

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



Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département d'Électronique



N° d'ordre:

Série:

LABORATOIRE DE MODELISATION DES DISPOSITIFS A ENERGIE RENOUVELABLE ET
NANOMETRIQUE



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en sciences, électronique

Option : **Microélectronique et Instrumentation**

Présentée par :

KEMOUCHE Salah

THEME

Etude et simulation d'un micro capteur de pression avec électronique associée : PFET

Soutenue le 03/03/2020

Devant le jury :

Président :	Mr. A. HAOUAM	Prof .Université des Frères Mentouri Constantine 1
Rapporteur :	Mr. F. KERROUR	Prof .Université des Frères Mentouri Constantine 1
Examineur :	Mr. R. MAHAMDI	Prof .Université Mostefa Benboulaïd Batna 2
Examineur :	Mr. H. BOURIDAH	Prof .Université Mohamed Essedik Benyahia Jijel.
Examineur :	Mr. A. BELLEL	Prof .Université des Frères Mentouri Constantine 1

REMERCIEMENTS

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au **MoDERNa** (laboratoire de recherche : modélisation de dispositifs à énergie renouvelable et nanométriques) à l'université des frères Mentouri Constantine1.*

*Je tiens en premier lieu à remercier infiniment et à exprimer toute ma gratitude envers mon directeur de thèse, Monsieur **Fouad KERROUR**, professeur à l'Université des frères Mentouri Constantine 1. Et de m'avoir confié ce sujet, de m'avoir prodigué ses précieux conseils, ses orientations, ses qualités humaines, sa disponibilité entière durant cette période de travail en n'épargnant aucun effort pour me faire profiter de son expérience scientifique et son aide dans la préparation et la rédaction de ce travail.*

*Je remercie chaleureusement Monsieur **A. HAOUAM**, professeur à l'université des frères Mentouri de Constantine 1, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant la présidence de ce jury de soutenance.*

*Je remercie vivement Monsieur **R. MAHAMDI**, professeur à l'université Mostefa Benboulaïd de Batna 2, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour avoir accepté d'être examinateur de cette thèse.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Mr. H. BOURIDAH** professeur à l'Université Mohamed Essedik Benyahia de Jijel pour s'être rendu disponible en vue du déplacement à l'Université Constantine 1 en acceptant de juger mon travail et de participer à ce jury.*

*Mes sincères remerciements s'adressent à Monsieur **A. BELLEL**, professeur à l'université des frères Mentouri de Constantine1, pour avoir accepté de juger mon travail.*

Mes remerciements vont également à mes collègues du laboratoire MoDERNa pour leur collaboration dans ce travail et leurs encouragements et leur sympathie.

Je tiens enfin à adresser un dernier merci tout spécial à mes parents et à toute ma famille pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien moral.

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	vi
Liste des acronymes et abréviations.....	vii
Chapitre I. Introduction générale	
I.1. Les capteurs	1
I.2. Du capteur basique au capteur « intelligent ».....	2
I.3. La technologie MEMS	3
I.4. De la microélectronique à la technologie CMOS-MEMS.....	6
I.5. Motivation.....	8
Chapitre II. Etat de l'art : Microcapteurs de pression	
II.1. Introduction	12
II.2. Généralités sur les capteurs de pression	12
II.2.1. Description des microcapteurs de pression	12
II.2.3. Les principales caractéristiques des microcapteurs de pression.....	13
a) L'étendue de mesure (E.M)	13
b) Sensibilité à la pression	14
c) Sensibilité à la température.....	14
d) Linéarité ou non-linéarité.....	14
II.3. Les différents types de capteurs de pression.....	14
II.3.1. Classification selon la pression de référence.....	15
a) Capteur de pression absolue	15
b) Capteurs de pression relative	15
c) Capteurs de pression différentielle	15
II.3.2. Classification selon le principe de détection.....	16
a) Capteur de pression piézorésistif.....	16
b) Capteur de pression capacitif.....	17
c) Capteur de pression piézoélectrique.....	19
II.4. Conditionneur associé.....	20
II.4.1. Conditionneur de capteurs de pression piézorésistif.....	20
a) Conditionnement en pont de Wheatstone.....	20
b) Conditionneur de capteur de pression Freescale.....	21
II.4.2. Conditionneur de capteurs de pression capacitif.....	21

a) Convertisseur capacité-fréquence ou tension.....	22
b) Linéarisation.....	22
II.4.3. Conditionneur de capteurs de pression piézoélectrique.....	23
II.5. Domaines d'application des capteurs de pression.....	23
II.5.1. Applications automobiles.....	24
II.5.2. Applications médicales.....	25
II.6. Technologies de fabrication des capteurs de pression.....	25
II.6.1 Technologies MEMS.....	25
a) Micro-usinage en surface.....	25
b) Micro-usinage en volume.....	27
II.6.2 Technologies CMOS-MEMS.....	27
a) Pré-CMOS process.....	28
b) Post-CMOS process.....	29
c) Intermediate-CMOS process.....	30
II.6 Conclusion.....	30
Chapitre III. Capteurs de pression à effet de champ PSFET	
III.1. Introduction.....	31
III.2. PSFET à base de grille suspendue SG-MOSFET.....	31
III.2.1. Description et principe de fonctionnement.....	31
III.2.2. Exemple de fabrication.....	35
III.3. Capteurs de pression PSFET piézorésistif.....	37
III.3.1. Description et principe de fonctionnement.....	38
III.3.2. Exemple de fabrication.....	40
III.4. Capteur de pression PSFET piézoélectrique.....	41
III.5. Conclusion.....	42
Chapitre IV. Etude, simulation et optimisation d'un PSFET à base SG-MOSFET	
IV.1 Introduction.....	44
IV.2. Modélisation analytique.....	44
IV.2.1. Modélisation mécanique de la membrane.....	46
a) Membrane de forme carrée et rectangulaire.....	46
b) Membrane de forme circulaire.....	47
IV.2.2. Modélisation de la capacité de grille suspendue.....	48
IV.2.3. Caractéristiques I-V du PSFET.....	49

IV.3.	Conception et réalisation de l'outil de Simulation.....	51
	a) Déflexion de la membrane.....	52
	b) Capteur de pression capacitif.....	55
	c) Capteur de pression à base SG-MOSFET	58
IV.4	Simulation numérique.....	58
	IV.4.1. Méthodologie de conception et modélisation sous COMSOL.....	59
	A. Comportement électromécanique	61
	B. Comportement semi-conducteur.....	64
	C. Validation du modèle.....	67
	IV.4.2 Étude du PSFET en technologie CMOS 2 μm.....	69
	IV.4.3 Étude en fonction du facteur de forme du diélectrique MOSFET	78
	IV.5 Optimisation du capteur.....	81
	IV.5.1 Etude des paramètres géométriques de la membrane.....	81
	IV.5.2 Etude des paramètres géométriques du MOSFET.....	85
	IV.5.3 Effet du type et matériaux du MOSFET.....	87
IV.6	Etude de capteur avec circuit électronique associé.....	89
	IV.6.1 Mise en parallèle de plusieurs PSFET identiques	90
IV.7	Conclusion.....	92
Chapitre V. Simulation d'un PSFET piézoélectrique		
V.1.	Introduction.....	94
V.2.	Piézoélectricité.....	96
	V.2.1 Matériaux piézoélectriques.....	97
	V.2.2. Equations fondamentales de la piézoélectricité.....	99
	V.2.3. Différents modes de transduction.....	100
	V.2.4. Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique.....	100
V.3.	Modélisation du PSFET piézoélectrique.....	101
V.4.	Méthodologie de simulation.....	103
V.4.	Résultats et discussions	107
V.5.	Application : Mesure à distance de la surpression aérienne.....	110
IV.7	Conclusion.....	111
	Conclusion générale.....	112
	Références bibliographiques.....	115
	Résumé.....	129

