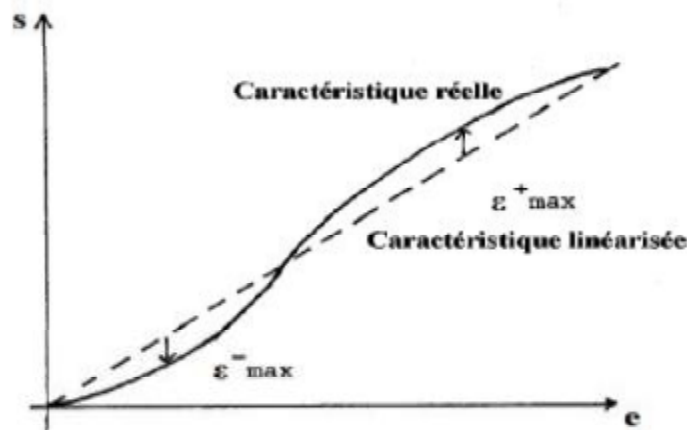


Fig. I.2- Exemple de caractéristique d'un capteur de pression du type capacitif.

I.3.4. Linéarité

C'est la zone de la réponse du capteur dans laquelle sa sensibilité est indépendante de la valeur de la grandeur mesurée. Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple par la méthode des moindres carrés. L'ajustement au moindre carré X^2 , prenant en compte des incertitudes σ_i de chaque point de mesure, consiste à minimiser l'écart de linéarité entre la caractéristique linéarisée et la réponse expérimentale (Figure I.3) :

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{S(e_i) - S_{lin}(e_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (I. 1)$$

où e_i représente la $i^{\text{ème}}$ valeur de l'entrée e et s_{lin} la caractéristique linéarisée.

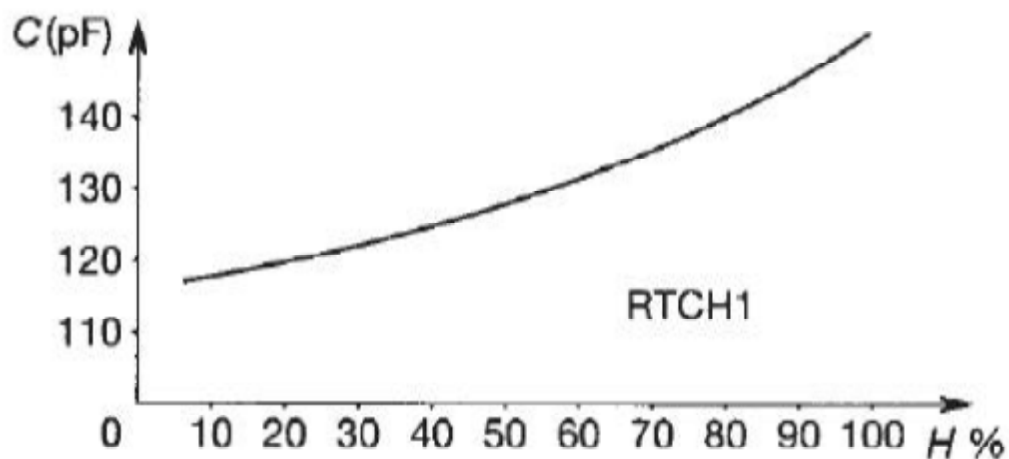


Fig. I.3- Exemple de linéarisation de caractéristiques.

I.3.5. Caractéristiques statistiques

Les caractéristiques statistiques permettent de prendre en compte la notion d'erreurs accidentelles qui peuvent survenir sur un capteur.

a- Fidélité

Elle définit la qualité d'un capteur à délivrer des résultats les plus proches possibles lors d'analyses répétées sur une même grandeur physique m . L'erreur de fidélité correspond à la dispersion (écart type) σ des résultats autour de la valeur moyenne $\langle m \rangle$ de n mesures effectuées sur m :

$$\langle m \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (I. 2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \langle m \rangle)^2}{n-1}} \quad (I. 3)$$

où m_i est la valeur de m à la $i^{\text{ème}}$ mesure.

Parmi les écarts de fidélité on distingue : la répétabilité et la reproductibilité.

➤ Répétabilité :

La répétabilité correspond à la variation aléatoire des résultats d'une série de mesures successives d'une même grandeur physique m , effectuée dans les mêmes conditions de mesure pendant un court intervalle de temps. Selon les normes ISO 3534-1 et ISO 5725-2, ces conditions sont appelées conditions de répétabilité et elles comprennent : même mode opératoire de mesure, même observateur, même équipement de mesure, même lieu de mesure .

➤ Reproductibilité :

Elle représente la variation aléatoire des résultats de plusieurs séries de mesures, réalisées sur une même grandeur m , espacée dans le temps, dans des conditions expérimentales différentes.

Selon les normes ISO 3534-1, ISO 5725-2, pour que la reproductibilité soit valable, il est nécessaire de spécifier les conditions que l'on fait varier.

Ces conditions peuvent comprendre: principe de mesure, méthode de mesure, observateur, instrument de mesure, conditions d'utilisation, temps de mesure.

b- Justesse

C'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendamment de la notion de fidélité. Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle.

c- Précision

La définition du terme « précision » varie d'un auteur à un autre et inclut soit uniquement la reproductibilité ou la fidélité, soit également la notion de « justesse ». Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur.

I.3.6.Rapidité

C'est la qualité d'un capteur à suivre les variations de la grandeur mesurée. On peut la chiffrer par :

- la bande passante du capteur (à -3 dB) mesurée en fréquence ;
- le temps de réponse (en %) à un échelon.

I.3.7.Sensibilité

La sensibilité S_V détermine l'évolution de la grandeur de sortie Δ_s en fonction de la grandeur d'entrée Δ_m en un point donné, c'est-à-dire la dérivée de la grandeur de sortie par rapport à celle d'entrée en ce point :

$$S_V = \frac{\Delta_s}{\Delta_m} = \frac{\partial_s}{\partial_m} \quad (I.4)$$

correspond à la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur en un point donné. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité est constante et égale à la pente de la droite. Il est important de signaler que cette grandeur est intrinsèque au capteur et ne dépend pas ou peu des autres équipements de mesure associé au capteur dans une chaîne de mesure (description de la chaîne de mesure dans le paragraphe suivant). Par conséquent, plus cette grandeur intrinsèque du capteur est forte, plus il est sensible.

I.3.8.Limite de détection

La limite de détection est la valeur minimale de la grandeur physique m que l'on est capable de déceler. La limite de détection ne doit pas être confondue avec la sensibilité du capteur car elle dépend à la fois de la sensibilité et de la résolution instrumentale R_m liée aux équipements utilisés pour la mesure du signal. Par conséquent, la limite de détection est utilisée pour évaluer la performance de l'association d'un capteur et du dispositif de mesure. Plus elle est faible, plus l'association est sensible. L'expression de la limite de détection LD , déduite à partir de la définition de la sensibilité du capteur, est de la forme :

$$LD = \frac{R_m}{S_V} \quad (I.5)$$

Selon le VIM, la valeur de DL obtenue par une procédure de mesure doit tenir compte d'un intervalle de confiance. Si le bruit de mesure, donc la résolution du dispositif de mesure, est assimilé à une gaussienne, les probabilités que la limite de détection soit dans l'intervalle de confiance sont de 68,2 %, 95,4% et 99,8% lorsqu'elle est déterminé en utilisant respectivement Rm , $2Rm$ ou $3Rm$.

I.4.Chaîne de mesure

Généralement, un capteur est utilisé dans une chaîne de mesure faisant intervenir plusieurs phénomènes différents (Figure I.4).

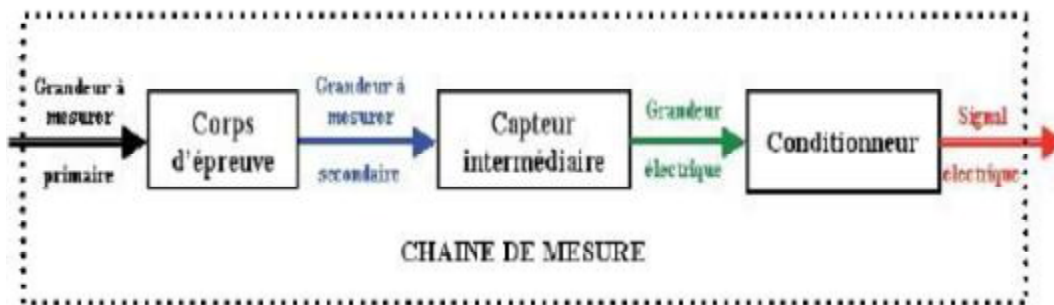


Fig. I.4 - Schéma de principe d'une chaîne de mesure.

De manière générale, la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le phénomène à quantifier. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable. Le choix de ce conditionneur est une étape très importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure. Ce capteur doit être insensible ou isolé de toutes perturbations extérieures.

C'est l'une des raisons pour laquelle les capteurs optiques prennent une place de plus en plus importante dans la métrologie actuelle. En effet, l'exploitation de la lumière, à la différence de l'électricité, offre la possibilité de mesures dans des environnements dangereux ou présentant de fortes perturbations électromagnétiques basses fréquences conditions extrêmes, telle qu'un En plus, l'utilisation des dispositifs optiques (fibre optique par exemple) permet

de déplacer le capteur du lieu de mesure vers une centrale de traitement de l'information, s'affranchissant ainsi de tout problème lié aux capteurs électroniques utilisés dans ce type de conditions (Figure I.5). Les principes de fonctionnement des capteurs optiques sont très variés. Quelques exemples sont : la mesure par variation d'amplitude, par fluorescence, ou par variation de phase [13].

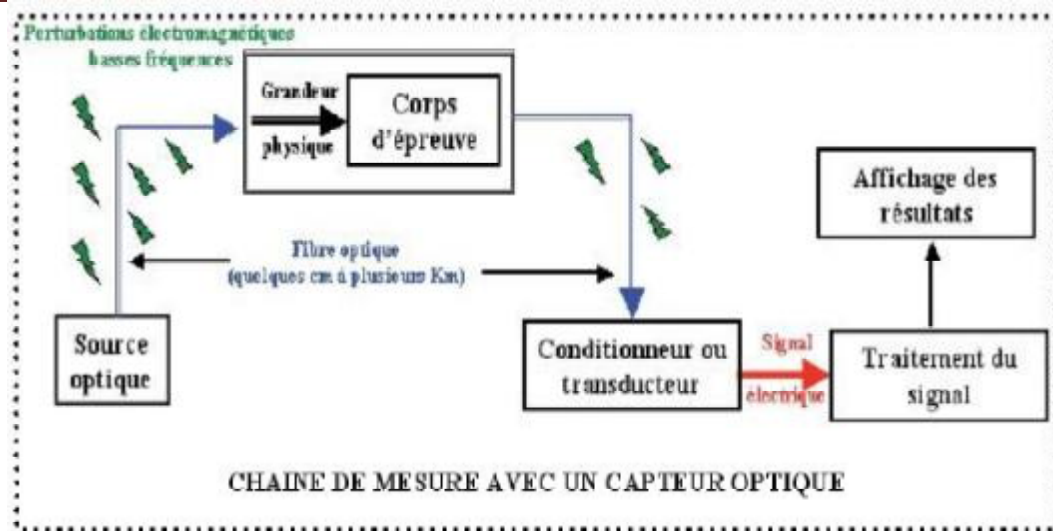


Fig. I.5 - Chaîne de mesure avec capteur optique.

I.5. Erreurs de capteur

Dans la production de capteur on désire produire de grandes séries de capteur, qui répondent tous selon la même fonction de transfert. Pour vérifier ceci les capteurs doivent être mesurés individuellement. Quand on mesure la réponse d'un capteur nous pouvons être confrontés avec un ou plusieurs types d'erreurs suivantes [14, 15] :

- **Offset** : quand un signal physique d'entrée zéro est appliqué, et le signal de sortie mesuré n'est pas zéro il donne la valeur d'offset.
- **Gain, gamme, ou erreur plein échelle (full-scale error)** : Le signal physique d'entrée maximum est exprimé par un autre signal électrique.
- **Non linéarité** : La variation de la sortie du capteur ne change pas linéairement avec la variation du signal physique d'entrée.
- **Sensibilité multiple** : Le capteur est non seulement sensible au signal d'entrée mais également à d'autres paramètres.
- **Hystérésis** : La réponse du capteur peut avoir deux valeurs différentes pour une même grandeur physique suivant un cycle (croissant ou décroissant). La différence entre ces deux valeurs donne la valeur de l'hystérésis.
- **Dérive de l'offset** : La courbe de transfert du capteur change lentement dans le temps.

Les erreurs sont expliquées graphiquement dans la figure I.6. Généralement, certaines de ces erreurs sont plus grandes que l'exactitude désirée. Pour corriger ces erreurs, tous les capteurs devraient être mesurés et calibrés individuellement pour garantir l'exactitude.

On peut observer les erreurs de Gain d'offset et également de linéarité et de sensibilité multiple pratiquement pour tous les types de capteurs.

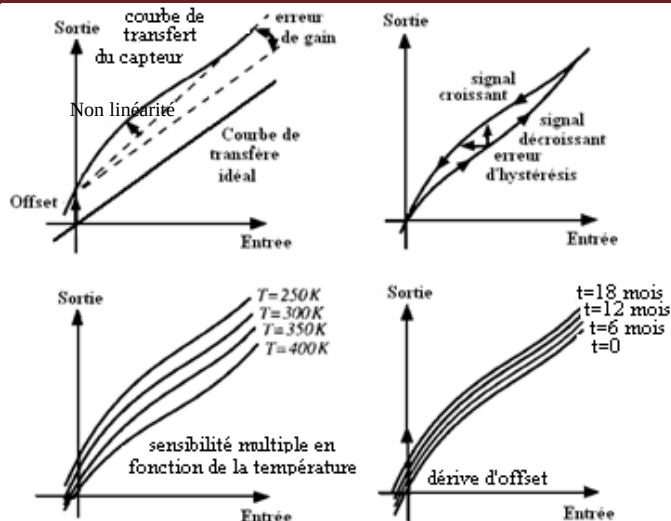


Fig. I.6—Erreurs des courbes de transfert des capteurs.

Les erreurs d'hystérésis et de la dérive de l'offset doivent être examinées pour quelques types de capteurs, mais ils peuvent être négligés pour d'autres capteurs. Bien qu'ils puissent être compliqués, les erreurs d'hystérésis pourraient être calibrées. Cependant, d'autres solutions de capteurs spécifiques devraient être considérées car elles sont moins compliquées ou fournissent de meilleurs résultats. Les erreurs de la dérive de l'offset sont difficiles à compenser car ils exigeraient la prévision des futures erreurs « extrapolation », et la mesure de temps de réponse. Parfois il est possible de réduire la dérive de l'offset du capteur au moyen de calibrage-individuel, à l'aide d'un capteur additionnel.

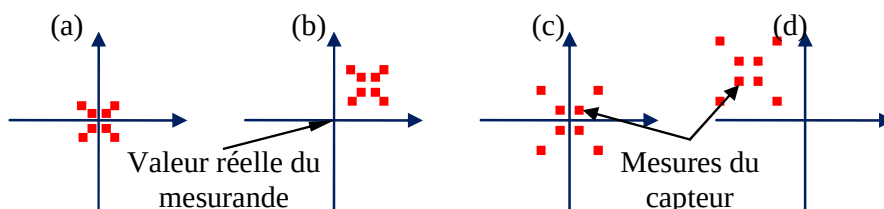


Fig. I.7-Représentation des performances d'un capteur sur les erreurs de mesure : a) capteur fidèle, à la fois juste et précis ; b) capteur précis mais non juste ; c) capteur juste mais non précis ; d) capteur non juste et non précis.

Du point de vue métrologique, les capteurs sont qualifiés selon les erreurs de mesure. Les erreurs aléatoires sont causées par l'hystérésis, les effets parasites, une trop faible résolution tout ce qui tend à disperser les valeurs données par le capteur. Les erreurs systématiques sont causées par un mauvais réglage ou mauvais étalonnage et tendent à éloigner la valeur moyenne des mesures du capteur de la valeur réelle du mesurande (grandeur à mesurer). La précision est la faculté du capteur à donner les valeurs les moins dispersées possibles lors de plusieurs mesures successives du même mesurande. La justesse est la faculté à donner des valeurs proches de la valeur réelle. La fidélité traduit à la fois la justesse et la précision du capteur (figure I.7).

Cependant, afin d'obtenir une réponse linéaire complètement indépendante des grandeurs d'influences et à la fois juste et précise, implique l'association d'un circuit de correction. La structure : capteur, circuit de conditionnement et circuit de correction, fait appel au concept du capteur intelligent [6].

I.6. Capteurs intelligents

Cette partie, de l'état de l'art, présente les concepts de capteurs intelligents. Apparus vers les années 1980, ces nouveaux équipements ont bénéficié des nombreux progrès en microélectronique et du développement des systèmes de communication, avec en particulier l'apparition des réseaux de terrain. Ces évolutions ont conduit à l'intégration de nouvelles fonctions dans les capteurs et les actionneurs, avec notamment la fonction communication et l'apparition de ce que l'on a appelé

« Capteurs et actionneurs intelligents » : « intelligent » étant en fait, une mauvaise traduction de « Smart », dans le sens, « agréable à utiliser ». Depuis, l'adjectif intelligent est passé dans les mœurs, et tout objet qui intègre un tant soit peu d'électronique et de logiciel devient intelligent : on trouve ainsi le bâtiment intelligent, la voiture intelligente, les skis intelligents...etc.

Un capteur peut être dit intelligent lorsqu'il est capable d'élaborer localement sa mesure, en prenant éventuellement en compte les grandeurs d'influence et en vérifiant la cohérence des informations. Il est également capable d'envoyer sa mesure à la demande ou de manière systématique à destination du système qui devra l'exploiter. L'interface de communication permet également au capteur intelligent de recevoir les informations du système nécessaires à l'élaboration de sa mesure et à sa validation. Elle peut également être utilisée dans les phases de calibration et de mise en service de l'équipement dans son environnement de travail [16].