Abstract	130
ملخص	131

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma synoptique d'un capteur.....	2
Figure I.2 : Du capteur basique au capteur intelligent.....	3
Figure I.3 : Premier microsystème : un transistor MOS à grille résonante (1967)...	4
Figure I.4 : Chronologie des cycles de recherche et développement de plusieurs produits MEMS.....	5
Figure I.5 : Densité en transistors ou composants en fonction de l'année. Le graphique représente la feuille de route de l'industrie des semiconducteurs, le développement des capteurs intégrés s'inscrivant dans la stratégie du « More than Moore ».....	7
Figure II.1 : Principe d'un capteur de pression à membrane.....	13
Figure II.2 : Types de mesure de la pression.....	15
Figure II.3 : Schéma d'un capteur de pression a) absolue, b) relative, c) différentiel.....	16
Figure II.4 : Schéma d'un capteur de pression piézorésistif a) vue de dessus, b) vue de côté, c) des jauges de contrainte piézorésistives connectées dans une configuration de pont de Wheatstone.....	17
Figure II.5 : Schémas de principe du capteur de pression capacitif a) vue en coupe, b) vue de dessus, c) fonctionnement en mode normale.....	18
Figure II.6 : Capteur de pression capacitif en touche mode.....	18
Figure II.7 : Capteur de pression en PZT.....	19
Figure II.8 : Capteur de pression en quartz.....	19
Figure II.9 : a) Photographie optique de la surface supérieure du capteur de pression Freescale Semiconductor utilisant le « X-ducer » d'origine, b) la nouvelle configuration de piézorésistances « cadre ».....	21
Figure II.10 : Schéma électrique de circuit convertisseur astable.....	22
Figure II.11 : Circuit de conversion capacité-tension.....	22
Figure II.12 : Circuit préamplificateur de charge d'un capteur de pression piézoélectrique.....	23
Figure II.13 : Classification des différentes technologies de capteur de pression MEMS par rapport aux leur application et gamme de fonctionnements.....	24
Figure II.14 : Applications automobiles du capteur de pression.....	24
Figure II.15 : Mesure de la pression des différents organes du corps.....	25
Figure II.16 : Étapes simplifiées de la technique du micro-usinage en surface.....	26

Figure II.17 : Vue en coupe de la fabrication d'une membrane MEMS par micro usinage de volume.....	27
Figure II.18 : Pré-CMOS process.....	28
Figure II.19:Vue en coupe d'un capteur de pression intégré à base du procédé préCMOS	28
Figure II.20 : Post-CMOS process.....	29
Figure II.21 : Vue en coupe d'un capteur de pression intégré à base du procédé post-CMOS process.....	29
Figure II.22 :Vue en coupe du capteur de pression des laboratoires Toyota fabriqués par le procédé intra-CMOS.....	30
Figure III.1 :Structure d'un capteur de pression à effet de champ PSFET à base SG-MOSFET.....	32
Figure III.2 : Schéma de principe d'un capteur de pression à base SG-MOSFET.....	32
Figure III.3 :Schéma en coupe de la structure d'un capteur de pression fabriqué par Lysko.....	33
Figure III.4 : (a) Vue en coupe de capteur de pression PSFET circulaire (b) microscopie électronique par balayage (SEM) de capture fabriquée.....	34
Figure III.5 : Vue en coupe de nouveau capteur de pression proposé par Ajay.....	35
Figure III.6 : Différentes étapes de base pour la fabrication d'un capteur de pression à base SG-MOSFET.....	36
Figure III.7 : Vue de dessous et de dessus des différents capteurs de pression SG-MOSFET réalisée par Svensson et al	37
Figure III.8 : (a) MOSFET en tant que piézorésistance, (b) Structure de capteur de pression composée d'une piézorésistance équivalente à NMOS intégrée sur la membrane.....	38
Figure III.9 : Schéma de principe d'un capteur de pression basé sur l'effet piézorésistif dans le MOSFET.....	39
Figure III.10 : Schéma du nouveau capteur de pression proposé par Yan-Hong Zhan..	39
Figure III.11 : (a) Circuit miroir de courant de détection (b) Vue en coupe du capteur de pression intégré basé sur la détection miroir de courant.....	40
Figure III.12 : Les étapes de fabrication du capteur de pression réalisé par Yan-Hong Zhang et al.....	41
Figure III.13 : Structure d'un dispositif POSFET et son symbole schématique.....	41
Figure III.14 : Structure d'un capteur de pression Ψ -MOSFET.....	42

Figure IV.1 : Vue en coupe transversale d'un capteur de pression PSFET avec son modèle capacitif équivalent.....	45
Figure IV.2 : Vue générale sur l'interface GUI PSFET.....	52
Figure IV.3 : Vue 3D de la déflexion $w(r)$ de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée.....	53
Figure IV.4 : Vue 2D de la déflexion $w(r)$ de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée.....	53
Figure IV.5 : Déflexion maximale de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée.....	54
Figure IV.6 : Vue 3D de la déflexion $w(x,y)$ de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée $P=100\text{MPa}$	54
Figure IV.7 : Déflexion maximale de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée.....	55
Figure IV.8 : Schéma en coupe de la structure d'un capteur de pression capacitif.....	55
Figure IV.9 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée pour une membrane de forme circulaire.....	56
Figure IV.10 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée dans le cas d'une membrane de forme carrée.....	57
Figure IV.11 : Schéma de Principe d'une simulation numérique.....	58
Figure IV.12 : Étapes de simulation sous environnement COMSOL multiphysics.....	60
Figure IV.13 : Conditions aux limites pour le modèle électromécanique d'un quart de la structure.....	62
Figure IV.14 : Maillage du capteur a) maillage direct b) Procédé d'extrusion du maillage 2D vers une géométrie 3D.....	63
Figure IV.15 : Déflexion maximale de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée.....	64
Figure IV.16 : Conditions aux limites pour le modèle semi-conducteur.....	66
Figure IV.17 : Maillage NMOS	67
Figure IV.18 : (a) Structure, (b) Dopage du PSFET simulée sous SILVACO.....	68
Figure IV.19 : Caractéristiques I_D-V_g du PSFET au repos.....	69
Figure IV.20 : Courant de drain I_D en fonction de la pression appliquée.....	70
Figure IV.21 : Vue 3D de la déflexion $w(x, y)$ de la membrane pour $P=140\text{ kPa}$	71
Figure IV.22: Déflexion de la membrane fonction de la position axiale x pour $\neq P$	71

Figure IV.23 : Déflexion de la membrane fonction de la position axiale x pour $\neq V_g$.	72
Figure IV.24 : Variation de la tension pull-in en fonction de la pression appliquée.....	73
Figure IV.25 : Variations de la capacité de grille et la tension de seuil du capteur en fonction de la pression appliquée.....	74
Figure IV.26: Dopage du NMOS simulé pour $\neq V_d$	75
Figure IV.27: Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée.....	75
Figure IV.28: Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée pour diverses températures.....	77
Figure IV.29: Dérive thermique de « l'offset ».....	78
Figure IV.30: Structure de base d'un PSFET capacitif.....	79
Figure IV.31: Structure de base du capteur contenant un oxyde de protection.....	79
Figure IV.32: Structure de base avec une membrane diélectrique.....	80
Figure IV.33: Réponse du capteur PSFET pour différents architectures.....	80
Figure IV.34 : Différentes forme de la membrane du capteur de pression PSFET.....	81
Figure IV.35: Différentes forme de la membrane du capteur de pression PSFET.....	82
Figure IV.36 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée pour diverse formes de la membrane.....	82
Figure IV.37 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes valeurs de la surfaces « A ».....	83
Figure IV.38 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane «h»	84
Figure IV.39 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes valeurs de l'épaisseur de la cavité d'air «d ₀ »	84
Figure IV.40 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes longueurs de la grille.....	86
Figure IV.41 : Variation du courant de drain en fonction de la largeur du canal W_g pour différentes pressions.....	87
Figure IV.42 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une pour différents matériaux semi-conducteurs du NMOS.....	88
Figure IV.43 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée pour différents matériaux semi-conducteurs du PMOS.....	88
Figure IV.44 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée.....	90
Figure IV.45: Matrice des capteurs PSFET connectés en parallèle fabriqué par Dai	91