Le capteur intelligent correspond principalement à l'intégration dans le corps du capteur une organe de calcul interne (microprocesseur, microcontrôleur), d'un système de conditionnement du signal (programmable ou contrôlé) et d'une interface de communication. Plus largement, le concept de capteur intelligent se décompose ainsi (Selon le livre "Capteurs intelligents et méthodologie d'évaluation") [17] :

- un ou plusieurs transducteur(s)
- des conditionneurs spécifiques
- d'une mémoire
- d'une alimentation
- d'un organe intelligent interne permettant un traitement local et l'élaboration d'un signal numérique
- d'une interface de communication.

On désigne par capteur intelligent l'ensemble de mesure constitué de deux parties : une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur et une interface de communication bidirectionnelle [18].

La chaîne de mesure comporte :

- le capteur principal (spécifique au mesurande) et identifiable par un code stocké en PROM.
- les capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influence.
- Les dispositifs classique de numérisation de la réponse de chaque capteur : conditionneur, multiplexeur, amplificateur, échantillonneur bloqueur convertisseur analogique/numérique
- un microprocesseur, pour la gestion de l'acquisition, la correction des effets des grandeurs d'influence au moyen de paramètres stockés en PROM et des données fournies par les capteurs secondaires, la linéarisation, le diagnostic des capteurs

L'interface de communication bidirectionnelle assure la liaison du capteur à un calculateur central via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents. Elle peut être de différents types : série, parallèle, USB... etc.

Le capteur intelligent offre des avantages spécifiques tels que la possibilité de configurer le capteur à distance, la crédibilité accrue des mesures et l'aide à la maintenance grâce aux informations d'état fournies.

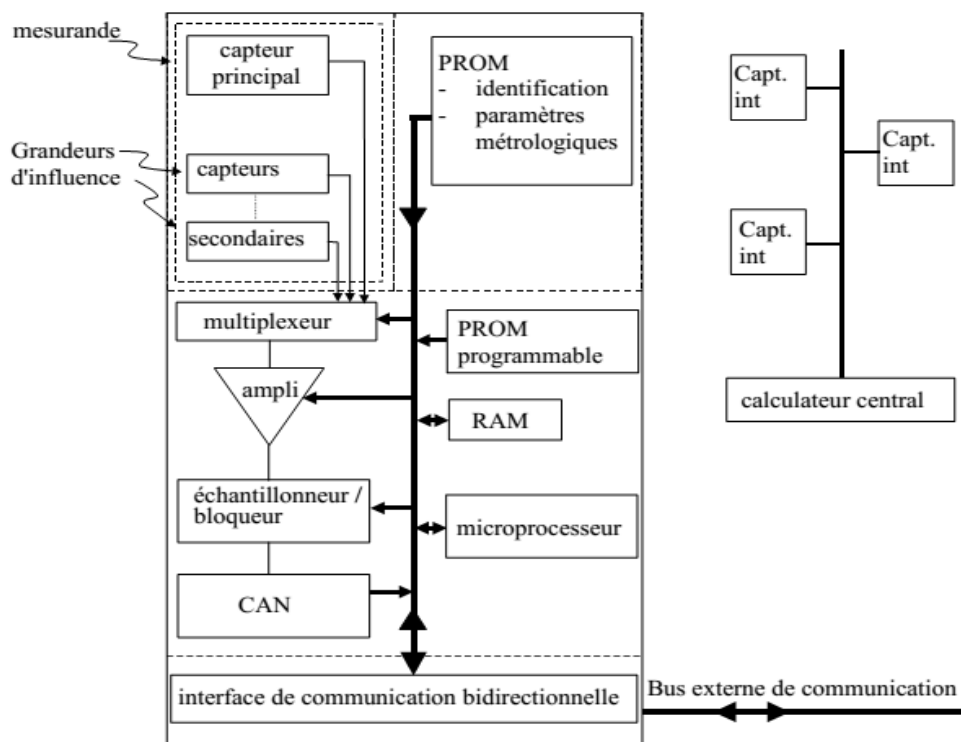


Fig. I.8-Schéma synoptique d'un capteur intelligent.

I.6.1.Ce qu'on attend d'un capteur intelligent

Les technologies associées aux capteurs ont évolué au rythme des besoins. Il est ainsi possible de décrire les grands champs d'investigation actuels et futurs associés aux capteurs intelligents en dressant le panorama des attentes placées dans ces derniers. Il est ainsi possible de dégager les axes majeurs suivants :

- Nous pouvons percevoir les paramètres physiques d'objets dans leur état normal avec à la fois une très grande précision et une grande sensibilité. Cependant, la détection des anomalies et des dysfonctionnements est assez peu développée. La capacité à détecter des défauts et à prévoir des défaillances constitue une fonctionnalité de plus en plus recherchée.
- Les technologies de perception actuelles peuvent mesurer avec précision des quantités physiques ou chimiques en un seul point. Cependant, cette mesure se complique dès lors que la ou les grandeurs qu'on cherche à caractériser ne sont plus localisées mais réparties (que se soit spatialement ou temporellement) dans un espace multidimensionnel, dont notre environnement fourni un bon exemple.
- Des grandeurs physiques élémentaires (masse, température, vitesse, etc.) peuvent être mesurées avec précision et avec une très grande sensibilité. Cependant, certaines informations considérées comme élémentaires du point de vue de la perception humaine, comme par exemple le goût ou l'odeur, nécessitent la mise en œuvre de capteurs complexes auxquels doivent être associés des traitements performants.

Les trois points abordés ci-avant introduisent une problématique commune qui est celle de la définition de l'objet de la mesure. Si nous pouvons le définir clairement et établir son modèle précis, il est possible de lui associer un ensemble de grandeurs caractérisant son état sans ambiguïté et par conséquent de choisir les capteurs les plus appropriés à la mesure de celui-ci. La mise en œuvre d'une telle démarche, classique dans le domaine de l'automatisation des processus, s'avère délicate à mettre en œuvre dès lors qu'est recherchée une certaine universalité du dispositif.

I.6.2. Les approches de réalisation des capteurs intelligents

Selon [19], il y a trois approches différentes pour mettre en œuvre l'intelligence d'un capteur (Figure. I.9).

- 1) Intégration du capteur avec les ordinateurs, équivalente à une intégration intelligente.
- 2) Utilisation des matériaux fonctionnels spécifiques ou matériaux intelligents.
- 3) Utilisation de structures géométriques fonctionnelles équivalentes à une structure intelligente.

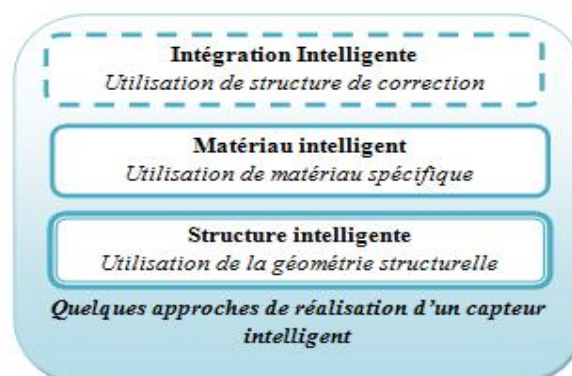


Fig. I.9-Trois approches différentes pour mettre en œuvre l'intelligence du capteur.

I.6.3. Domaines d'applications des capteurs intelligents

On dénombre quatre grands domaines d'application dans lesquels les capteurs intelligents sont plus particulièrement utilisés :

- L'industrie manufacturière, caractérisée par des contraintes temps-réel fortes et des contraintes environnementales variables suivant le type d'application.
- L'industrie des process continus, caractérisée par des contraintes temps-réel plutôt faibles mais qui doit satisfaire des contraintes environnementales fortes (processus chimiques, thermiques,...).
- Les systèmes embarqués, qui doivent également satisfaire des contraintes temporelles très variables suivant les applications, mais des contraintes relatives à l'environnement très fortes.
- Enfin, le tertiaire, qui est le plus souvent le moins contraignant tant au niveau temps-réel qu'environnemental.

Les deux premiers domaines d'applications concernent plus particulièrement les capteurs et les actionneurs intelligents. Les systèmes embarqués sont similaires aux deux précédents et sont en plus assujettis à des contraintes d'encombrement et de consommation énergétique très fortes (espace disponible, poids, puissance, consommation, ...). Le tertiaire ne vise pas un type d'applications bien identifiées, tout au contraire des trois premiers. En effet, le tertiaire est très varié. On peut y trouver par exemple tout ce qui concerne les problèmes de détection utilitaire (incendie, intrusion, ...etc.).

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, dans une première partie nous avons passé en revue, les différents critères de performance d'un capteur : sensibilité, linéarité, temps de réponse, coût, hystérésis, dans une deuxième partie nous avons présenté les capteurs intelligents, leurs principes ainsi que les approches de leurs réalisations et les domaines d'applications.

Chapitre II:

Capteur de pression

II.1.Introduction

Ce chapitre est consacré une étude générale sur les capteurs de pressions, puis une étude détaillée sur les capteurs de pression capacitifs que nous avons modélisé et implanté au simulateur PSPICE dans le cadre de notre projet.

II.2.Capteur de pression

La pression est un paramètre important dans de nombreuses disciplines comme la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides, la biophysique, etc. Aussi, les capteurs de pression se retrouvent dans de nombreux domaines comme étant le premier maillon d'un système de perception, de contrôle ou de mesure.

Depuis le début des années 80, une demande de plus en plus forte s'est fait ressentir dans des domaines bien plus variés comme la robotique, le génie biologique et médical, l'environnement (notamment dans la métrologie et météorologie), la domotique et surtout l'automobile qui représente le secteur qui tire le marché des capteurs grâce à son grand volume de production

II.3.Définition d'un capteur de pression

La pression, comme chacun sait, constitue une variable essentielle pour l'étude métrologique d'un milieu environnant qui peut être soit un gaz soit un fluide.

La mesure de cette variable est réalisée à l'aide d'un capteur de pression, dispositif capable d'associer à la grandeur mesurée, un signal électrique reconnaissable appelé « réponse ». Nous définirons tout le long de ce mémoire, le capteur de pression comme étant un système constitué de deux parties : une partie détection que nous appellerons « Cellule sensible » et une partie traitement de l'information par l'intermédiaire d'un circuit électronique que l'on peut appeler «Circuit électronique de traitement » ou encore « Circuit convertisseur ». La partie détection est quant à elle 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 (figureII.1).

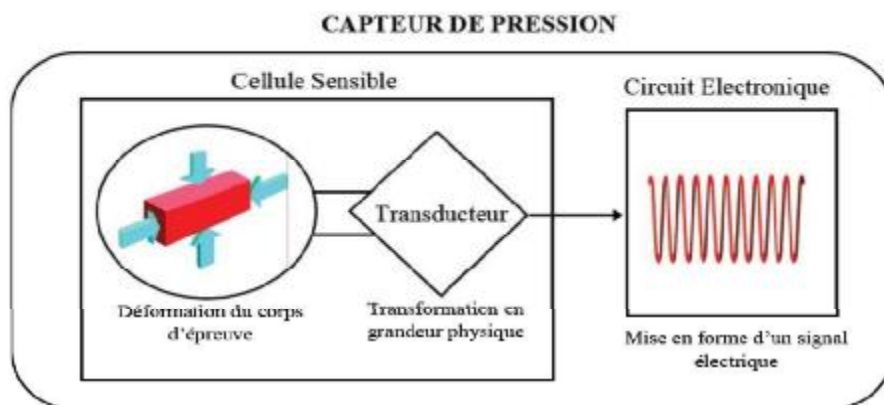


Fig. II.1 -Schéma Synoptique d'un capteur de pression [20] .

La figureII1.1 constitue trois blocs essentiels:

Un corps d'épreuve.

Un élément de transduction ou élément sensible ou transducteur.

Module électronique de conditionnement ou circuit électronique.

Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer (mesurande), a pour rôle de la transformer en une grandeur physique mesurable. Pour les capteurs de pression cette grandeur est généralement une déformation. Les corps d'épreuve les plus utilisés sont les plaques, les poutres et les membranes.

A partir des années 70, les nouveaux capteurs sont basés soit sur la déformation d'un substrat, soit sur celle d'une membrane de silicium qui, de nos jours, est le corps d'épreuve le plus répandu [20].

Le transducteur est l'élément sensible qui, lié au corps d'épreuve, traduit les réactions de ce dernier en signal électrique. Pour effectuer la mesure de la pression, on a vu qu'il fallait convertir la déformation du corps d'épreuve en une grandeur physique. Il existe plusieurs techniques pour mesurer un déplacement, une déformation ou une force. La plupart des grandeurs de sortie sont d'ailleurs de type électrique.

Depuis des années 80, la majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché, est basée sur le principe de détection de type piézorésistif. Cela signifie que la détection de la pression se fait par la mesure d'une variation de résistance [21].

Ces base de données initial et celle obtenue après l'apprentissage, utilisant la base de test, indique que composants sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique. C'est pour quoi, des efforts de recherche ont été effectués sur des structures capacitatives dont les avantages potentiels sont une grande sensibilité à la pression et une faible sensibilité à la température: [22] Le principe de détection de ces structures capacitatives est basé sur la variation d'une capacité.

Le module électronique est le module de traitement du signal en vue d'une éventuelle exploitation [20] : Comme nous l'avons vu dans la définition d'un capteur, le circuit de traitement sert à mettre en forme un signal électrique transportant l'information donnée par le transducteur. Autrement dit, ce signal doit être l'image de la déformation du corps d'épreuve et par suite, de la pression.

Le capteur est construit pour exploiter une propriété de la matière, décrite par une loi physique, permettant de connaître la correspondance entre la grandeur électrique à la sortie du capteur et la grandeur physique à mesurer [23]. Par exemple, pour mesurer une pression, une loi physique permet de calculer la pression à partir de la mesure de la résistance du capteur. Le capteur doit avoir les caractéristiques suivantes [23]:

- Une bonne linéarité
- Une grande étendue de mesure

- Une très bonne sensibilité au mesurande.
- Une insensibilité aux grandeurs d'influence.

Le capteur, premier élément d'une chaîne de mesure à pour fonction essentielle de traduire une grandeur physique, en une autre grandeur généralement électrique. C'est est un dispositif chargé de prélever une grandeur physique à mesurer et de la transformer en une grandeur exploitable (figure II.1) Par exemple un manomètre est un capteur de pression, dont la sortie est une tension électrique dépendant de la pression, et un thermocouple est un capteur de température, dont la sortie est une tension électrique dépendant de la température.

Le mesurande qui est la grandeur physique à mesurer n'est pas directement utilisable Elle constitue le signal d'entrée du capteur. La grandeur exploitable est souvent de nature électrique, elle constitue le signal de sortie ou la réponse du capteur.

De nos jours, la majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché, est basée sur le principe de détection de type **piézorésistif**. Cela signifie que la détection de la pression se fait par la mesure d'une variation de résistance.

L'évolution des jauges métalliques déposées vers celles en poly silicium ou encore en silicium dopé, directement implantées dans le corps d'épreuve, a permis à ces composants d'atteindre de très bonnes performances et donc de monopoliser le marché [24].

En dépit de leurs avantages (bonne précision, faible non linéarité, électronique associée simple et pas nécessairement à proximité), ces composants sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique, ce qui élève considérablement leur prix de revient unitaire.

Un autre type de capteur est basé sur la détection **capacitive** dont les avantages potentiels sont une grande sensibilité à la pression et une faible sensibilité à la température [20].

Le principe de détection de ces structures capacitatives est basé sur la variation d'une capacité qui peut être aussi bien liée à celle de la surface des électrodes en regard qu'à celle de la distance entre les électrodes (le plus courant), ou encore celle de la permittivité du diélectrique: [25]. La figure II.2 représente les deux types de capteur.

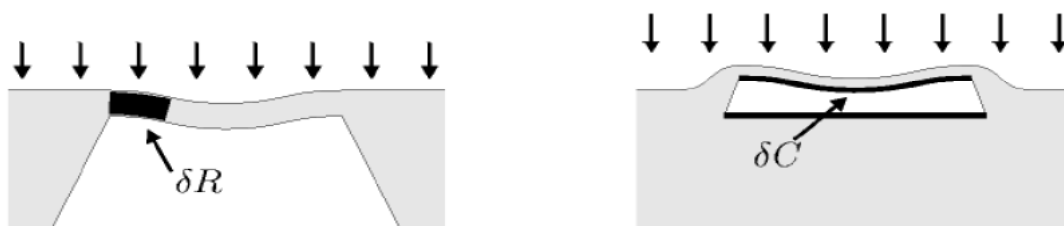


Fig. II.2 - (Droite) capteur de pression piézorésistif, à (gauche) capteur de pression capacitif[26].

II.4. Capteur de pression capacitif

II.4.1.Principe de fonctionnement du CPS

Le principe de base d'un capteur de pression réside dans une déformation sous l'effet d'une contrainte mécanique qui engendre une variation d'une grandeur électrique. On peut distinguer deux grande famille de capteur de pression : le type piézorésistif où la mesure de la pression se fait par la mesure d'une variation d'une résistance et le deuxième type, capacitif basé sur la variation d'une capacité en fonction de la pression appliquée (Figure II.3) Ce second type est caractérisé par une haute sensibilité, une faible consommation électrique et une grande résolution par rapport au premier, cependant, il présente une réponse non linéaire, une dérive en température et une faible variation par rapport à la capacité d'offset [27.28].