Figure IV.46 : Simulation de la configuration de 9 PSFETs (étude 2 μ m) identique en parallèle.....	91
Figure IV.47 : Diagramme du régime de pression	92
Figure V.1 : Utilisation des phénomènes piézoélectriques dans le sonar	94
Figure V.2: Capteur de pression PZT	95
Figure V.3 : Illustration des effets piézoélectriques direct et inverse.....	96
Figure V.4 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité	97
Figure V. 5 : Classification des structures cristallines.....	97
Figure V. 6 : Cycle d'hystérésis Polarisation = f(E) d'un matériau ferroélectrique	98
Figure V.7 : Illustration des modes piézoélectriques d ₃₃ et d ₃₁ utilisés pour la récupération d'énergie.....	101
Figure V.8 : Structure et principe de fonctionnement d'un PSFET piézoélectrique et son symbole schématique	101
Figure V.9 : Structure PSFET piézoélectrique étudiée.	103
Figure V.10 : Étapes de simulation d'un PSFET piézoélectrique sous environnement COMSOL.	104
Figure V. 11 : Bibliothèque des matériaux piézoélectriques sous environnement COMSOL.	106
Figure V.12 : Conditions aux limites pour le modèle dispositifs piézoélectriques.....	107
Figure V.13 : Déformation de capteur sous l'application d'une haute pression de 200bar.....	108
Figure V.14 : Charge électrique créée en fonction de la pression appliquée.	108
Figure V.15 : Variation de Capacité piézoélectrique en fonction de la pression appliquée.....	109
Figure V.16 : Variation de Capacité Piézoélectrique en fonction de la pression appliquée.	109
Figure IV.17 : Schéma synoptique de la mesure sans-fil de la pression.....	111

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Matériaux fonctionnels utilisés dans les MEMS.....	6
Tableau III.1 : Valeurs des coefficients de piézorésistance de MOSFETs à canal orientés (100)	37
Tableau III.2 : Différentes PSFETs publiées dans la littérature.....	42
Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients réduits k_{ij} pour différentes valeurs de r_d	47
Tableau IV.2 : Caractéristiques des maillages présentés sur la Figure IV.14.....	64
Tableau IV.3 : Paramètres de NMOS de la technologie 1.5 μ m.	67
Tableau IV.4 : Paramètres de NMOS de la technologie 2 μ m.	70
Tableau IV.5 : Évolution des caractéristiques S et NL en fonction de l'étendue de la mesure de pression considérée (E.M)	76
Tableau IV.6 : Les paramètres géométriques des capteurs utilisés dans la simulation.	81
Tableau IV.7 : Sensibilité et Non linéarité pour plusieurs formes de membrane.....	83
Tableau IV.8 : Les paramètres principaux de la technologie CMOS.....	85
Tableau IV.9 : Valeurs de la sensibilité à la pression pour différentes L_g	86
Tableau IV.10 : Valeurs de la sensibilité à la pression pour différentes W_g	87
Tableau IV.11 : Sensibilité et Non linéarité dans deux types de MOSFET pour divers matériaux.....	89
Tableau V.1 : Applications des matériaux piézoélectriques.....	95
Tableau V.2 : Propriétés de différents matériaux piézoélectriques	99
Tableau V.3 : Noms, symboles, unités et tailles des grandeurs et des constantes utilisées dans l'équation de la piézoélectricité.....	99
Tableau V.4 : Principales caractéristiques mécanique des matériaux utilisés dans la simulation.....	106

LISTE DES ABRÉVIATIONS

MEMS	Micro electro mechanical systems
NEMS	Nano electro mechanical systems
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
PSFET	Capteurs pression à effet de champ
SG-MOSFET	MOSFET à grille suspendue
SEM	Microscopie électronique par balayage
POSFET	Piezoelectric oxide semiconductor field effect transistor
GUI	Graphical user interface
FEM	Méthode des éléments finis
EOT	Equivalent Oxide Thickness ou EOT Épaisseur équivalente de l'oxyde
CAO	Conception assistée par ordinateur
PZT	Titano-Zirconate de Plomb
AlN	Nitride d'aluminium
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
TCAD	Technology Concept Aid Design
SILVACO	Silicon Valley Corporation
TCS	Coefficient de température de sensibilité
MATLAB	MATRIX Laboratory
COMSOL	Communication solution
PWM	Pulse width modulation

Chapitre I.

Introduction Générale

I.0. Introduction

Malgré l'évolution croissante du domaine des micros capteurs et microsystèmes et l'avènement des capteurs intelligents « smart sensor », l'étude et la modélisation élémentaire de capteurs de pression restent toujours d'actualités, puisqu'elles sont et resteront toujours l'élément de base de la conception de tous microsystèmes. C'est pourquoi de nombreux travaux sont en cours afin de les optimiser et d'améliorer leurs performances.

Ce premier chapitre introductif donnera, dans un premier temps, un aperçu général sur les capteurs, les MEMS et leurs diverses applications. Ainsi que la technologie CMOS-MEMS permettant d'intégrer capteurs et/ou actionneurs MEMS et l'électronique associée sur une même puce. Ensuite, se concentrer sur la motivation de cette recherche.

I.1. Les capteurs

Les capteurs ont des rôles de plus en plus variés et étendus dans notre vie quotidienne. Ainsi, ces capteurs sont actuellement largement diffusés dans le monde pour des applications grand public. Ils permettent de mesurer les effets de tous les phénomènes agissant sur l'environnement de l'homme, et permettent d'assurer la liaison homme – machine – environnement.

Un capteur, premier élément d'une chaîne de mesure, est par définition un composant qui traduit une grandeur physique, telle une variation de température ou de pression, en une grandeur exploitable généralement électrique. Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à l'intégrer dans un processus plus vaste. Le capteur forme ainsi une partie centrale et fondamentale de l'interface entre le monde physique et le monde électrique. [1, 2].

La figure I.1 montre le schéma synoptique d'un capteur. Soumis à l'action d'un mesurande non électrique, le capteur présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par S qui est en fonction du mesurande $S = F(m)$. La grandeur S est la sortie ou réponse du capteur, m est la grandeur d'entrée ou excitation [3].

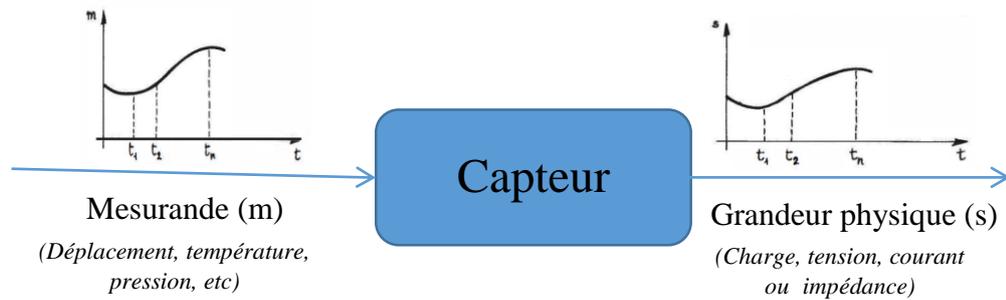


Figure I.1 : Schéma synoptique d'un capteur.

Vu de l'extérieur, le capteur peut se modéliser comme un générateur (capteur actif) ou comme une impédance (capteur passif).

- Les capteurs actifs basés sur un principe physique qui assure la conversion de l'énergie propre au mesurande en une énergie électrique par exemple, l'effet piézoélectrique, qui prend naissance dans certains matériaux (tel que le quartz) lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques, permettent de mesurer des forces, pressions et accélérations [4].
- Les capteurs passifs fonctionnant en modulateurs où c'est l'impédance du capteur qui est sensible à la variation du mesurande. Ces variations d'impédance ne sont mesurables que par l'intermédiaire d'un circuit électronique de conditionnement et nécessitent une alimentation continue ou alternative externe. En général ces dispositifs sont toujours associés à des équipements de mesure ou insérés dans des chaînes de mesure ou d'instrumentations [5]

Certains capteurs sont dits « composites » c'est-à-dire composés de deux parties ayant un rôle bien défini [2] :

- Le corps d'épreuve : qui réagit sélectivement aux variations de la grandeur à mesurer.
- Le transducteur : lié au corps d'épreuve, qui traduit ses réactions en une grandeur physique exploitable.

I.2. Du capteur basique au capteur intelligent

Plusieurs études définissent les différences entre un capteur « smart » et un capteur « intelligent ». Nous nous baserons sur le document élaboré par Romain Martin [6], qui dissocie les notions de capteur basique, capteur smart, et capteur intelligent de la manière suivante :

- **Un capteur basique** est un simple transducteur permettant la conversion d'une grandeur physique en un signal électrique exploitable et quantifiable, au besoin l'opérateur doit donc concevoir la chaîne d'acquisition répondant à ses besoins ;

- Un capteur « smart » intègre des fonctionnalités qui améliorent ses aptitudes métrologiques, grâce à des fonctions embarquées de traitement et de sauvegarde des données, telle qu'une fonction de linéarisation de la réponse du capteur, ou encore la prise en compte de grandeur d'influence ;
- Un capteur « intelligent » intègre à la fois les fonctionnalités d'un capteur « smart », ainsi qu'une aptitude à rendre crédible ces mêmes fonctionnalités, le terme de crédibilisation faisant référence à la fiabilité et à l'intégrité du capteur et des données qu'il délivre.

La Figure I.2 illustre les différences fonctionnelles entre un capteur « smart » et un capteur « intelligent ». Le capteur intelligent contient donc une fonctionnalité de traitement embarquée qui fournit des ressources de calcul pour effectuer des tâches de détection et d'actionnement plus complexes avec des applications de haut niveau [7].

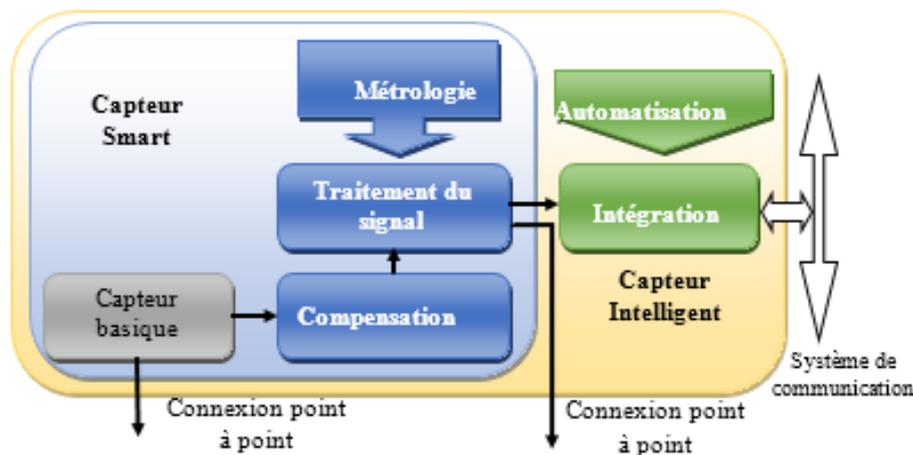


Figure I.2 : Du capteur basique au capteur intelligent [8].

I. 3. Technologie MEMS :

Le domaine des capteurs est en pleine évolution suivant la progression fulgurante des technologies de fabrication des composants électroniques et plus particulièrement l'arrivée sur le marché industriel des microsystèmes à signaux mixtes analogiques - numériques, ainsi que l'émergence des technologies MEMS.

MEMS est l'acronyme de « Micro Electro Mechanical Systems », appelés aussi « Micromachines » au Japon ou « Microsystèmes » en Europe. Comme leur nom l'indique, ils possèdent des parties mécaniques et électriques à une échelle micrométrique. Fabriqués pour la première fois au début des années 1967 (transistor MOS à grille résonante) grâce aux progrès des procédés de fabrication de la microélectronique [9, 10].

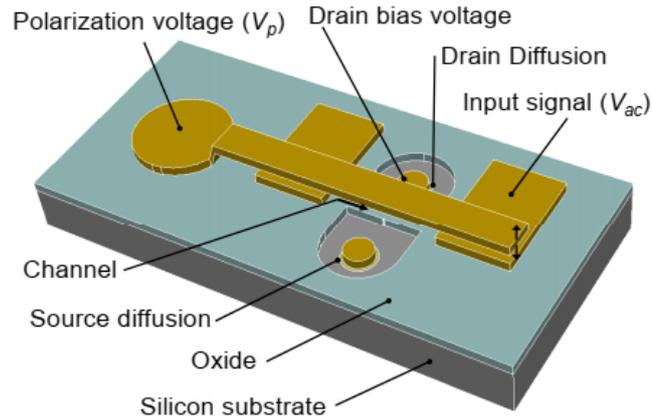


Figure I.3 : Premier microsysteme : un transistor MOS à grille résonante (1967) [10].

Les technologies de fabrication de microsystemes sont dérivées de celles de fabrication de la microélectronique utilisant les mêmes techniques des générations de masque (la photolithographie, le micro-usinage en volume et le micro-usinage en surface, etc.) [11]. Les techniques de fabrication des microsystemes seront détaillées dans le chapitre suivant.

La technologie des MEMS permet le développement de composants intelligents ; elle ajoute à la capacité de calcul de la microélectronique, l'aptitude de percevoir et de contrôler des micro-capteurs et des micro-actuateurs. Les secteurs d'applications des microsystemes s'étant fortement diversifiés, la déclinaison des modes d'intégration a donné lieu à nouveaux termes, tels que, les MOEMS [12], signifiant systèmes opto-électromécaniques, les bioMEMS pour les applications bio médicales [13], ou encore les MEMS-RF pour les dispositifs radio fréquence[14].