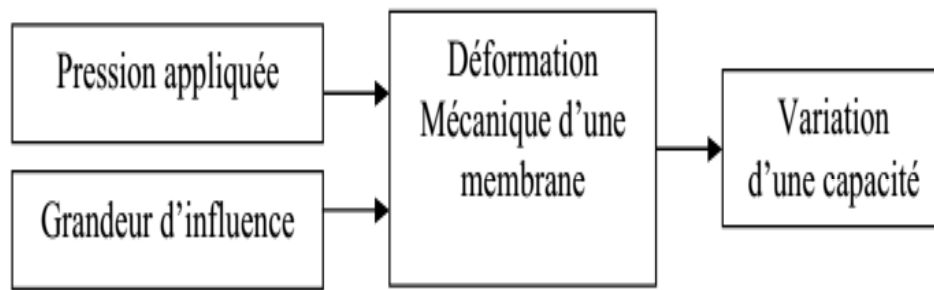


Fig. II.3 - Principe de fonctionnement d'un capteur de pression

Les capteurs étudiés comportent une armature plane fixe et une armature plane déformable. En l'absence de pression différentielle entre les deux faces de la membran, les armatures sont parallèles [22].

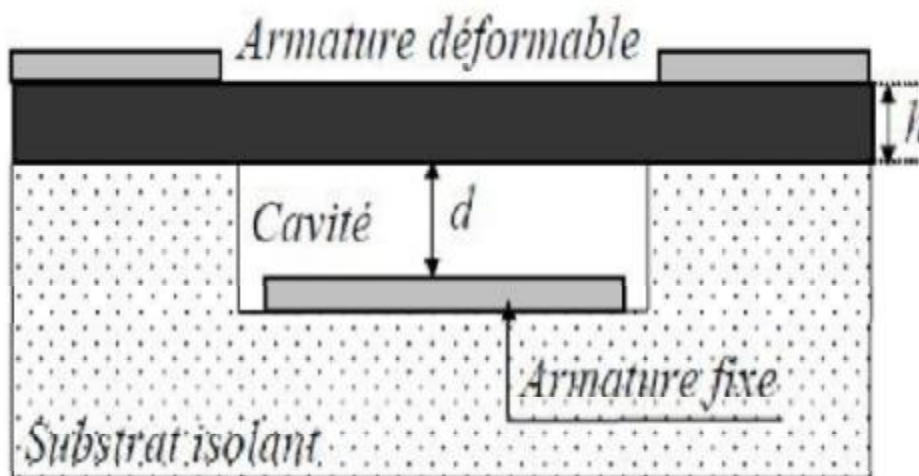


Fig. II.4 - Capteur de pression capacitif au repos [22].

En l'absence de pression appliquée, la capacité intrinsèque de la cellule est celle d'un condensateur plan. Elle est donc définie par :

$$c_i(0) = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (\text{II.1})$$

où :

ε_0 représente la permittivité électrique du vide, A l'aire de la surface des électrodes en regard c'est-à-dire l'aire de l'armature fixe, et d la distance entre les armatures.

Pour simplifier l'écriture, la capacité définie à pression nulle $C_i(0)$ sera notée C_{i0} dans ce qui suit.

$$c_i(p) = \varepsilon \iint \frac{dA}{d-w(x,y,p)} \quad (\text{II.2})$$

Où

dA est un élément de surface de l'armature fixe et $w(x, y, P)$ représente la déflexion de la membrane en fonction de la pression au point de coordonnées (x, y) ; l'origine du repère étant définie au centre géométrique de la face inférieure de la membrane à $P = 0$.

Autrement dit, lorsque la pression extérieure augmente, la distance inter-armatures diminue, et par suite, la capacité augmente [29].

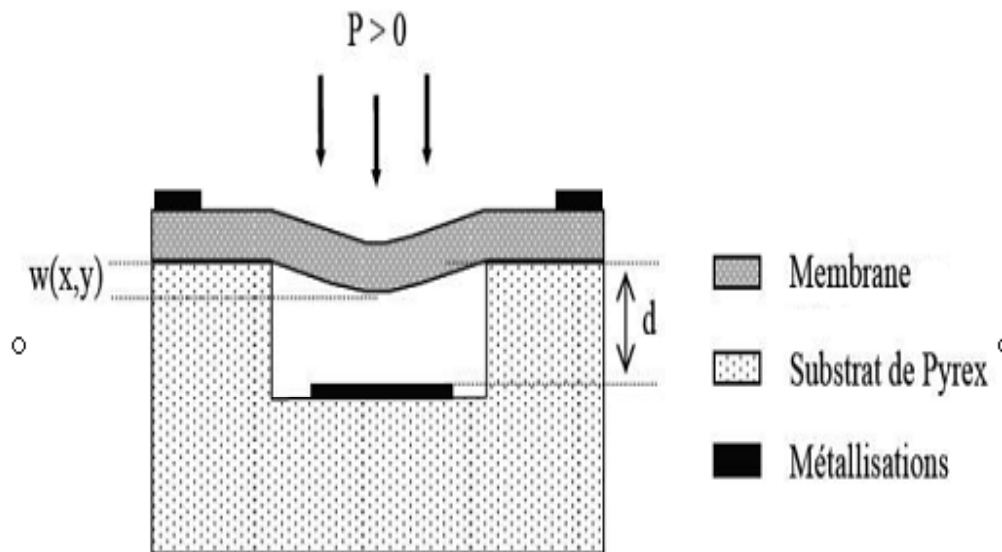


Fig.II.5 - Capteur en fonctionnement [20].

II.4.2.Structure du CPS

La structure de base est composée d'une armature fixe déposée au fond d'une cavité creusée sur un substrat et d'une armature déformable, appelée « membrane » [30/31], (figure II.6). Le matériau utilisé pour l'armature déformable est le silicium compte tenu de son excellent comportement mécanique et de son micro usinage précis [32]. La cellule est réalisée à partir d'une plaque de silicium suffisamment dopé pour que la résistivité de cette électrode soit faible (environ $0.008 \Omega \cdot \text{cm}$). La membrane est fixée au substrat par soudure thermoélectrique.

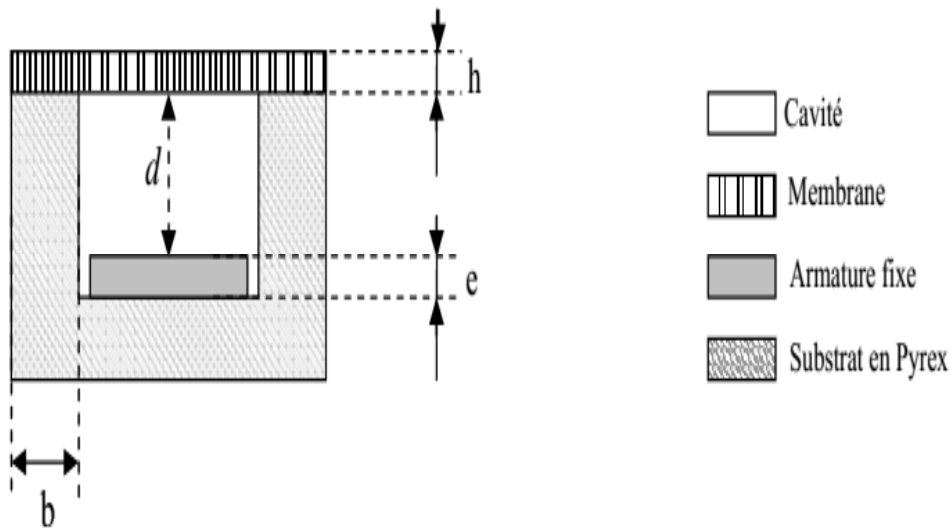


Fig. II.6 - Vue en coupe de la structure du CPS

Avec :

h : Lépaisseur de la membrane

e : Lépaisseur de la l armature fixe

d : la distance entre les deux armatures

A : Surface de l armature fixe

B : largeur de la soudure

II.4.3.Mécanisme de détection

En l'absence d'une pression appliquée ($P=0$), les deux armatures sont parallèles. la capacité du repos est donnée alors par la relation :

$$C_0 = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (II.3)$$

Où :

ε : la permittivité

A : la surface des armatures fixe

D : la distance séparant les deux armatures

Lorsqu'on applique une pression P , la membrane déformable fléchit comme indiqué à la figure II-7. La distance séparant les deux armatures varie en tous points de la membrane [33], dans ce cas là la relation entre la capacité et la pression appliquée devient :

$$C(P) = \varepsilon \cdot \iint_A \frac{\partial A}{d - w(x,y,p)} \quad (II.4)$$

Où:

∂A : représente un élément de la surface

$W(x, y, P)$: la déflexion en fonction de la pression au point de coordonnées (x, y) de la membrane ; l'origine du repère étant définie au centre géométrique de la face inférieure de la membrane à $P=0$. Cette relation montre que si la pression augmente la distance entre les armatures diminue et par conséquent la capacité augmente.

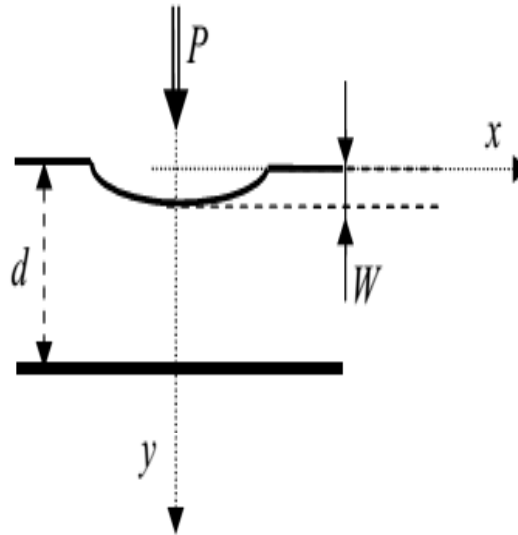


Fig. II.7 - Illustration de la déformation de la membrane

II.4.4. Réponse du CPS en pression paramétrée en température

Afin d'évaluer la réponse du CPS en fonction de la pression dans un milieu où la température varie, nous avons représenté la variation de la capacité du CPS pour une plage de pression de 1 à 6 bars pour différentes températures (figure II.8), en se basant sur des travaux expérimentaux [20].

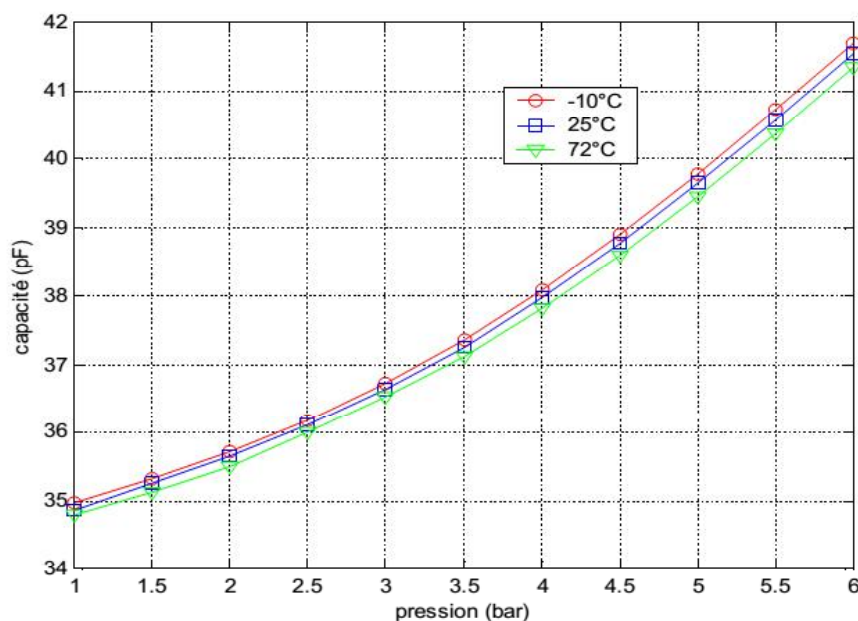


Fig. II.8 - Variation de la capacité en fonction de la pression à différentes températures [20]

On remarque que la variation de la capacité est une fonction non linéaire de la pression appliquée et dépend de la température, ce qui donne un système multi variable. Nous avons regroupé au tableau II.1, les différents paramètres géométriques du CPS utilisé [20].

Epaisseur de la membrane (h)	50 μm
Epaisseur de l'armature fixe (e)	0.1 μm
Distance entre les deux armatures (d)	1.7 μm
Surface de l'armature fixe (A)	6.327 mm^2
Largeur de la soudure (b)	500 μm

Tableau II.1 : Principaux paramètres géométriques du CPS [20].

II.5. Capteur de pression piézorésistif

Depuis 1954, où l'effet piézorésistif a été découvert dans le Silicium, la démarche pour mesurer la pression a changé et de nouveaux dispositifs avec des performances remarquables sont apparus sur le marché. Grâce au développement des micros technologies, une nouvelle famille de capteurs de pression piézorésistifs miniatures s'est ainsi progressivement imposée pour de nombreuses applications.

Même si le principe de fonctionnement des capteurs de pression piézorésistif en silicium reste le même depuis de nombreuses années, l'optimisation des capteurs pour une application donnée reste toujours une étape couteuse [24].

Nous allons présenter le principe de fonctionnement d'un capteur de pression piézorésistif micro usiné sur silicium. Le micro usinage en volume pour définir le corps d'épreuve sera décrit. Le positionnement des jauges piézorésistives et la définition d'un pont de Wheatstone sont présentés.

II.5.1. La piezorésistivité

La piezorésistivité se manifeste par un changement de la conductivité électrique d'un corps lorsque celui-ci est soumis à des contraintes mécaniques et donc à des déformations cette propriété physique fut découverte par Sir lord kelvin en 1956 dans le cas de métaux, dans le cas des semi conducteurs l'effet est cent fois plus prononcé que pour les métaux permettant l'exploitation de ce phénomène physique dans le domaine des facteurs integers [34][35].

La piezorésistivité se traduit par un changement physique du volume du matériau dû à des contraintes mécanique sur celui-ci [25].

❖ Un choix judicieux des matériaux

La qualité d'un capteur à jauges de contraintes passe tout d'abord par un choix de matériaux adaptés pour le corps d'épreuve, le support isolant et la jauge elle-même [36].

La tendance naturelle consiste à choisir des matériaux se prêtant à des déformations importantes, afin d'obtenir des signaux de grande amplitude. Il faut alors éviter d'aller aux limites d'élasticité des matériaux afin de s'affranchir des risques de déformations permanentes voire de ruptures.

Il existe deux types de jauges de contraintes : les jauges piézorésistives (ou à semi-conducteurs) et les jauges métalliques [29].

❖ La jauge

Différents critères doivent être pris en compte, parmi lesquels le facteur de jauge, la résistance à la fatigue, l'aptitude au soudage et la tenue en température. Les principaux matériaux pouvant servir dans la réalisation de capteurs à jauges de contraintes se distinguent par leur comportement thermique, leur résistance à la fatigue ainsi que par leurs propriétés de linéarité et d'hystérésis.

-le poly silicium ne possède pas de structure cristalline propre puisque il est formé d'un agglomérat de grains présentant chacun une direction cristallographique particulière de plus les phénomènes de conduction au niveau des joints de grains semblent apporter une grande influence sur la résistivité globale d'un conducteur formé de poly silicium, ce dernier possède une résistivité relativement élevée par rapport à celle d'un métal ($20\Omega\cdot\text{cm}$ contre $10,6\mu\Omega\cdot\text{cm}$ pour le platine par exemple) [37].

➤ Constantan (alliage cuivre-nickel): c'est l'alliage le plus courant. Il offre une bonne aptitude au soudage et peut être utilisé jusqu'à 200°C .

➤ Karma (alliage nickel-chrome): par rapport à l'alliage précédent, le karma présente une sensibilité plus importante pour une contrainte similaire et sur le même corps d'épreuve. Il offre aussi de meilleures performances à haute température (jusque vers 350°C).

➤ Platine-tungstène 92 % Pt, 8 % W : ce matériau est le plus cher, mais il présente la meilleure résistance à la fatigue, la gamme de température la plus large et un facteur de jauge élevé de 4,6. Il reste cependant employé pour des applications très spécifiques.

II.5.2. Facteur de jauge

Alors que les coefficients piézorésistifs longitudinaux et transversaux expriment la variation de résistivité électrique en fonction des contraintes mécaniques les facteurs de jauge [34]

l'expriment en fonction des déformations du conducteur en tenant compte des considérations géométriques. La définition des facteurs de jauges s'appuie sur l'expression fondamentale donnant la résistance électrique R d'un conducteur en fonction de la géométrie et de sa résistivité comme le montre la figure II.9 [38].

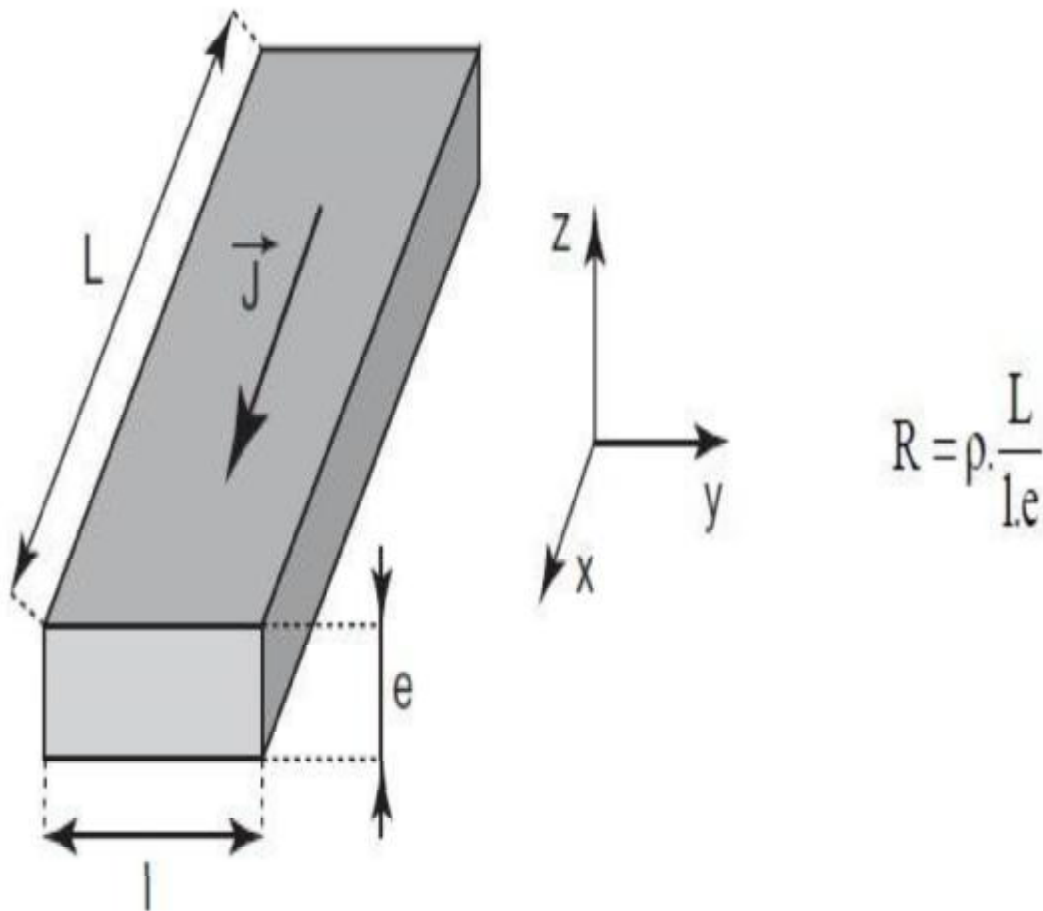


Fig. II.9 - Système d'axe utilisé pour le calcul de la résistance électrique des jauges de contraintes [34].

(R) résistance du matériau, (ρ) sa résistivité, (L) sa longueur, (e) son épaisseur.

Le fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à sa déformation. C'est le coefficient ou facteur de jauge k qui traduit cette proportionnalité, suivant la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{l} \quad (\text{II.5})$$

K est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge. Pour les jauges métalliques, k est proche de 2. Pour les jauges semi-conductrices, la valeur absolue de k est 50 fois plus grande. Ces dernières ont donc une sensibilité bien supérieure aux jauges métalliques. Cependant, elles ont une linéarité inférieure et sont plus sensibles aux effets de la température.

II.5.3. Principe de fonctionnement

Un capteur de pression piezorésistif à membrane est un capteur composite (figure II.10). Une membrane en silicium oxydée de quelques μm jauges se transforme en variation de résistance

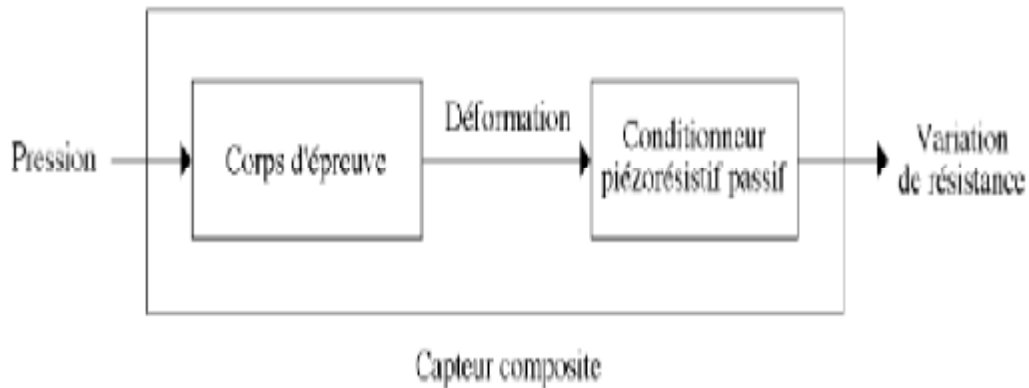


Fig. II.10 - Structure d'un capteur de pression piézorésistif à membrane

Pour avoir une sensibilité élevée le conditionneur du capteur peut être constitué de deux jauges longitudinales et deux jauges transversales disposées en bordures de membrane et interconnectées en pont de Wheatstone par des pistes d'aluminium [39], (la figure II,11).

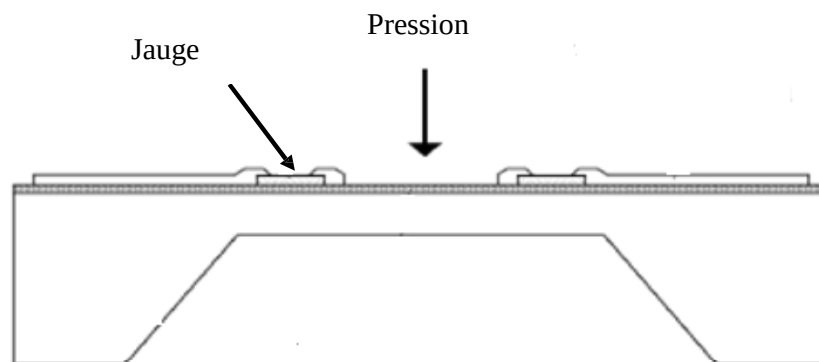


Fig. II.11-Schéma en coupe d'un capteur piézorésistif à membrane de type SOI [40]

Bien que les facteurs de jauge du poly silicium soient inférieurs à ceux du silicium monocristallin [40], le poly silicium présente l'avantage de pouvoir être déposé à faible coût sur différents types d'isolants par PECVD ou plus généralement par LPCVD à l'état amorphe ou cristallin.

La résistivité du silicium poly cristallin est également supérieure et plus fortement dépendante du dopage que celle du silicium monocristallin. Cette propriété permet de réduire la taille des jauges pour les positionner dans les zones de forte déformation du corps d'épreuve tout en gardant des valeurs de résistance élevées.

Le corps d'épreuve est réalisé par gravure chimique anisotrope localisée du silicium en règle générale les solutions de gravure anisotrope sont des solutions alcalines à haute température qui pressentent la propriété d'attaquer plus vite les plans (100) du silicium que les plans (111) . Les gravures anisotropes permettent de contrôler précisément les dimensions latérales des structures micro usinées une couche de passivation (oxyde ou nitrure) ouverte par endroit par la technique de photolithographie est utilisée comme masque.

En partant de substrats silicium orientés [100], cette méthode permet d'obtenir des membranes de forme géométrique simple, carré ou rectangle voir (figureII.12).

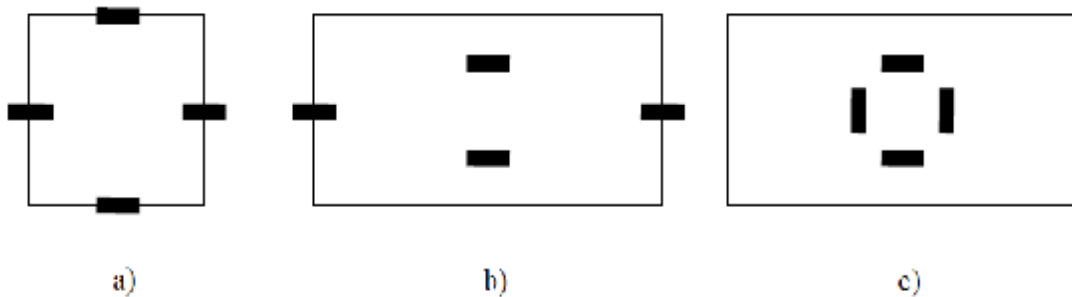


Fig. II.12 - Différentes géométrie des membranes [41].

II.5.4. Positionnement de jauges piézorésistives sur le corps d'épreuve

Pour obtenir un capteur de pression sensible les jauges piézorésistives en surface du corps d'épreuve doit être disposées aux endroits où celui-ci se déforme le plus sous pression comme le montre la figure II.13. Ces zones sont situées sur les axes médians de la structure près des bords de la membrane [39].

La figure schématise une membrane déformée sous l'effet d'une pression appliquée sur sa face supérieure. Une jauge longitudinale J_L est parcourue par un courant parallèle de la déformation ϵ_X , sa résistance augmente (facteur de jauge longitudinale positif).

Une jauge transversale J_T est parcourue par un courant I perpendiculaire à la déformation ϵ_y sa résistance diminue (facteur de jauge transversal négatif). Pour un montage en pont de Wheatstone complet deux jauges de chaque type sont nécessaires et doivent avoir la même valeur de résistance au repos pour que la tension de décalage du pont (offset) soit nulle

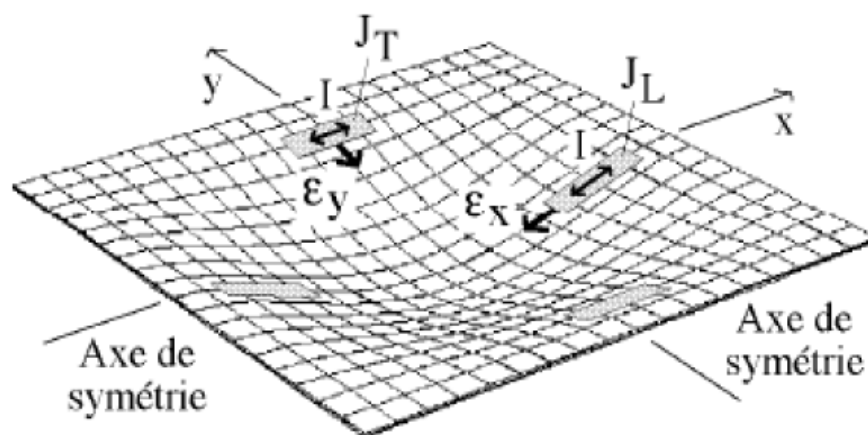


Fig. II.13 - Schéma de principe du positionnement des jauges piezorésistive [41].

Le pont de Wheatstone est le circuit le mieux adapté pour la mesure de petite variation de résistances électriques telles que rencontrées lors de l'utilisation de jauges de déformation (figure II.14).

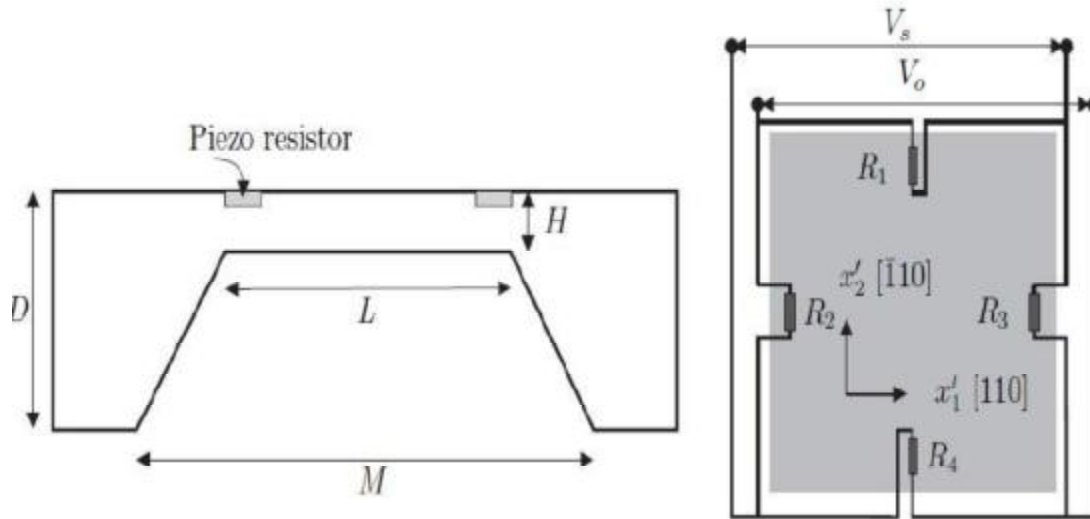


Fig.II.14-Capteur de pression piézorésistif avec quatre résistances connectées à un pont de Whetstone[41].

II.6.Conclusion

Il existe plusieurs moyens pour mesurer une pression, la plupart d'entre eux sont d'ailleurs des procédés généralistes susceptibles de mesurer des déplacements, des forces et/ou des contraintes et parfois même des niveaux ou des débits. Le choix d'un procédé plutôt qu'un autre dépendra essentiellement de la plage de pression à mesurer.

Chapitre III:

Modélisation directe du capteur

III.1.Introduction

L'objectif de ce troisième chapitre est de créer un modèle à base des réseaux de neurone « ANN-model » pour le substituer à la réponse capacitive du modèle utilisé (modèle CPS) à l'aide du logiciel **MATLAB**. L'implantation du ANN-model sur le simulateur **PSPICE** ainsi que les résultats de simulation obtenus sont également reportés.

La construction d'un modèle à base d'ANN pour le CPS, est de reproduire fidèlement son comportement lors de la phase de conception du capteur intelligent (chapitre IV). Autrement dit, ce modèle servira à la simulation comportementale du capteur intelligent, vu que le modèle analytique du CPS est limité à des conditions moins dynamiques.

III.2.Modèle du capteur de pression capacitif CPS

Le capteur de pression capacitif qui nous allons étudier est basé sur la déformation de la membrane sous l'effet d'une pression (ou d'une force) en une variation de capacité plutôt qu'une variation de résistance. En effet, il suffit de placer l'une des armatures d'un condensateur sur la membrane qui se déforme et l'autre sur une pièce solidaire du CPS d'épreuve, mais non soumise à la déformation, comme le montre le schéma ci-dessous, pour réaliser un condensateur plan dont la capacité est en relation directe avec la pression appliqué [17].

Afin de déterminer la sensibilité à pression du capteur de pression, la capacité a été relevée à mesure que la pression était augmentée de 0 Mbar à 2,1 Mbar avec un pas de 0,3 Mbar aux températures constantes 25°C, 127°C et 170°C. Les résultats correspondants sont montrés par la figure (III.1).

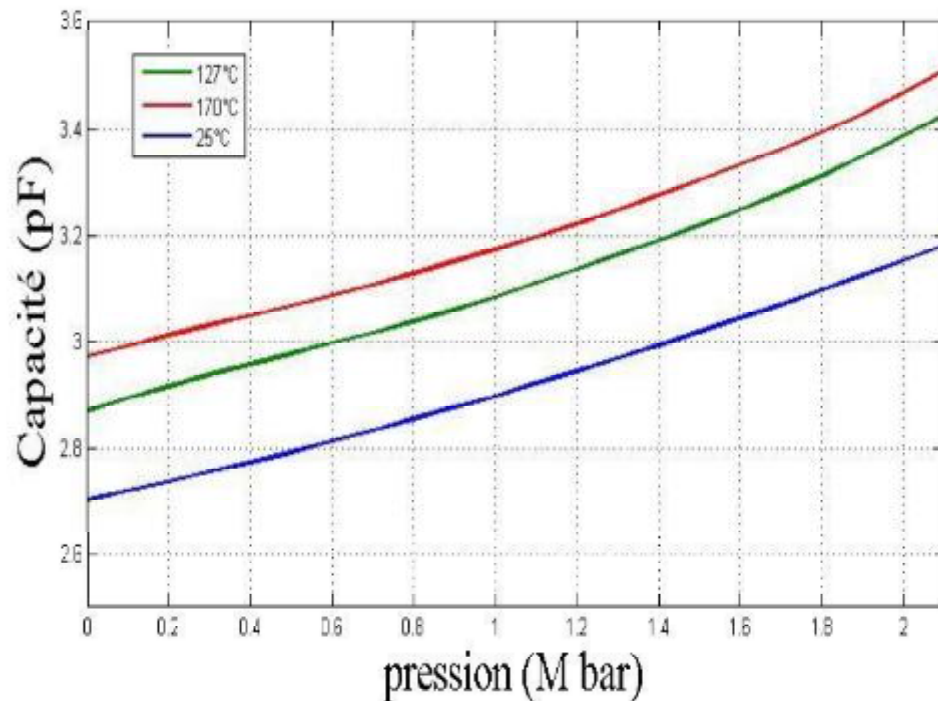


Fig. III.1-La réponse du capteur de pression sous les trois températures 25, 127 et 170°C

III.3.Modélisation du CPS

Pour créer le modèle ANN du CPS au moyen des réseaux de neurones on choisit une base de données caractérisée par la pression appliquée au CPS, la température de l'environnement où le CPS est placé et la réponse du CPS. Dans une deuxième étape on sépare la base d'apprentissage et celle de test, puis on fait l'entraînement d'un réseau de neurones sur la base d'apprentissage avec l'algorithme de rétro propagation et finalement on mesure la performance du modèle obtenu avec la base de test.

III.3.1.Choix de la base de données

Le capteur que nous avons étudié couvre une gamme de pression entre 0 et 2,1 M bar et un intervalle de température de 25°C à 170°C. La base de données doit couvrir cet ensemble de valeurs. En se basant sur les résultats expérimentaux [43], et en choisissant un pas de pression 0 et 2,1 Mbar et trois températures 25°C, 127°C et 170°C, notre base d'apprentissage possèdera donc 22 éléments X 3 longueurs de la membrane X 3 températures, donc 3 vecteurs de la forme $X(P, T, C)$, et l'apprentissage du réseau de neurones est fait avec une base de données de 198 éléments.

III.3.2. Création d'une base de validation

Comme son nom l'indique cette base de données est utilisée pour tester « valider » les résultats obtenus après l'apprentissage. On doit noter ici qu'il n'y a pas de règles précises concernant cette séparation, néanmoins, d'une manière générale la base de test représente entre 10% et 25% de la base de données, suivant le problème étudié. Les deux bases de données ainsi obtenues par cette séparation doivent impérativement couvrir l'espace de fonctionnement. Dans le cas pratique, si la température de travail du CPS, varie entre 25°C et 170°C, alors les deux bases englobent des différentes valeurs distribuées au long de cet intervalle, le même principe est appliqué à l'intervalle de variation de pression (0 à 2,1 Mbar). Dans notre cas la base d'apprentissage est composée de 198 éléments, quand à la base de test elle est composée de 22 éléments. Il est important de ne pas utiliser aucun élément de la base de test pendant toute la durée de l'apprentissage. Cette base est réservée uniquement à la mesure finale de la performance. Autrement dit, elle sert à vérifier si le réseau de neurones a une bonne performance sur les exemples qu'il n'a pas appris « base de test ». Avec les réseaux de neurones, il existe toujours le risque de sur-apprentissage, c'est-à-dire, quand le réseau a pris trop de paramètres pour représenter une fonction qui n'est pas très complexe. La base de validation permet de mettre en évidence le problème s'il se présente. Le sur apprentissage se traduit par une augmentation de l'erreur sur la base de validation [5].