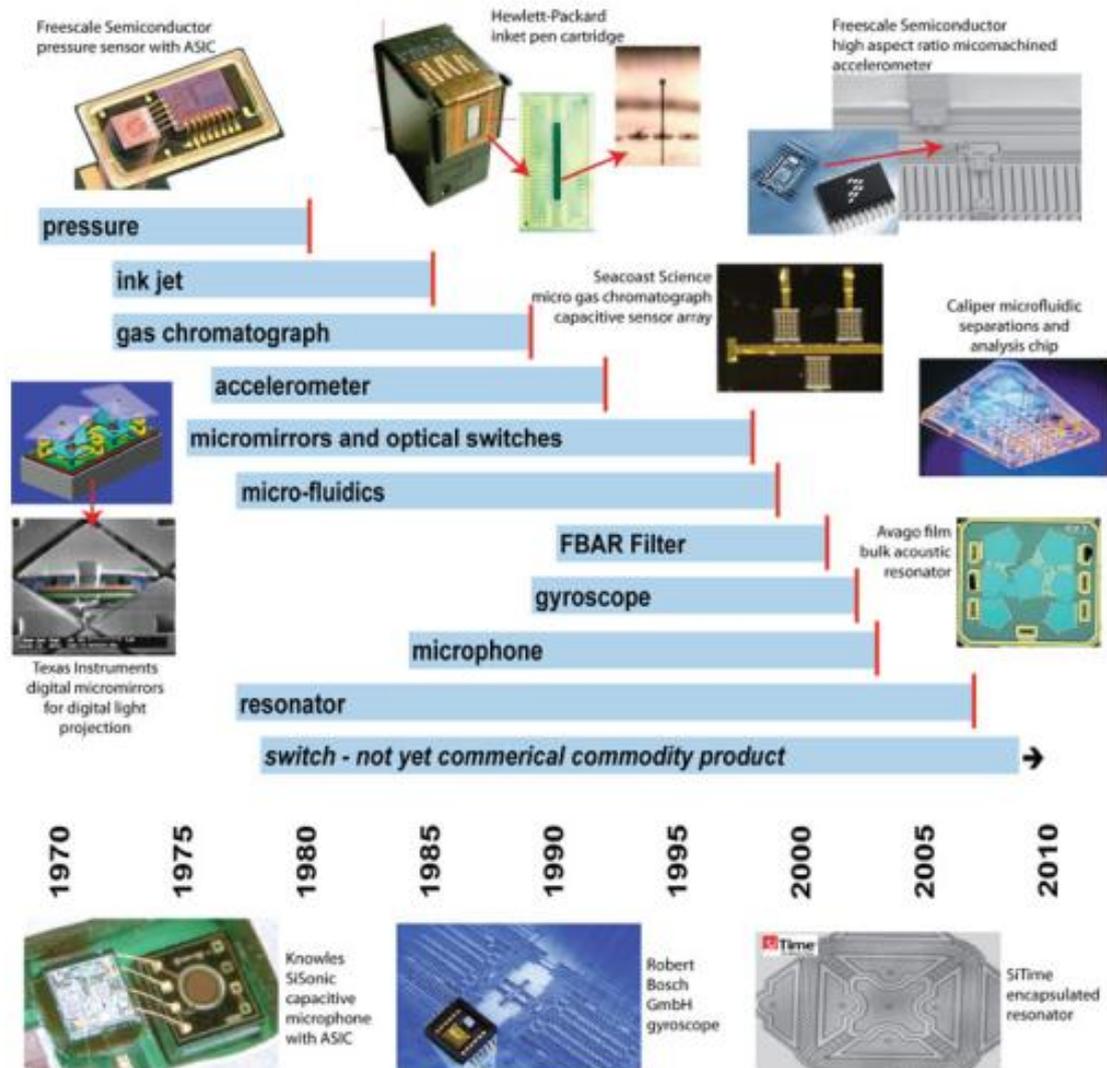


Figure I.4 : Chronologie des cycles de recherche et développement de plusieurs produits MEMS [15].

Les microsystèmes ont été fabriqués grâce aux progrès des différentes méthodes de fabrication des circuits intégrés, mais aussi grâce aux propriétés des matériaux utilisés en microélectronique. Le premier important problème dans la fabrication des capteurs est le choix des matériaux. Différents types de matériau ont été utilisés pour la réalisation de capteurs de pression. Cependant le silicium reste le matériau le plus utilisé dans le cadre de la fabrication des capteurs, grâce à ses propriétés physiques, mécaniques et électriques par rapport à d'autres matériaux.

Au cours des dernières décennies, le silicium et ses composés (SiO_2 , Si_3N_4 ,... etc.) ont permis d'innover et explorer de nouveaux domaines d'application s'étendant au-delà de la fabrication des circuits intégrés.

Avec les exigences croissantes en matière de stabilité, de miniaturisation et d'intégration des MEMS, de nouveaux matériaux, tels que les semi-conducteurs à grande bande interdite attirent plus d'attention [16].

Le tableau I.1 donne un aperçu des matériaux fonctionnels utilisés dans les MEMS. Ces trois principales classes de matériaux sont utilisées pour structurer la plupart des dispositifs MEMS à l'aide de techniques de fabrication de base telles que le dépôt, la photolithographie et la gravure.

Catégorie fonctionnelle	Type de matériel	Exemple
Substrat	Semi-conducteur	Si, GaAs, InP, SiC
	Céramique	MgO, alumine, saphir
	Plastique	Plexiglas
	Verre	-
films mince	Diélectrique	SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , PMMA
	Métal	Al, Au, Ag, Pd, Pt, Cu, Ti ; alliages
	Matériaux céramiques	PZT, STO, BST
	Semi-conducteur	Si, SiC, Polysilicium
Emballages	Plastique	-
	Céramique	Alumine, oxyde de béryllium
	Métal	Kovar, cuivre, molybdène

Tableau I.1 : Matériaux fonctionnels utilisés dans les MEMS[17, 18].

I.4. De la microélectronique à la technologie CMOS-MEMS

Les circuits intégrés sont des circuits électroniques présentant la particularité de rassembler sur un morceau de silicium la totalité des composants nécessaires. Ces composants sont des transistors, MOSFET et bipolaires mais aussi des composants passifs comme les résistances, les inductances et les condensateurs. N'oublions pas les fils d'interconnexions qui jouent un rôle majeur dans la technologie micro-électronique [19].

Le MOSFET a fini par dominer le monde de l'électronique, et l'architecture CMOS (combinaison de MOSFET de type p et n) est devenue le moteur de cette industrie. Année après année, les dispositifs CMOS sont plus petits et plus rapides, les industriels recherchant constamment de nouvelles méthodes pour en diminuer les dimensions afin d'en augmenter la densité d'intégration. La célèbre loi de Moore, prévoyant que le nombre de transistors des microprocesseurs est doublé tous les 18 mois, est souvent utilisée pour décrire ce phénomène[20].

Aujourd'hui, la technologie CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) n'est plus seulement utilisée pour la fabrication de circuits intégrés, mais aussi pour fabriquer des microsystèmes bénéficiant ainsi des progrès accomplis dans les procédés de fabrication et de la capacité [21].

La technologie CMOS-MEMS permettant de fabriquer des structures MEMS à partir d'un procédé CMOS standard de la microélectronique. Il est donc devenu possible d'intégrer capteurs et/ou actionneurs MEMS et l'électronique associée sur une même puce ou un même boîtier, on parle alors :

- **D'intégration monolithique** : les microsystèmes et leur électronique sont intégrés sur une même puce ;
- **D'intégration hybride** : les microsystèmes et l'électronique associée sont intégrés dans un même boîtier contenant une puce « composants microsystèmes » et une autre dédiée aux circuits électroniques.

L'intégration de fonctions analogiques dans des technologies spécialisées basées sur CMOS permet des solutions systèmes optimisées en termes de coûts et à valeur ajoutée. Ces technologies diversifiées sont connues sous le nom de « More than Moore ».

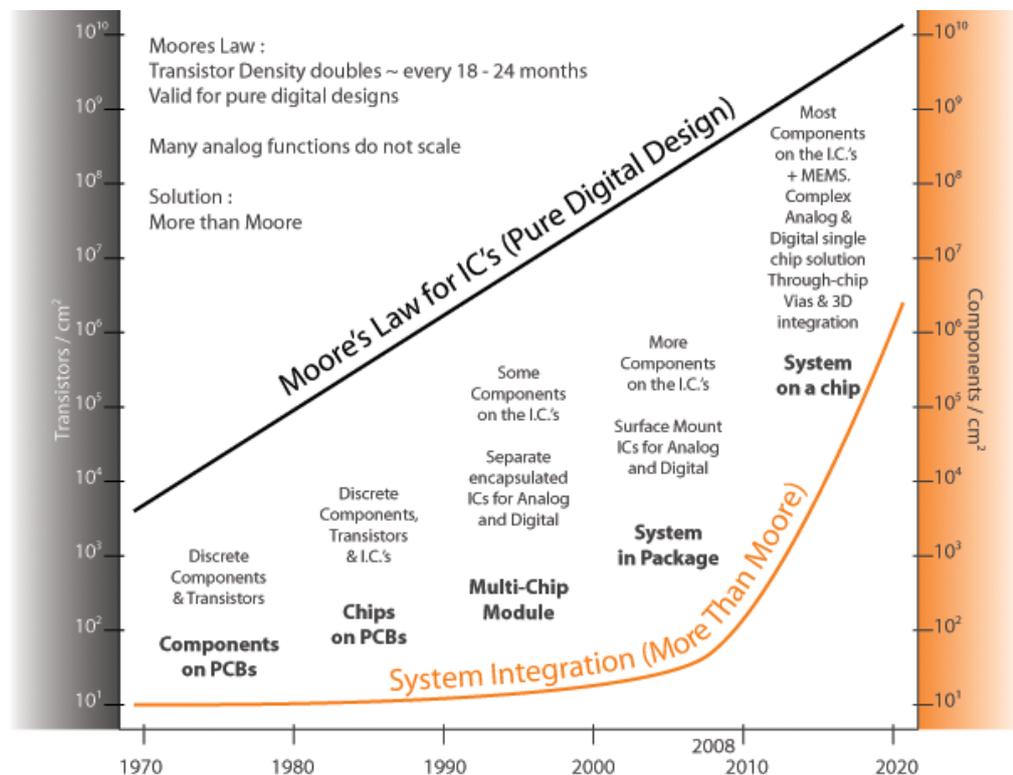


Figure I.5 : Densité en transistors ou composants en fonction de l'année. Le graphique représente la feuille de route de l'industrie des semi-conducteurs, le développement des capteurs intégrés s'inscrivant dans la stratégie du « More than Moore » [22].