III.3.3. L'apprentissage du réseau de neurones

Comme nous avons vu précédemment, l'apprentissage nécessite une base de données, une base de validation, une base de test, le nombre de couches et des neurones utilisés dans chaque couche.

Le bon choix, de type des fonctions d'activations et du nombre d'itérations nécessaires pour avoir le seuil d'estimation voulue « S » qui représente la valeur minimale de l'erreur quadratique moyenne « EQM » (L'erreur Quadratique Moyenne) qu'on désire obtenir, est aussi nécessaire pour faire notre apprentissage.

La figure III.2 représente l'organigramme qui interprète notre programme structuré en MATLAB.

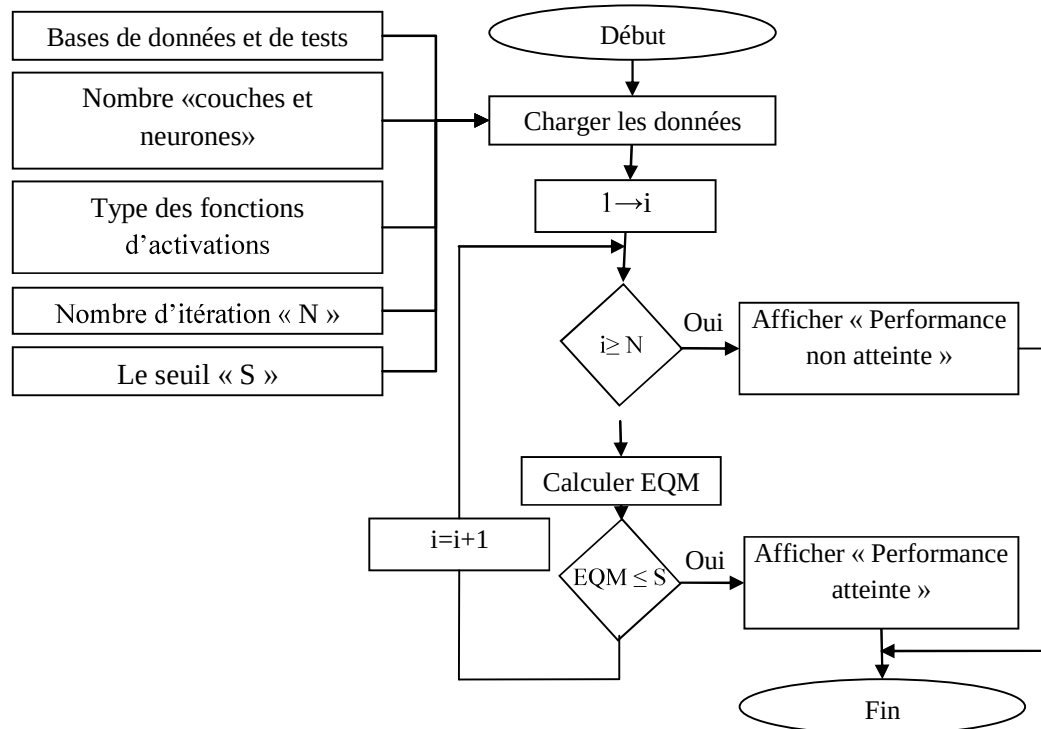


Fig. III.2-Organigramme pour le programme d'apprentissage

Dans notre cas, puisque le nombre des neurones dans la couche de sortie est déterminé par le nombre de sorties du système à modélisé, le CPS possède une seule sortie C « Capacité » donc un neurone pour la couche de sortie. Pour que le modèle ANN exprime fidèlement la variation de la réponse du CPS, il s'agit de trouver le nombre optimal des couches cachées et le nombre de neurones par couche. Nous avons envisagé deux couches, 3 neurones pour la première couche et 5 neurones pour la deuxième couche cachée « figure III.3 ».

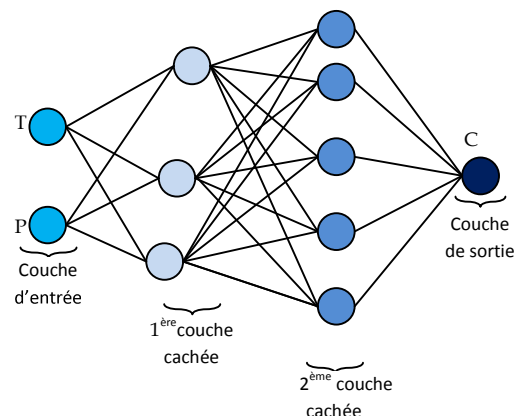


Fig. III.3-Schéma des couches de neurones de l'architecture optimisée

Cette architecture a été choisie par un test de réseau avec un nombre de neurones entre 1 et 5 neurones pour la première couche et entre 0 et 5 neurones pour la deuxième, puis nous avons observé la variation de l'erreur d'apprentissage et de test. Le tableau III.1 représente les différents résultats obtenus, cependant l'erreur de test converge vers le minimum dans l'architecture numéros 17 ce qui justifie notre choix.

	Nombre de neurones 1 ^{er} couche	Nombre de neurones 2 ^{ème} couche	Le seuil « S » Pour EQM=10 ⁻⁸
1	1	0	1886.5125
2	1	1	15.30288
3	1	2	2.6060
4	1	3	1.80466
5	1	4	11.2534
6	1	5	18.9731
8	2	0	17.7176
9	2	1	20.40993
10	2	2	11.5386
11	2	3	8.1313
12	2	4	6.5250
13	2	5	8.6254
15	3	0	32.18986
16	3	1	14.9064
17	3	2	11.8550
18	3	3	9.2842
19	3	4	4.9679
20	3	5	0.080
22	4	0	18.49098
23	4	1	10.2610
24	4	2	1.74168
25	4	3	0.61161
26	4	4	0.93212
27	4	5	0.01015
29	5	0	18.67096
30	5	1	1.09208
31	5	2	0.35022
32	5	3	0.24496
33	5	4	0.04261
34	5	5	0.04120

Tab III.1 - Variation de l'erreur du test en fonction des différentes architectures

Paramètre	Valeur optimisée		
Architecture	Feed-forward MLP (perceptron multi-couches)		
Couche cachée	2		
Règle d'apprentissage	Rétro propagation des erreurs (Back propagation)		
Nombre de Neurones	Couche d'entrée	2	
	1ère couche	3	
	2ème couche	5	
	Couche de sortie	1	
La fonction de transfert	1ère couche	Sigmoïde	
	2ème couche	Sigmoïde	
	Couche de sortie	Linéaire	
Définition des entrées		P (M Bar)	T (°C)
	Max	2.1	170
	Min	0	25
Définition des sorties	C _P (pF)		
	Max	2.7	
	Min	3.51	
EQM de test	9.8 10 ⁻⁶		
EQM d'apprentissage	10 ⁻⁵		
Base de données	Base d'apprentissage	648	
	Base de validation	144	
	Base de test	144	

Tableau III.2 : Paramètres optimisés du réseau de neurones

De même pour les choix des types des fonctions d'activations, nombre maximum d'itération et l'EQM. Le test et l'observation, de la variation de l'erreur, pour des différentes valeurs est la solution pour avoir les meilleurs résultats. Afin d'évaluer l'influence du seuil S sur le nombre d'itérations nécessaires pour obtenir $EQM < S$, la figure III.4 extraire du Matlab représente le déroulement de notre entraînement

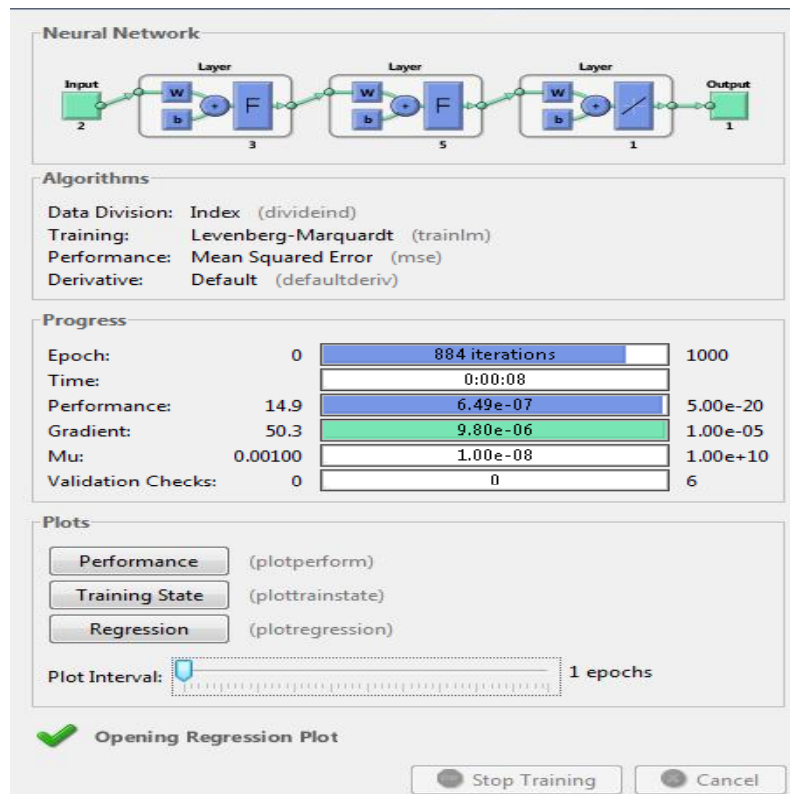


Fig. III.4- déroulement de l'entraînement

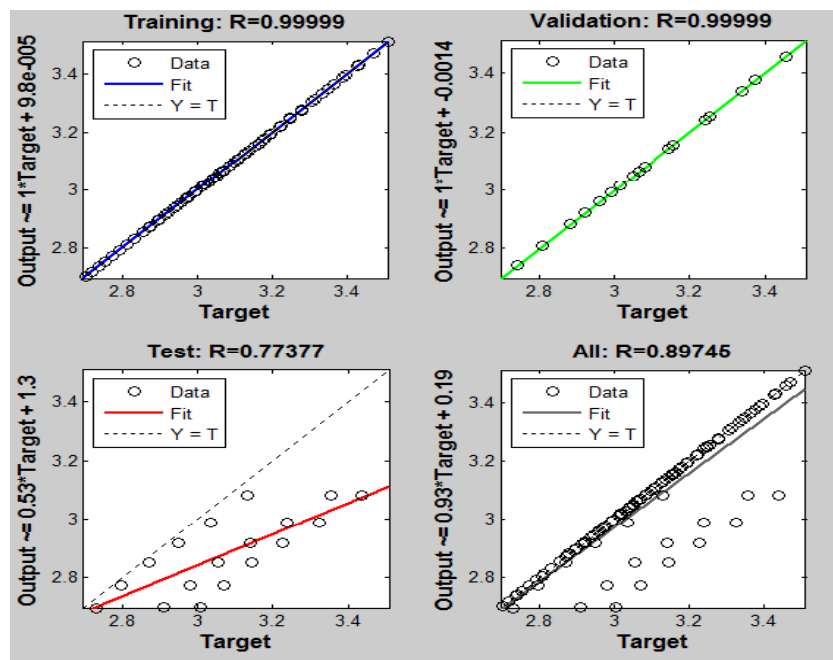


Fig. III.5 -Utilisation des bases de test et validation

Nous avons choisi plusieurs valeurs pour S , la figure III.6 représente l'évolution de l'EQM en fonction de nombre d'itérations.

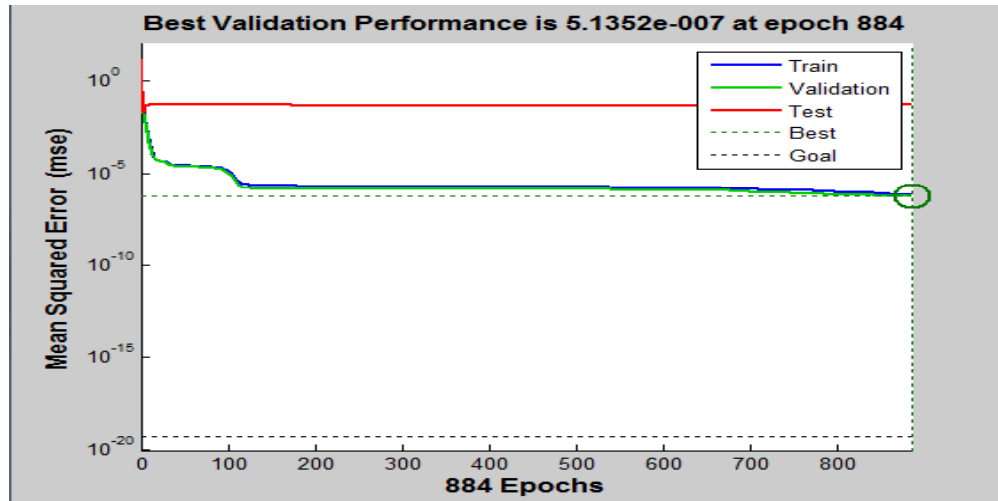


Fig. III.6 - EQM en fonction du nombre d'itérations pour $S=10^{-20}$

Le nombre d'itérations montré par la figure précédente indique que plus le seuil « S » n'est faible, plus ce nombre d'itérations n'est important et vis-vers-ça.

III.3.4. Mesure de la performance du modèle obtenu

La comparaison entre la base de données initial et celle obtenue après l'apprentissage, utilisant la base de test, indique que notre modèle exprime fidèlement la variation de la réponse du CPS. La figure III.7 présente la performance du modèle obtenu pour les trois températures 25, 127 et 170°C.

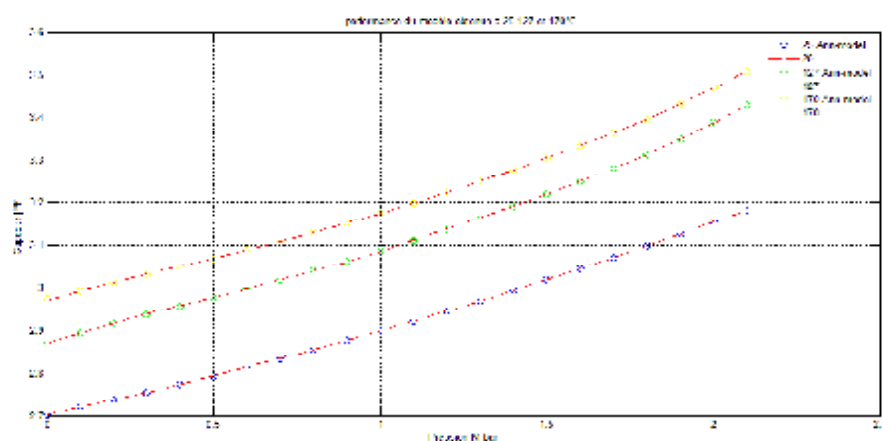


Fig. III.7 – la performance du modèle obtenu

III.4.Modèle ANN du CPS sur PSPICE

L'utilisation des boîtes ABM « **A**nalog **B**ehavioral **M**odelling » de la bibliothèque de PSPICE, nous permet d'implanter le modèle ANN sur ce simulateur. Le modèle ANN du CPS possède 9 neurones 3 pour la première couche cachée, 5 pour la deuxième et une seule pour la couche de sortie, chaque neurone du réseau est remplacé par une boîte ABM sur PSPICE et une autre ABM pour la mise en échèle de la capacité de sortie. La figure (III.8) représente la structure du réseau des ABM de notre modèle.

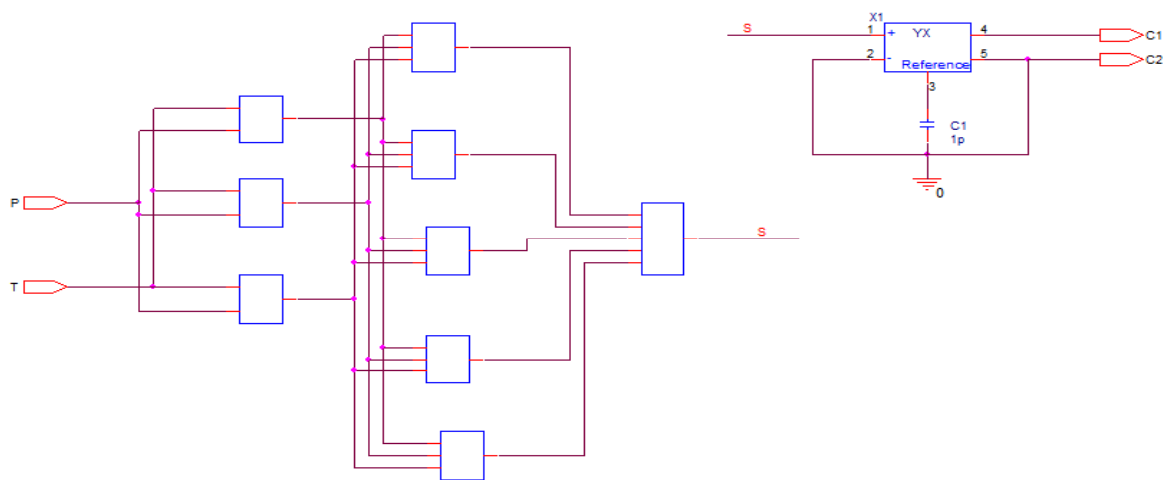


Fig. III.8– Implantation du modèle ANN sur PSPICE

Chaque ABM équivalant à un neurone est caractérisé par l'équation de ce dernier, l'équation de l'ABM 1 par exemple :

$$1/(1+\exp(-(B11+W11*V(T)+W12*V(P))))$$

La forme d'exponentiel dans l'équation est due au choix de la fonction de transfert sigmoïde dans la première couche cachée, B11 est le premier biais pour la première couche cachée, dans la matrice du biais « Bni », W111 et W112 sont respectivement le premier et le deuxième poids pour la première couche cachée, dans la matrice des poids « Wnij ».