I.5. Motivation

Grâce à la progression de la technologie microélectronique et l'utilisation des microsystèmes (MEMS) les capteurs de pression ont connu une révolution technologique impressionnante. Parmi les premières applications industrielles de la technologie MEMS on peut citer la production commerciale de capteurs de pression.

Les capteurs de pression interviennent dans de nombreux domaines tels que l'automobile, la météorologie, le génie médical, et la domotique. Une recherche approfondie dans le domaine de conception et réalisation des capteurs de pression traite de nombreux paramètres qui influent sur le bon fonctionnement de ces dispositifs, beaucoup de tentatives d'améliorations ont été consacré pour aboutir à de meilleures conditions permettant le fonctionnement idéal des capteurs de pression.

Précédemment, pour répondre à la problématique de réaliser des micros capteurs de pression de très haute performance, de grande sensibilité, de bonne linéarité et d'une faible dérive thermique, nous avons réalisé l'étude du comportement thermomécanique du capteur de pression au silicium pour les deux types de détections capacitive et piézorésistive.

Nous avons ainsi, établi un modèle numérique par la méthode des éléments finis sous environnement COMSOL Multiphysics, permettant de déterminer la déflexion maximale ainsi que les contraintes normales aux milieux des bords de la membrane en fonction de la pression. De même, nous avons aussi étudié l'effet des configurations des jauges piézorésistive sur la tension de sortie du capteur de pression piézorésistif. Les résultats ont montré que l'élévation de la température provoque des altérations considérables dans la réponse du microcapteurs, ce qui nous a incités à étudier ce phénomène causé par le chauffage interne dans la piézorésistance [23].

Dans d'autres travaux [24], nous avons établi un modèle pour l'étude du comportement thermique des microcapteurs de pression capacitive, sous environnement COMSOL Multiphysics. Ce modèle prend en considération l'ensemble de la structure et les effets thermiques ainsi que les effets des paramètres géométriques.

L'effort en recherche et développement porte maintenant sur la miniaturisation et l'autonomie énergétique des capteurs dans tous les domaines d'applications. Une voie qui offre les avantages de la miniaturisation et de la réduction des coûts, avantages à l'origine de la banalisation de ces composants dans des produits grand public de masse.

Les capteurs à semi-conducteurs sont la meilleure approche à cette demande de miniaturisation ; les chercheurs essayent de mettre au point des systèmes autonomes appelés MEMS et NEMS qui intègrent sur la même puce le capteur et son électronique associée.

La faisabilité d'un tel pré-procédé CMOS-MEMS a été démontrée par la fabrication d'un capteur de pression intégré avec leurs interfaces électroniques [25-28]. Dans cette optique les chercheurs ont tenté d'utiliser les effets de la pression supplémentaire sur la capacité de grille, la tension de seuil, la mobilité des porteurs dans le canal, pour concevoir et fabriquer des capteurs de pression à base d'un transistor MOSFET.

Le capteur de pression à effet de champ PSFET présente certains avantages importants, tels que la compatibilité totale avec la technologie CMOS, l'implication de moins de circuits de conditionnement pour extraire le signal de sortie du capteur. Le processus de fabrication de ces capteurs nécessite un environnement spécifique qu'on appelle salle blanche. Malheureusement notre laboratoire ne dispose pas encore de cette structure. De ce fait nous ne pouvons aborder une fabrication sans les moyens technologiques adéquats. Alors nous avons eu recours à la simulation et la modélisation de ces dispositifs sous environnement COMSOL multiphysics.

La simulation numérique des procédés de fabrication prend aujourd'hui une place de plus en plus importante dans l'industrie. Les objectifs sont, entre autres de limiter les coûts de production en remplaçant les campagnes d'essais traditionnelles par des simulations numériques réalistes et prédictives ; d'améliorer la qualité des produits réalisés en définissant les jeux de paramètres optimaux pour le procédé ; de mieux comprendre les causes des différents phénomènes thermomécaniques mis en jeu afin de mieux maîtriser le process. La simulation numérique permet d'avoir accès directement aux différents champs de variables, accessibles ou non à la mesure, en tout point de la matière.

Dans le cadre de ce travail, nos travaux de recherche sont consacrés à l'étude de capteur de pression PFET avec électronique associée ou encore PSFET pour diverses applications.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres dont les deux premiers sont introductifs. Le premier est l'objet d'un recueil de définition et de notion sur les capteurs et notamment les capteurs de pression et leur évolution. Quant au second il constitue un état de l'art sur les capteurs de pression MEMS ainsi que sur les technologies MEMS compatibles avec les procédés CMOS standard pour donner des solutions performantes et moins coûteuses à la réalisation des capteurs à semi-conducteurs qui sont très utilisés dans divers domaines de l'industrie.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des capteurs de pression à effet de champ PSFET avec les trois approches de détection (PSFET à base de grille suspendue SG-MOSFET, PSFET à base d'effet piézorésistif et PSFET à base d'effet piézoélectrique). En explicitant leurs principales caractéristiques, leurs performances, leur technique de conception et de fabrication. Ensuite, une synthèse bibliographique sur ces capteurs décrivant l'essentiel des travaux déjà effectués dans ce domaine.

Le quatrième chapitre sera consacré à la modélisation et simulation du capteur de pression PSFET à base de grille suspendue SG-MOSFET. En premier lieu nous avons présenté la modélisation analytique de capteur, en considérant différentes formes de la membrane.

Une interface graphique a été mise en œuvre sous environnement Matlab à l'aide de l'interface GUI (Graphical User Interface) utilisant le modèle analytique. Cette interface permet de tracer les courbes de caractéristique $I(P)$ et $C(P)$ d'un PSFET et du capteur de pression capacitive respectivement.

Par la suite, nous avons établi un modèle numérique, sous environnement COMSOL Multiphysics, d'un capteur de pression PSFET à détection capacitive de forme carrée en technologie CMOS de $2\ \mu\text{m}$. Ce qui nous a permis d'une part d'examiner l'influence de certains effets sur la réponse, la sensibilité et les performances du capteur. Parmi lesquelles on peut citer :

L'effet électrostatique, l'effet de la température, l'effet du type de MOSFET, l'effet du type de matériaux, l'effet des paramètres géométrique de la membrane et de NMOS ainsi que les effets des grandeurs d'influence. Et d'une autre part de faire une étude d'optimisation de ces paramètres d'influence pour optimiser les performances du dispositif.

Dans le cinquième chapitre, nous allons étudier les performances d'un capteur de pression PSFET à base de transistor piézoélectrique, pour cela un modèle de simulation par la méthode des éléments finis sous logiciel COMSOL Multiphysics a été établi. Nous allons aborder en premier lieu les bases théoriques décrivant le principe de fonctionnement de ce type de dispositif. Par la suite, nous déterminons la capacité piézoélectrique en fonction de la pression ainsi que le courant de drain de dispositif. Le couplage entre les solveurs FEM et les simulateurs de circuits SPICE nous a permis l'extraction des diverses caractéristiques importantes du capteur. Les résultats obtenus montrent que ce capteur présente une réponse linéaire dans une gamme de hautes pressions.