❖ Bni : la matrice du bias « seuil W0 »

- n : numéro de la couche
- i : numéro du neurone

❖ Wnji : la matrice des poids

- n : numéro de la couche
- j : numéro du neurone

➤ i : numéro du neurone de la couche précédente

La net List du composant CPS est :

```

*----- Modèle CPS -----
    *----- la couche d'entrée
EXTERNAL INPUT P
EXTERNAL INPUT T
    *----- la sortie C ' pin C+, pin C- '
EXTERNAL OUTPUT C+
EXTERNAL OUTPUT C-
    *----- la première couche cachée
E_CPS_ABM1          N24600 0 VALUE {1/(1+exp(-(B11+W111*V(T)+W112*V(p))))}
E_CPS_ABM2          N24530 0 VALUE {1/(1+exp(-(B12+W121*V(T)+W122*V(p))))}
E_CPS_ABM3          N24542 0 VALUE {1/(1+exp(-(B13+W131*V(T)+W132*V(p))))}
    *----- la deuxième couche cachée
E_CPS_ABM4          N41663      0      VALUE      {1/(1+exp(-(B21+W111*V(N24600)+
W112*V(N24530)+W113*V(N24542)))) }
E_CPS_ABM5          N41761      0      VALUE      {1/(1+exp(-(B22+W121*V(N24600)+
W122*V(N24530)+W123*V(N24542)))) }
E_CPS_ABM6          N41973      0      VALUE      {1/(1+exp(-(B23+W131*V(N24600)+
W132*V(N24530)+W133*V(N24542)))) }
E_CPS_ABM7          N41725      0      VALUE      {1/(1+exp(-(B24+W141*V(N24600)+
W142*V(N24530)+W143*V(N24542)))) }
E_CPS_ABM8          N41845      0      VALUE      {1/(1+exp(-(B25+W151*V(N24600)+
W152*V(N24530)+W153*V(N24542)))) }
    *----- la couche de sortie
E_CPS_ABM9          N394804      0      VALUE
{B31+W311*V(N41663)+W312*V(N41761)+W313*V(N41973)+W314*V(N41725)+W315*V(
N41845)}
    * ----- la mise en échelle (C en pF)
C_ABM10 1 2 VALUE { (V(N394804) * 1E-12) }
    *----- END

```

III.5 .Confirmation du comportement capacitif du modèle CPS

Le but de cette simulation est de prouver le comportement capacitif de la sortie du composant obtenu auparavant, par un simple circuit RC de charge et décharge de la capacité, dans notre cas le CPS joue le rôle de cette capacité, qui est en série avec une résistance et un générateur de signal carré.

Les figures III.9 et III.10 représentent respectivement le circuit de simulation « Time domain » et le signal obtenu à la sortie de CPS.

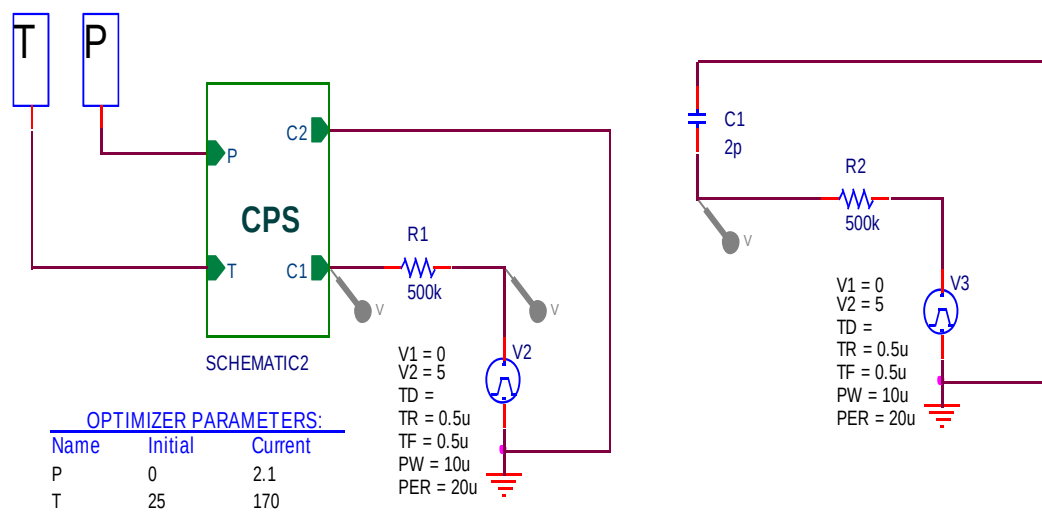


Fig. III.9 – Circuit RC obtenu par le capteur CPS

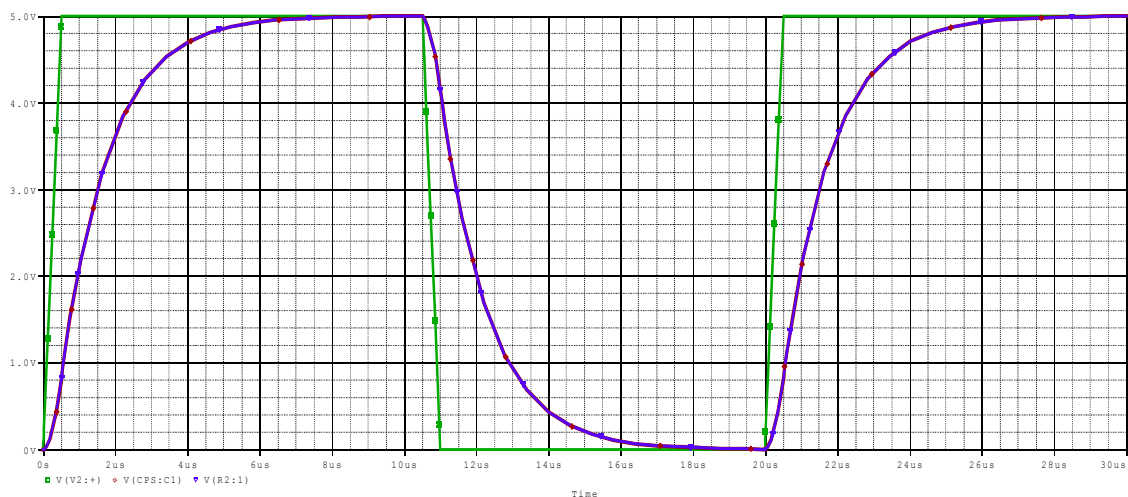


Fig. III.10 – Signaux d'entrée et de sortie du circuit RC

Cette simulation démontre la reproduction fidèle du comportement capacitif du capteur.

III.6. Convertisseur Capacité / Tension (CVC)

Le circuit précédemment simulé montre la nature capacitive de notre capteur CPS, cependant, la variation de cette capacité en fonction de la pression, est une variation d'une grandeur passive qui nécessite une conversion en une grandeur active « tension ou courant » pour l'exploiter. Le circuit présenté par la figure III.12 est un convertisseur capacité tension CVC « Capacity to Voltage Converter » à base des capacités commutées SCI « Switched Capacitor Interface », on fait appel à une interface, cette interface délivre une tension proportionnelle à la capacité du CPS. Lorsque $V_{com}=0$ la capacité $C(P)$ se charge avec la tension V_{ref} au moment où la capacité C_s se décharge à la masse. Pour $V_{com}=1$ la charge $Q=V_{ref}.C_h$ stockée dans la capacité $C(CPS)$ est transférée à la capacité C_s ($V_0.C_s=V_{ref}.C_h$) qui produit une tension de sortie $V_0 = K.C_h$ avec $K=V_{ref} / C_s$. Finalement la tension V_0 est amplifiée avec un gain en tension 'G' ce qui donne $V_{S1}= G. V_0$.

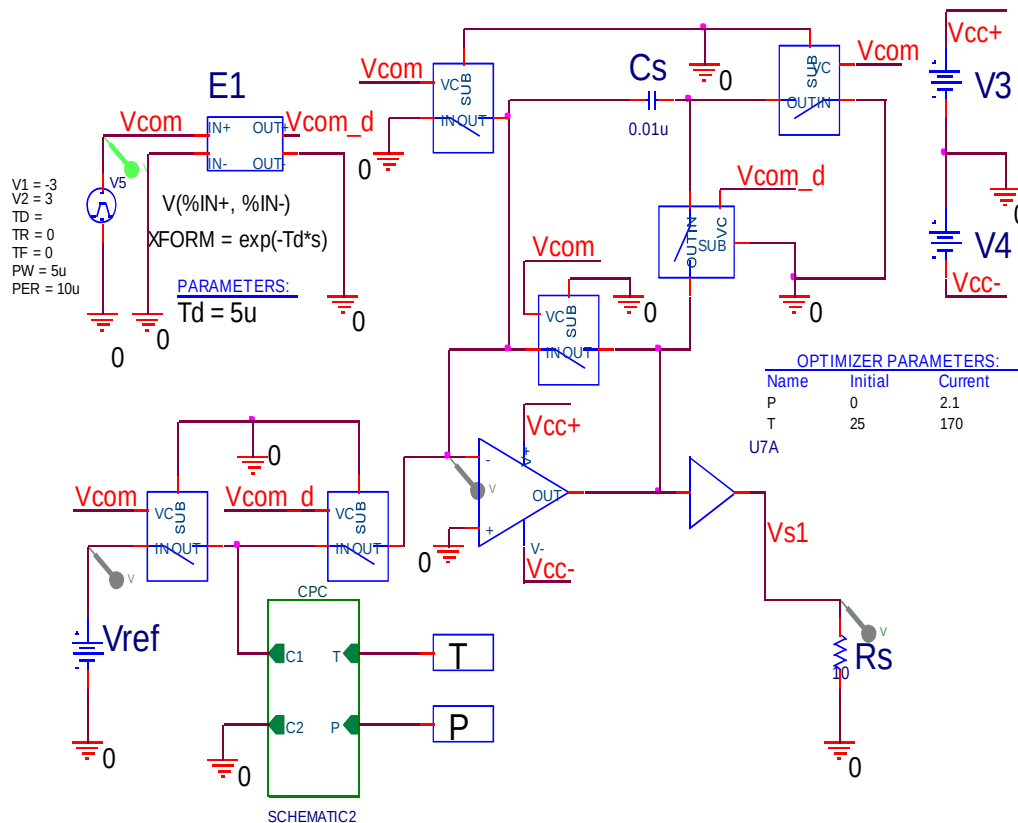


Fig. III.11 - Schéma électrique du CVC

Les trois courbes obtenues par une simulation paramétrique, pour trois températures 25 et 127 et 170°C sur une gamme de pression entre 0 et 2.1 M bar sont illustrées par la figure III.12.

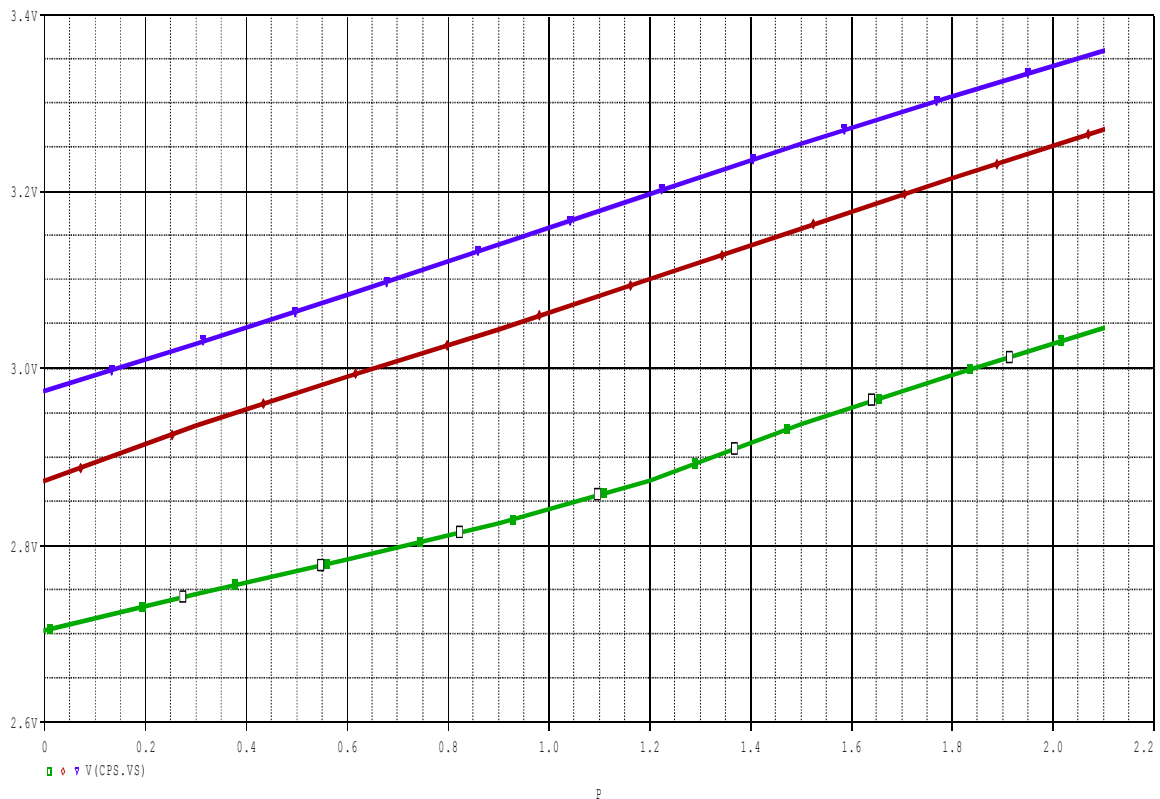


Fig. III.12 -Les trois courbes obtenues par une simulation paramétrique, pour trois températures 25 127 et 170°C

III.5.Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation du capteur de pression. Nous avons relevé une défaillance de ce genre de capteurs de pression qui est le non linéarité de la réponse. Cette non linéarité est dû soit à la technologie de fabrication ou à l'influence des paramètres extérieurs comme la température. Cependant, l'utilisation de ces capteurs dans un milieu dynamique, démontre son incapacité à suivre la variation de la pression.

Ce modèle pourra néanmoins être amélioré, en faisant appel aux capteurs intelligents. Qui auront pour rôle d'éliminer la non linéarité et les effets d'influence. Développer un capteur avec une réponse linéaire normalisée est notre défi dans le chapitre suivant. Nous allons nous baser sur les réseaux de neurones artificiels (ANNs) et les résultats expérimentaux pour corriger ces imperfection

Chapitre *IV*:

Modèle intelligent

(INV-ANN)

IV.1.Introduction

Il est possible de contrecarrer la non linéarité de capteur avec un transfert inversement non linéaire quand l'expression de la courbe de transfert du capteur est connue. Les capteurs intelligents intègrent des circuits de conditionnement, dont le rôle est la correction des réponses. L'utilisation des réseaux de neurones comme des composants de mesure, permettant de corriger la réponse des capteurs, a connu un essor considérable au cours de ces dernières années. En effet, les ANNs présentent l'avantage d'une grande adaptation aux différents problèmes causés par le non idéalité des capteurs [42].

Ce chapitre est consacré à, premièrement concevoir un composant de correction CORRECTEUR (modèle inverse) permettant la correction de la réponse du capteur de pression ANN (modèle direct). Ensuite au montage des deux modèles, direct et inverse, avec le convertisseur capacité tension qui représentent le capteur intelligent.

IV.2.La conception du capteur intelligent

La problématique de base dans la conception des instruments intelligents en général et des capteurs intelligents en particulier consiste à identifier la meilleure technique pour le développement d'un capteur adapté à un problème donné. En effet, le processus de développement est étroitement lié à l'approche adoptée pour la conception qui est à son tour issue de la manière avec laquelle nous percevons les choses. Généralement, les approches de conception font partie de l'un de ces trois points de vue [43]:

- **FAIRE** : On modélise ici ce que le système fait. Ce sont les approches orientées fonctions ou traitements.
- **ETRE** : On modélise alors ce que le système est. Ce sont les approches orientées données.
- **DEVENIR** : On modélise plutôt ce que le système devient. Ce sont les approches orientées comportement ou état.

La non linéarité, la dépendance en température, hystérésis et des autres grandeurs d'influence limitent la fidélité des capteurs en général et en particulier les capteurs de pression. L'exploitation de ce type de capteur dans un milieu dynamique nécessite alors, l'association d'un circuit de correction en temps réel afin d'obtenir une réponse linéaire complètement indépendante de toute influence extérieur. Ainsi le conditionnement du signal se fait par l'association d'un dispositif de transmission adapté qui permet l'exploitation des informations fournies par le capteur.

Pour obtenir un système de correction on fait appel aux techniques de traitement numérique de signal par le biais des circuits programmables tels que les microcontrôleurs, le microprocesseur, FPGA... La structure : capteur, circuit de conditionnement et circuit de correction est dit capteur intelligent ou « smart sensor ». Le capteur intelligent permet donc la linéarisation, la correction et la compensation automatique, et parfois même le calcul de la valeur d'une grandeur que l'on ne peut atteindre directement par la mesure

IV.3.Modélisation du capteur intelligent

Un capteur intelligent est obtenu par l'association de la technologie des capteurs, de l'électronique et de l'informatique. Un instrument intelligent est un équipement qui intègre des fonctionnalités supplémentaires ou évoluées aptes à améliorer c'est pourquoi il a été conçu. Ainsi, en plus de sa fonction élémentaire d'acquisition d'une grandeur physique, on attend d'un instrument qu'il offre des fonctions de compensation, de validation, d'autodiagnostic ou encore d'intégration au système de conduite, associées à des moyens de communications adaptés [44].