Le modèle du capteur établi par SILVACO ATLAS est utilisé pour valider le comportement électrique du modèle (GUI) ainsi que le modèle de simulation FEM.

Enfin nous avons utilisé ce dispositif dans une application permettant la mesure à distance et sans fil de la surpression aérienne. Le système proposé est une simple liaison sans fil et analogique fonctionnant en modulation de fréquence. Le capteur doit être associé avec un oscillateur produisant un signal alternatif et un amplificateur permettant d'amplifier le signal de détection du capteur de pression. L'antenne est utilisée pour transmettre la tension de sortie du capteur de pression à un récepteur.

Chapitre II.

Etat de l'art : Microcapteurs de pression

II.1.Introduction

La technologie MEMS permet de fabriquer des capteurs de pression de meilleures performances grâce aux avantages suivants : la miniaturisation, la faible consommation d'énergie, le grand volume de production, le faible coût et une sensibilité élevée. Nous présentons dans ce chapitre une introduction générale sur le principe de base d'un capteur de pression MEMS (capacitif, piézorésistif et piézoélectrique).

Dans ce travail, nous nous intéressons aux capteurs de pression donc la grandeur physique à mesurer est la pression. Ce type de capteur occupe une place de première importance dans la plupart des applications industrielles modernes, et ne cesse d'évoluer et de dominer le marché des capteurs par leur grande variété et par leur facilité de mise en œuvre.

II.2. Généralités sur les capteurs de pression

II.2.1. Description des microcapteurs de pression

La pression est le phénomène physique le plus mesuré dans l'industrie où la plupart des applications industrielles modernes nécessitent un suivi strict de la pression dans la chaîne de fabrication ou dans la chaîne de contrôle. Avec cette exigence, la mesure de cette grandeur physique devient un problème critique et cela peut être fait à l'aide d'un capteur de pression. Ce dispositif est capable d'associer à la grandeur mesurée, un signal électrique reconnaissable appelé « réponse » [29].

De manière générale un capteur de pression est constitué de deux ou trois parties : le corps d'épreuve, le transducteur électrique et éventuellement un circuit électronique de traitement [30]. Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui est soumis à l'action du mesurant le transforme en une grandeur physique mesurable (la déformation). Le transducteur transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, généralement de forme électrique. Le circuit électronique de traitement, éventuellement le circuit conditionneur permet de traiter le signal de sortie et de le mettre sous forme d'un signal électrique transportant l'information donnée par le transducteur.

En général, les capteurs de pression sont des dispositifs à membrane dont le principe est décrit par la figure II.1.

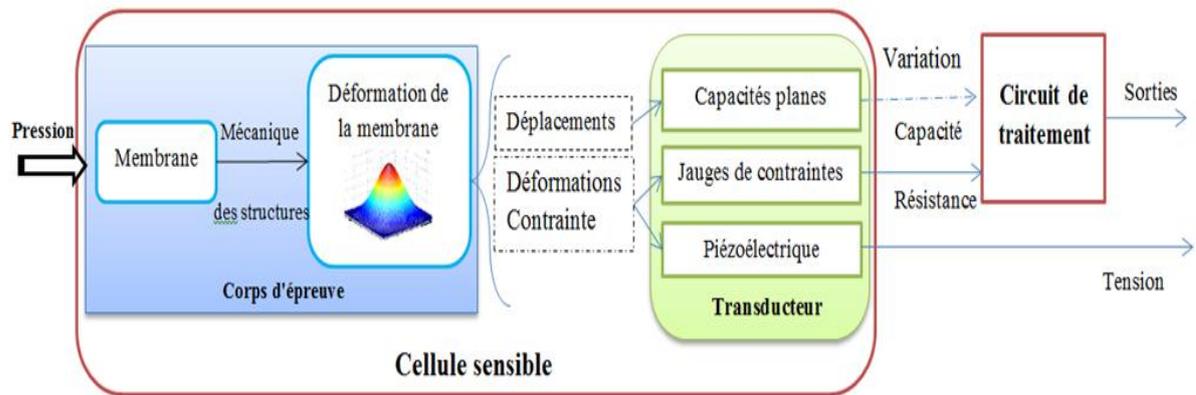


Figure II.1 : Principe d'un capteur de pression à membrane.

Lorsqu'une membrane est soumise à une pression, elle se déforme :

- Si la membrane est une électrode mobile d'un condensateur plan, dont la variation de la capacité est fonction de la pression exercée [31] ;
- Si des jauges de contraintes sont placées sur la membrane, leurs résistances varient en fonction de la pression appliquée[32] ;
- Si la membrane est un film mince piézoélectrique, le matériau piézoélectrique assure la transformation de cette déformation en variation de la tension [33].

Le capteur de pression peut être classé selon le principe de détection des cellules sensibles utilisé. Cela comprend le capteur de pression dit : capacitif, piézorésistif et piézoélectrique. D'autres principes sont parfois utilisés pour convertir la pression en quantité exploitable par un circuit électronique : capteur de pression optique[34, 35], capteur de pression résonants[36, 37], capteur de pression à ondes de surface (SAW) [38, 39], capteur de pression à semi-conducteurs[40, 41] ...etc.

II.2.2. Les principales caractéristiques des microcapteurs de pression

Chaque micro capteur de pression présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces caractéristiques sont l'étendue de mesure, la sensibilité à la pression, la linéarité, la sensibilité à la température. Ces caractéristiques dépendent de la géométrie du capteur, des propriétés mécaniques et thermiques des matériaux utilisés, du packaging et du principe de détection [42].

a) L'étendue de mesure (E.M) :

L'étendue de mesure est un paramètre essentiel dans la conception d'un micro capteur de pression. Elle est la plage de variation de la grandeur mesurée (pression) pour laquelle le

dispositif répond aux spécifications. En d'autres termes c'est le domaine du mesurande pour lequel le fabricant peut garantir la mesure.

b) Sensibilité à la pression :

La sensibilité d'un micro capteur de pression représente le rapport de la variation du signal de sortie à la pression appliquée. Elle reflète ses avantages et ses performances directement. La sensibilité S est exprimée par [42, 43] :

$$S = \frac{1}{\theta} \frac{\Delta \theta}{\Delta P} \quad (\text{II.1})$$

Où θ est le signal de sortie et P la pression appliquée

c) Sensibilité à la température

La sensibilité à la température d'un capteur de pression est un paramètre de performance important. La sensibilité à la température est définie par le coefficient de température de sensibilité (TCS), exprimé en partie par million par degré Celsius (ppm/°C), et elle est donnée par [42] :

$$\text{TCS} = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} \quad (\text{II.2})$$

Où S est la sensibilité à pression et T la température. Un autre paramètre important est le coefficient de température de l'offset (TCO) défini comme [44] :

$$\text{TCO} = \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial T} \quad (\text{II.3})$$

d) Linéarité ou non-linéarité

Un capteur est dit linéaire s'il présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi. Dans la plage de linéarité du capteur, le signal électrique est proportionnel à la variation de l'élément sensible [2]. La non-linéarité est utilisée pour décrire la relation non linéaire entre l'entrée et la sortie, et caractérise la proximité entre la droite spécifique et la courbe d'étalonnage du capteur.

II.3. Les différents types de capteurs de pression

Il existe de nombreux types de capteurs de pression étant mis en œuvre aujourd'hui. Ils peuvent être classés en fonction de leurs types de mesures telles que pression absolue et

pression différentielle ou de leur principe de détection telle que piézorésistif, piézoélectrique et capacitif [29].

II.3.1. Classification selon la pression de référence

Selon la pression de référence (figure II.2), il existe trois grands types de capteurs de pression : les capteurs de pression absolue, relative ou différentielle.