Le schéma synoptique du capteur intelligent montré par la figure VI.1. Les entrées **P**, **H**, **T**, **Hys**, sont respectivement la pression, l'humidité, la température et l'hystérésis, la sortie peut être résistance, capacité ou tension, l'élément **ANN** présente (capteur), la sortie analogique de ce dernier est d'abord amplifiée par l'élément **Amp**, puis elle est corrigée par l'élément **INV_ANN** (correcteur), cette correction est faite pour la sensibilité multiple, la non-linéarité, l'effet de la température, etc....

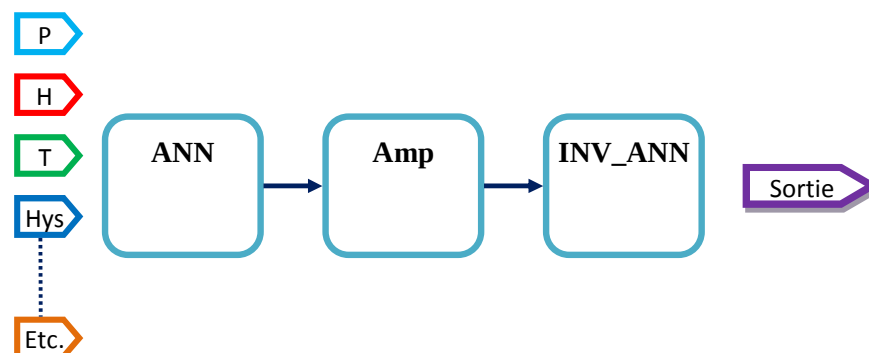


Fig. IV.1-Schéma synoptique d'un capteur intelligent

IV.4.Modélisation du correcteur INV-ANN

Nous avons développé un modèle inverse (correcteur) à base des réseaux de neurones pour le modèle direct (ANN) dans un milieu dynamique (chapitre III).

Après avoir mis au point le modèle de ANN à base des réseaux de neurones et à partir de la première base de données nous pouvons alors, construire une deuxième base de données pour l'apprentissage de modèle correcteur. On choisit une base de données caractérisée, cette fois par la sortie convertisseur capacité tension, la température du milieu de détection, la réponse et la sortie linéarisée, nous réalisons un programme sur l'environnement MATLAB, afin d'obtenir la base de données de cette sortie.

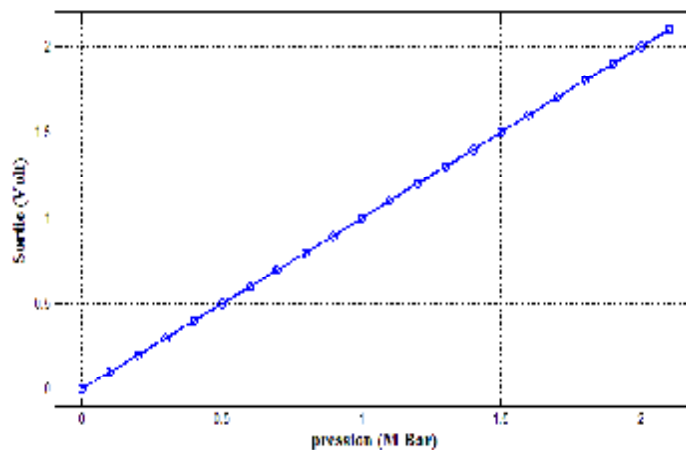


Fig. IV. 2-La sortie désirée au du capteur intelligent

Après l'élimination du non linéarité de la réponse sur notre modèle. La base de données est cette fois arrangée comme (T, V_{S1}, V_S) , où T la température de l'environnement où le CPS est placé, V_{S1} est la tension de sortie du convertisseur capacité tension et V_S est la tension de sortie du capteur intelligent (La réponse linéarisée et normalisée).

IV.4.1.L'apprentissage du réseau de neurones

Dans une deuxième étape on sépare la base d'apprentissage, la base de validation et celle de test. Un quart de données est pris pour la base de validation, un quart pour la base de test, et la moitié pour la base d'apprentissage. Puis on fait l'entraînement d'un réseau de neurones sur la base d'apprentissage avec l'algorithme de rétro-propagation et finalement on mesure la performance du modèle obtenu avec les bases de validation et de test.

On garde la même structure neuronale ; avec deux couches cachées, 3 neurones et la fonction de transfert 'Logsig' pour la première couche, 5 neurones et la fonction de transfert 'Logsig' pour la deuxième couche cachée et la fonction de transfert 'linéaire' pour la couche de sortie. La figure IV.3 présente le schéma symbolique des couches de neurones de l'architecture optimisée

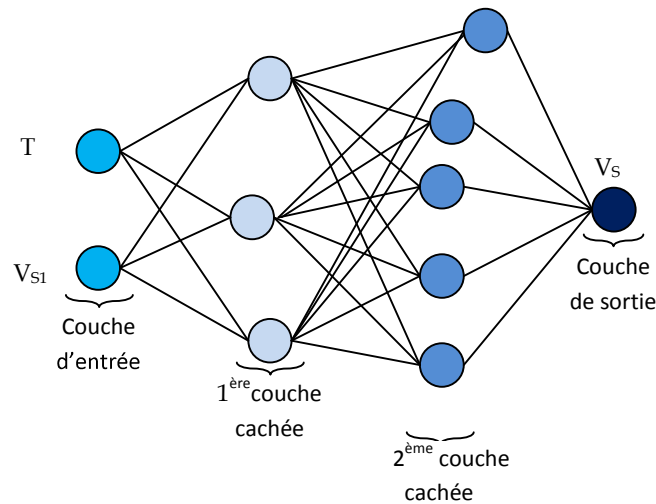


Fig. IV.3-Schéma des couches de neurones de l'architecture optimisée

Nous avons, maintenant, tous les éléments essentiels pour commencer l'apprentissage du modèle inverse INV-ANN respectant les mêmes procédures adoptés à l'ANN pour le développement du modèle INV-ANN. La figure IV.4 illustre l'évolution de l'erreur globale sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations.

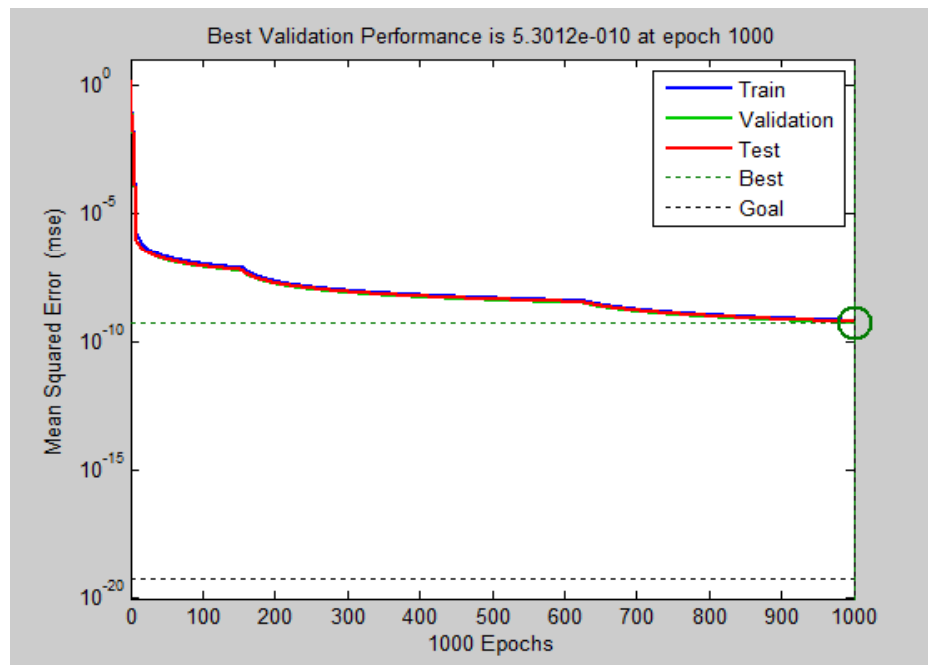


Fig.IV.4-Evolution de l'erreur EQM en fonction du nombre d'itérations pour $S=10^{-10}$

IV.4.2. Mesure de la performance du modèle obtenu

Un programme Matlab nous permet de faire une comparaison entre la base de données linéarisée et celle obtenue après l'apprentissage. Le tableau IV.1 résume les différents paramètres optimisés

Paramètre	Valeur optimisée		
Architecture	Feed-forward MLP (perceptron multi-couches)		
Couche cachée	2		
Règle d'apprentissage	Rétro propagation des erreurs (Back propagation)		
Nombre de Neurones	Couche d'entrée	2	
	1ère couche	3	
	2ème couche	5	
	Couche de sortie	1	
La fonction de transfert	1ère couche	Sigmoïde	
	2ème couche	Sigmoïde	
	Couche de sortie	Linéaire	
Définition des entrées		V _{s1} (V)	T (°C)
	Max	2.1	170
	Min	0	25
Définition des sorties	V _s (V)		
	Max	2.1	
	Min	0	
EQM de test	5.3 10 ⁻¹⁰		
EQM d'apprentissage	10 ⁻¹⁰		
Base de données	Base d'apprentissage	648	
	Base de validation	144	
	Base de test	144	

Tableau IV.1 : Paramètres optimisés du réseau de neurones

Par analogie, avec la modélisation du CPS « chapitre III » on procède à la modélisation du modèle inverse « capteur intelligent ». A la fin de la phase d'apprentissage et d'optimisation on obtient une architecture semblable à celle du modèle ANN. L'algorithme d'apprentissage et l'optimisation ont été étudiés au chapitre III.

Nous avons utilisé un programme Matlab pour l'apprentissage qui nous donne les matrices des paramètres du réseau de neurones « bias et poids ».

IV.5. Modèle INV-ANN du CPS sur PSPICE

Les matrices des bias et des poids nous permet d'implanter le modèle INV-ANN sur le simulateur PSPICE, utilisant les boîtes ABM, le modèle INV-ANN du CPS possède 9 neurones, chaque neurone du réseau est remplacé par une boîte ABM sur PSPICE. La figure IV.5 présente la structure du réseau des ABM du modèle inverse.

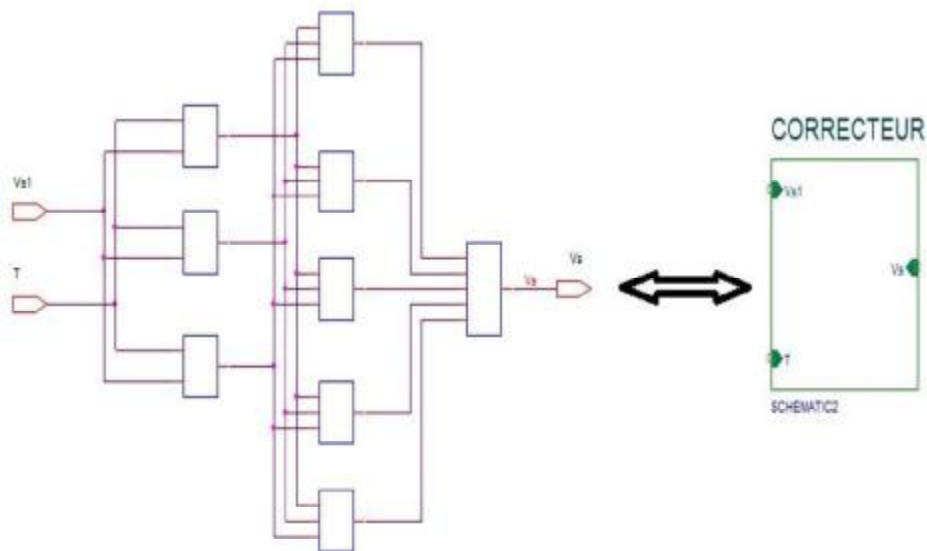


Fig.IV.5-Présentation de la structure des ABM de INV-ANN

IV.6. Modélisation du capteur intelligent

Ce modèle inverse présenté n'est rien qu'un correcteur de non linéarité provoqué par l'effet de la température. Cependant, ce modèle de correction « INV-ANN » couplé avec le modèle de CPS « ANN » et le convertisseur capacité/tension « CVC », nous donne le capteur intelligent désiré. Un schéma synoptique du capteur intelligent est montré par la figure IV.6.

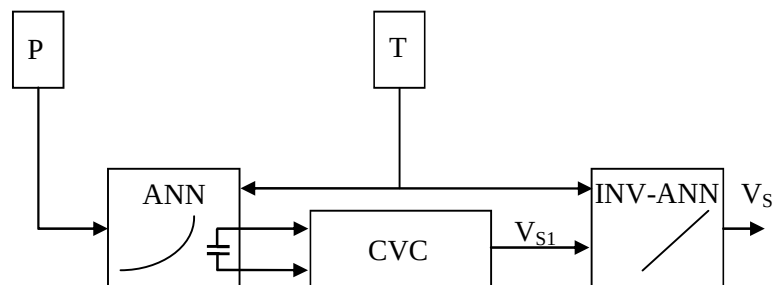


Fig.IV.6-Schéma synoptique du capteur intelligent

IV.7. Test du capteur intelligent

Le circuit pratique de test est représenté par la figure IV.7, afin d'évaluer les performances de notre capteur intelligent. Nous avons envisagé les différents cas, qui traitent les problèmes de la non linéarité et la dépendance à la température. Nous validons le modèle du capteur intelligent par un test pour des valeurs arbitraires attribués à pression et à la température.

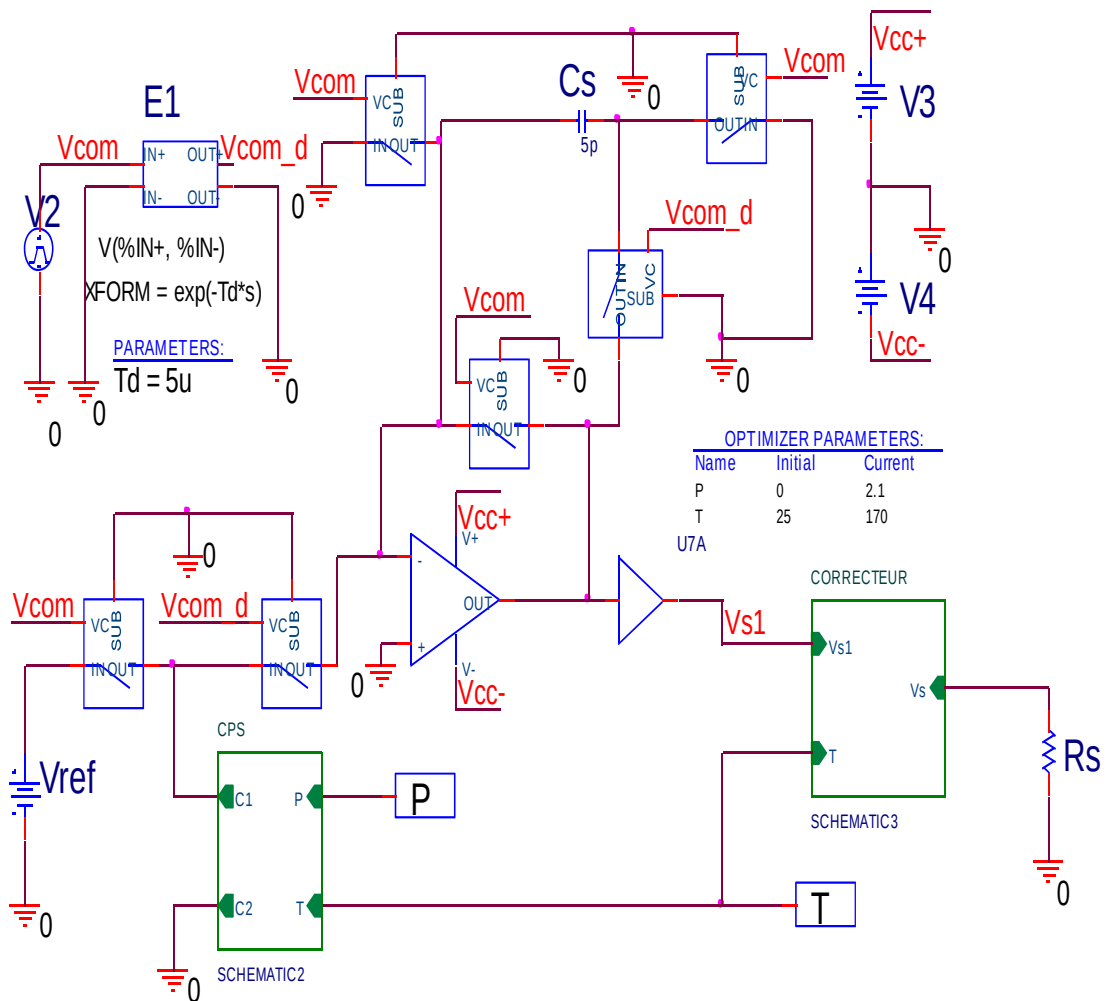


Fig.IV.7-Schéma pratique du capteur intelligent

IV.8. Test pour un cycle de pression

Le premier test est effectué pour montrer l'efficacité de la linéarisation appliquée au capteur CPS par le correcteur INV-ANN, pour cela la figure IV.8 illustre la réponse du capteur intelligent, pour une variation entre 0 et 2,1 Mbar à température fixe 25°C.

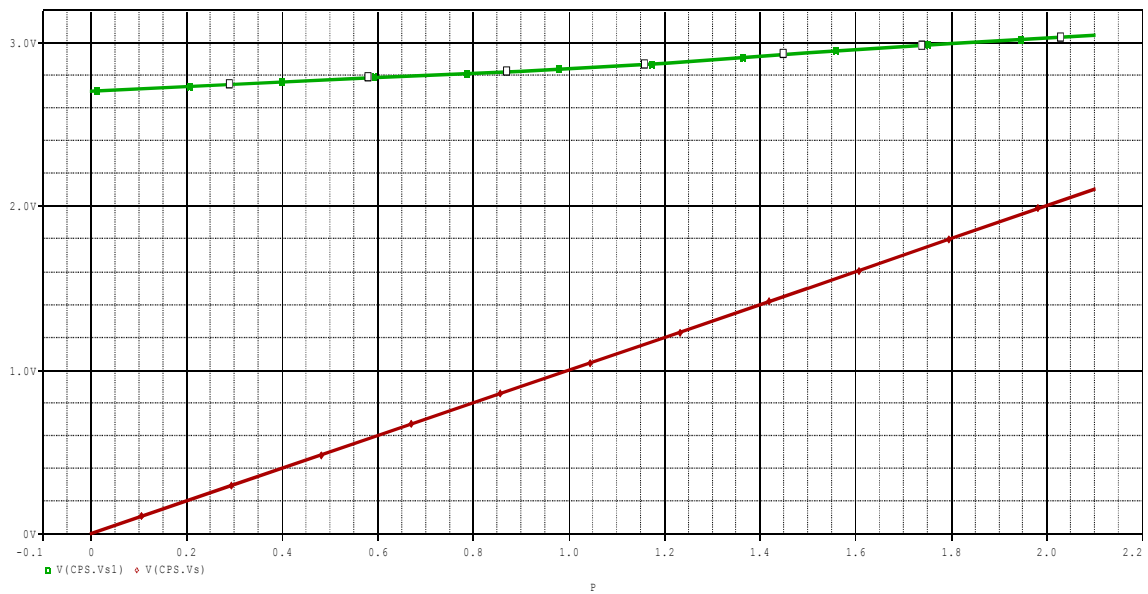


Fig. IV.8 – Réponse du capteur intelligent à T=25°C pour un cycle de pression

La figure précédente montre une correction totale pour la température 25°C, la même réponse est aussi délivrée pour une simulation paramétrique pour les trois températures 25, 127 et 170°C. La figure IV.9 présente l'entrée V_{S1} et la sortie V_S du modèle inverse INV-ANN.

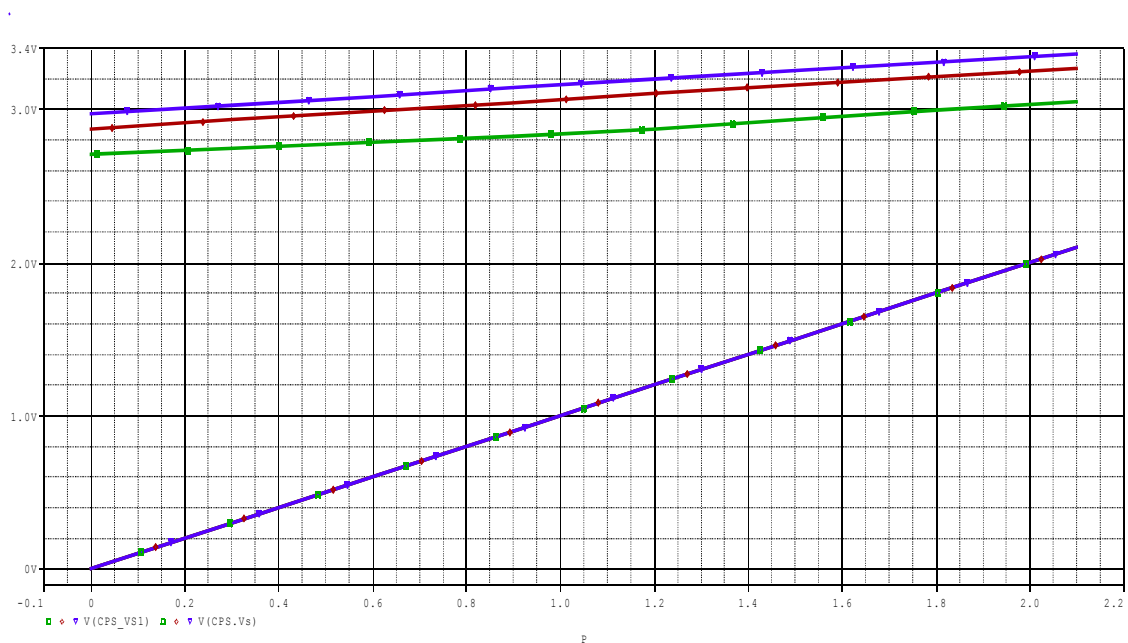


Fig. IV.9 – Réponse du capteur intelligent pour une simulation paramétrique à T=25,127 et 170°C pour un cycle de pression

Cette dernière simulation montre une élimination totale des courbes dues à la température, et leur remplacement par un seul signal de sortie V_S de INV-ANN.

IV.9.Conclusion

Les résultats de simulation obtenus, montrent que le modèle INV-ANN développé a permis de corriger la sortie du capteur CPS, tout en éliminant la non linéarité et la dépendance de la température. L'association de cet élément de correction, modélisé à base des ANNs a apporté des améliorations considérables sur le fonctionnement du CPS, notamment dans un milieu de travail dynamique



Conclusion

générale

Conclusion générale

Conclusion générale:

Les capteurs intelligents constituent un domaine de recherche de pointe par leur fonction de monitoring et de contrôle de paramètres physico-chimiques et biologiques, dans tous les domaines de l'activité humaine, dans le cadre d'applications de détection, d'analyse ou de surveillance. Leurs applications dans des domaines tels que la sécurité (systèmes d'identification et d'authentification), la gestion des biens, le bâtiment, le transport, la fabrication, la détection environnementale, les hydrocarbures, le textile, la maintenance prédictive industrielle, le monitoring médical, ouvrent de nouvelles opportunités de développement économique.

Notre mémoire s'inscrit dans ce contexte, à savoir la détermination des paramètres influant sur un capteur de pression afin de corriger leur sortie pour en faire un capteur performant, précis et fiable.

Le principe du capteur intelligent étudié repose sur la linéarisation de la sortie du dispositif. Une variation de cette sortie (la capacité) indique une variation de la pression. Puisque notre capteur est de type capacitif, le modèle implanté sur le simulateur PSPICE traduit la variation de la pression par une variation d'une capacité, cette dernière est une grandeur passive, qu'il est nécessaire de convertir à une grandeur active. C'est le rôle du circuit convertisseur capacité tension CVC « Capacity to Voltage Converter » réalisé. Malheureusement, toute variation d'une grandeur d'influence (température), induit une erreur de la réponse. Pour arriver à compenser ces dérives, nous avons fait appel, dans ce mémoire, aux réseaux de neurones. D'abord pour reproduire fidèlement la nature de la réponse du modèle du capteur de pression appelé modèle direct ANN, que nous avons inséré en premier lieu dans la bibliothèque de PSPICE. Puis, en second lieu nous avons conçu leur modèle inverse INV-ANN appelé aussi correcteur, qui permet d'éliminer toutes les imperfections que nous avons relevé.

En ce qui concerne le modèle correcteur, nous le avons aussi conçu et implanté comme un composant dans la bibliothèque du simulateur PSPICE. Nous avons regroupé sur un seul circuit le modèle direct ANN, le convertisseur capacité tension CVC et le modèle inverse INV-ANN, qui formant ainsi notre capteur intelligent. En examinant les résultats obtenus, les simulations effectuées, nous pouvons dire que ce capteur intelligent donne d'excellents résultats dans un milieu dynamique. En effet, il délivre une sortie linéaire et normalisée par rapport à la pression, complètement indépendante de la température et qui peut être exploité directement par un processus industriel.

Les nouvelles méthodes et techniques développées au cours de ce mémoire peuvent être étendues à d'autres types de capteurs afin d'améliorer leurs performances. Comme perspective

Conclusion générale

de ce travail, on peut imaginer l'intégration matérielle de ce modèle en code VHDL sur des FPGA ou un ASIC qui sera pourquoi pas commercialisé.

Bibliographiques

Bibliographies:

- [1] **Mathieu Guilhe** ,"Conception et optimisation dun capteur piezo-optique de pression, application à la mesure de hautes pressions hydrostatiques", Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, (2010).
- [2] **Merabet Khallil**, "Étude Et Simulation D'un Capteur De Pression Capacitif Au Silicium", Mémoire Magister , Université constantine , Algerie , (2010).
- [3] **Mohamed Mehdi JATLAOUI**, " Capteurs Passifs à Transduction Electromagnétique Pour la Mesure Sans Fil de La Pression", 20 Avril 2009, Ecole doctorale : GEET .
- [4] **mohamad al bahri**, "Influence De La Temperature Sur Le Comportement Statique Et Dynamique Des Capteurs De Pression Capacitifs Au Silicium ", Doctorat De L'institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse, 24 Mai 2005,
- [5] **Kouda S**, "Conception d'un capteur d'humidité intelligent", Thèse de doctorat, Batna Algerie, (2012).
- [6] **Menacer Farid**, " Modélisation D'un Capteur De Pression à Oscillateur En Anneau ", Mémoire Magister , Batna Algerie.
- [7] **Asch G**, "Capteurs en instrumentation Industrielles", 3^{ème} édition Dunod, (1999).
- [8] **Rolland P. A**, "Electronique, semi-conducteur, Génie électrique", Rapport de conjoncture chapitre 8, pp. 239-266, (2005).
- [9] **Kerrour F**, "Etude et modelisation de capteurs de pression piezoresistifs et capacitifs au silicium", Thèse de Doctorat, Constantine, (2008).
- [10] **Parikshit G**, "Chemically deposited optical fiber humidity sensor", Thèse de Master, Mississippi, (2003).
- [11] **D. Gridaine**, "Cours plasturgie", Université de Troyes (2009-2010).
- [12] **I. Stoyanov, M. Tewes, M. Koch, M. Lohndorf**, "Microfluidic devices with integrated active valves based on thermoplastic elastomers", Microelectronic Engineering, vol 83, pp 1681–1683 (2006).
- [13] **Yacouba SANOGO**, "Conception Et Fabrication De Capteurs Et De Leur Technique D'interrogation Pour Des Applications Dans Les Domaines De La Santé Et De L'environnement", Thèse De Doctorat , De L'école Normale Supérieure De Cachan, 2012
- [14] **Tingkuie H**, "A study of the water vapor absorption for integrating humidity sensor", Thèse de Doctorat, Alabama, (2002).
- [15] **Gert V. D. H et Huijsing J. H**, "integrated Smart Sensors: design and calibration", Kluwer Academic Publisher, (1998).

Bibliographiques

- [16] **Staroswieckiet M et Bayart M**, "Actionneurs intelligents", Edition Hermes, (1994).
- [17] **Abdolreza R. Mohammadia*, Tim C.M. Grahamb, Chad P.J. Benningtonb, Mu Chiaoa**, "Development of a compensated capacitive pressure and temperature sensor using bonding and chemical-resistant coating for multiphase chemical reactors", Sensors and Actuators A: Physical, 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.
- [18] **L.Bergougnoux,Maitre de Conférences**, "Conditionnement Electronique des Capteurs", Cours, POLYTECH,Marseille, 2014.
- [19] **Yamasaki H**, "Approaches to Intelligent Sensors", Proc. Of the 4th Sensor Symposium, pp.69, (1984)..
- [20] **Philippe. M**, "Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium", thèse de Doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1998.
- [21] **G.Blasquez. Y. Naciri**, " Static response of miniature capacitive pressure sensors with square or rectangular silicon diaphragm ", université P. Sabatier Toulouse. 1887
- [22] **Wen H. KO** ,"Solid-State Capacitive Pressure Transducers ", Sensors and Actuators. 10 (1986), pp. 303-320.
- [23] **Fouad Kerrou**," Etude et Modélisation de Capteur de Pression Piezorésistifs et Capacitifs au Silicium ", Thèse Doctorat de l'université Mentouri Constantine 2008.
- [24] **Erik. V et Jacob. R**, "Piezo Resistive MEMS Devices: Theory and Applications", thèse de Magister, Department for Micro and Nano Technology, DTU, 2005.
- [25] **Tounsi. F**, "Microphone électrodynamique MEMS en technologie CMOS: étude, modélisation et réalisation", thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010.
- [26] **Anders. H**, "Development of a multi sensor for marine environment studies", thèse de Magister, Department for Micro and Nano Technology, DTU, 2005.
- [27] **T. KUDOH, S. SHOJI, M. ESASHI**, "An integrated miniature capacitive pressure sensor",Sensors and Actuators A29 (1991), pp. 185-193.
- [28] **Ph. MENINI, Ph. DONDON, G. BLASQUEZ, P. PONS, P. FAVARO, C.DOUZIECH** ,"Characterisation and modelling analyse of a capacitive pressure sensor based on a silicon/ Pyrex sensing cell and BICMOS A/D integrated circuit", Sensors and Actuators 85 (2000),pp.90-98.
- [29] **Rouri. J**, "Développement of mems sensors for mesurments of pressure, relative humidity and température", thèse de doctorat, Worcester poly technic Institue, 2003.
- [30] **Y.S LEE, K.D. WISE A batch**, "fabricated silicon capacitive pressure transducer with low temperature sensitivity", IEEE transaction on electronics devices, Vol. ED-29, NO.1

-
- [31] **G. BLASQUEZ, P. PONS, A. BOUKABACHE,**" Capabilities and limits of silicon pressure sensors",Sensors and Actuators, 17 (1989), pp. 387-403.
- [32] **Kurt E.** "PETERSEN Silicon as a mechanical material", Proceedings of the IEEE, Vol. 70, n° 5, 1982, pp. 420-457. 1
- [33] **G. BLASQUEZ, Y. NACIRI, N. BEN MOUSSA, P. PONS,**" Static response of miniature capacitive sensor with square or rectangular silicon diaphragm ",Revue de physique appliqué , 22 (1987), pp. 43-46.
- [34] **Fabien. P,**"Capteur intégré tactile d'empreintes digitales à microstructure piezoresistives", thèse de Doctorat, Institute national de polytechnique de Grenoble, 2002.
- [35] **Cristianno. C,** "Conception de transducteurs acoustiques micro usinés", thèse de Doctorat, Institut national de polytechnique de grenoble IVPG, 2005.
- [36] **Randy Frank,** "Understanding Smart Sensors", Artech House Boston. London.
- [37] **Habib. C,**"Conception et réalisation d'une plate-forme multi capteur de gaz conductimétriques vers le nez électronique intégré", thèse de doctorat, Université de Paul Cézanne, 2007.
- [38] **Benoit.C,** "Modélisation de fautes et conception en vue de test structurel des micros systèmes", thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2001.
- [39] **Jingbo. X et al,** "A monolithic silicon multi-sensor for measuring three-axis acceleration, pressure and temperature", Journal of Mechanical Science and Technology, 22 -731-739- 2008.
- [40] **Christophe. M,** "Caractérisation de micro transducteurs de pression à haute performances intégrés sur silicium", thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1998.
- [41] **Michal. O,** "Modelling and optimization of piezoresistive pressure sensors", thèse de doctorat, Université de INSA de Toulouse, 2009.
- [42] **Qu W et Meyer J. U,** "A novel thick film ceramic humidity sensitive characteristics of α -Fe₂O₃ ceramic sensor", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 75, pp.546-551, (1992).
- [43] **Mohamed ZAYED,**"Véhicules Intelligents : Etude et développement d'un capteur intelligent de vision pour l'attelage virtuel", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, (2005).
- [44] **Ciame SEE, Mireille BAYART, Blaise CONRARD, André CHOVIN et Michel ROBERT,** "Capteurs et actionneurs intelligents", Techniques de l'Ingénieur, (2005).

Résumé

Ce travail vise à concevoir un capteur de pression intelligent, dont l'objectif est d'éliminer, la non linéarité et la sensibilité multiple, de la sortie du capteur capacitif utilisé. A l'aide des réseaux de neurone et l'environnement Matlab on a passé par la phase d'apprentissage pour concevoir le modèle direct « ANN ». Ce modèle a été inséré dans la bibliothèque du simulateur PSPICE, dont la sortie reproduit fidèlement le comportement du capteur utilisée. Du fait que notre capteur est de type capacitif, le modèle obtenu sur PSPICE traduit la variation de la pression par une variation d'une capacité. Cette dernière est une grandeur passive qui nécessite une conversion en une grandeur active. A cet égard nous avons réalisé un circuit de conversion capacité/tension. Une linéarisation, par un programme Matlab, est appliquée à la réponse de l'ANN dont le but est de créer une base de donnée d'un élément de correction permettant de corriger sa réponse non linéaire. L'apprentissage pour cette nouvelle base de donnée nous donne le modèle inverse INV-ANN. Les trois blocs, modèle ANN, modèle inverse INV-ANN et le convertisseur capacité tension, constituent le capteur intelligent.

Mots clés :

Capteur de pression, Modèle direct, Modèle inverse, Réseaux de neurones, MLP, MEMS.

abstract

This work aims to design an intelligent pressure sensor, which aims to eliminate the non-linearity and multiple sensitivity, output of capacitive sensor used. With the help of neural networks and the Matlab environment was going through the learning phase to design the direct model "ANN". This model has been inserted into the library of the PSPICE simulator, the output faithfully reproduces the behavior of the sensor used. Because our sensor is of the capacitive type, the model obtained on PSPICE reflects the pressure variation by a variation of a capacitance. The latter is a passive magnitude which requires conversion into an active quantity. In this regard we achieved a capacity / voltage conversion circuit. A linearization by a Matlab program is applied to the ANN response whose goal is to create a database of a correction element for correcting its nonlinear response. Learning for the new database gives us the INV-ANN inverse model. The three blocks, ANN model, inverse model INV-ANN and the voltage converter capacity, are the smart sensor.

Keywords:

Pressure sensor, direct model, inverse model, Neural Networks, MLP, MEMS.