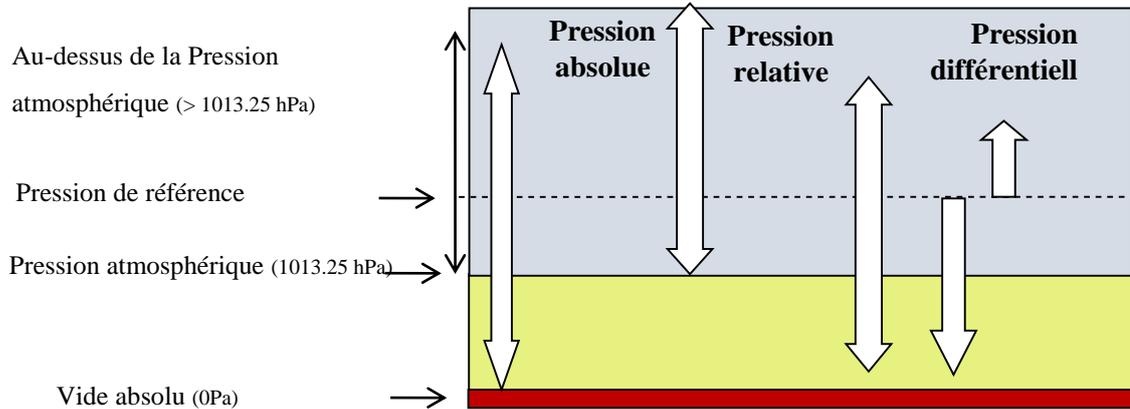


Figure II.2 : Divers types de mesure de la pression [45].

a) Capteur de pression absolue :

Les capteurs de pression absolue mesurent la pression par rapport à une référence de vide scellé dans le capteur, comme illustré à la figure II.3 (a). Ces dispositifs sont utilisés pour mesurer la pression atmosphérique et notamment, la détection de la pression d'air dans l'admission du véhicule comme le capteur de pression absolue de l'admission [46].

b) Capteurs de pression relative :

Pour la mesure de pression relative, c'est la pression atmosphérique ambiante qui constitue la référence (figure II.3 (b)). Ce type de capteur de pression a une large gamme d'application, par exemple : mesure de tension artérielle, mesure la pression intraoculaire, contrôler la pression des pneus. Cependant, le capteur de pression relative ne convient que pour des applications non critiques à cause de la variation de la pression atmosphérique de référence en fonction de l'altitude [29, 47].

c) Capteurs de pression différentielle :

Le capteur de pression différentielle mesure avec précision une différence ΔP entre deux pressions P_1 et P_2 , qui sont la pression appliquée et la pression de référence à travers le

diaphragme comme illustré à la figure II.3 (c). Il est très approprié pour des applications dans l'industrie. Par exemple, le capteur de pression différentiel est un élément de plus du système antipollution qu'incorporent les moteurs diesel pour respecter la réglementation européenne sur les émissions polluantes [29, 46].

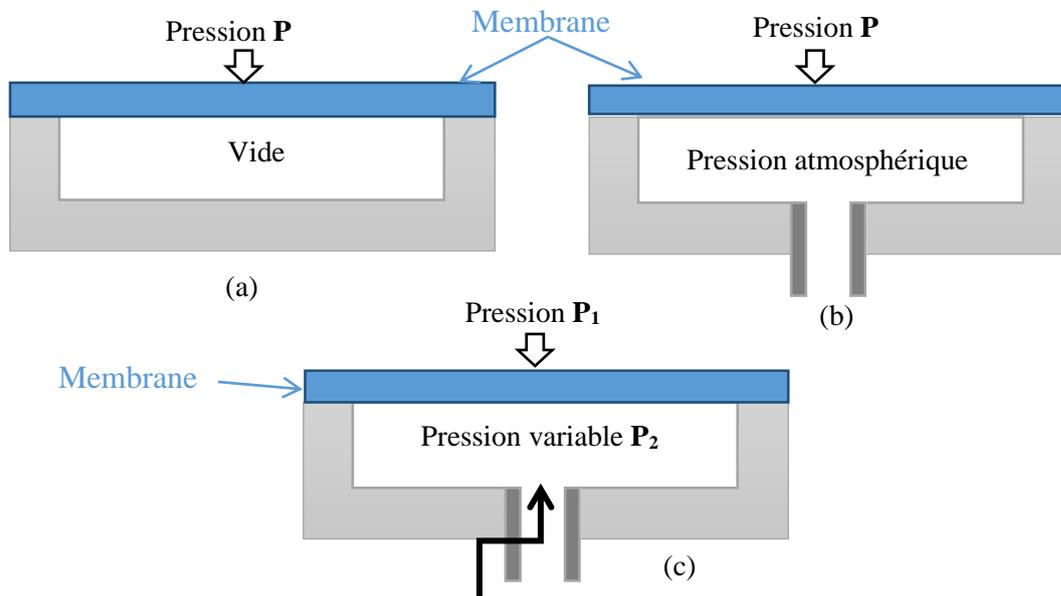


Figure II.3 : Schémas d'un capteur de pression a) absolue, b) relative, c) différentiel [48].

II.3.2. Classification selon le principe de détection

Les capteurs de pression peuvent aussi être classés selon le principe de détection des cellules sensibles utilisé. Il existe différents types, mais les plus couramment utilisés sont les capteurs de pression piézorésistifs, capacitifs et piézoélectriques.

a) Capteur de pression piézorésistif

Depuis 1954, où l'effet piézorésistif a été découvert dans 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 micro technologies, une nouvelle famille de capteurs de pression piézorésistifs miniatures s'est ainsi progressivement imposée pour de nombreuses applications [49].

La détection de la pression d'un capteur de pression piézorésistif se fait par la mesure d'une variation de résistance à la déformation de la membrane due à la pression appliquée. Des jauges piézorésistives implantées en surface du corps d'épreuve (membrane), connectées en pont de Wheatstone, forment un conditionneur passif. Ces jauges transforment la déformation

en une variation de résistance, le pont de Wheatstone permet de traduire cette variation de résistance en tension électrique (Figure II.4).

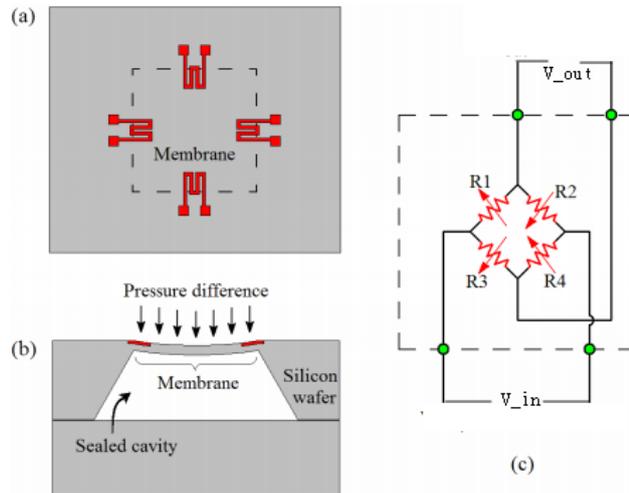


Figure II.4 : Schéma d'un capteur de pression piézorésistif

a) vue de dessus, b) vue de côté,

c) des jauges de contrainte piézorésistives connectées en pont de Wheatstone [50].

Les avantages de ce type de capteurs sont : bonne précision, faible non-linéarité, électronique associée simple, cependant, ces dispositifs sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique, ce qui élève considérablement leur prix de revient unitaire [51]. Il est à noter que leur sensibilité à la pression dépend des dimensions de la membrane, la position des différentes jauges sur le corps d'épreuve et leur orientation par rapport à la structure cristalline [52].

b) Capteur de pression capacitif

En 1980, Sander a fabriqué le premier capteur de pression capacitif par la technologie de micro-usinage d'une longueur de 3 mm et d'une hauteur de 425 μm [53]. De manière générale un capteur de pression capacitif est composé d'une membrane micro usinée au silicium, constituant l'armature mobile et d'un substrat isolant représentant l'électrode fixe (figure II.5 (a)). Leur principe repose sur la variation de sa capacité en fonction de la pression appliquée. Il transforme les déformations élastiques de la membrane en un signal électrique [54].

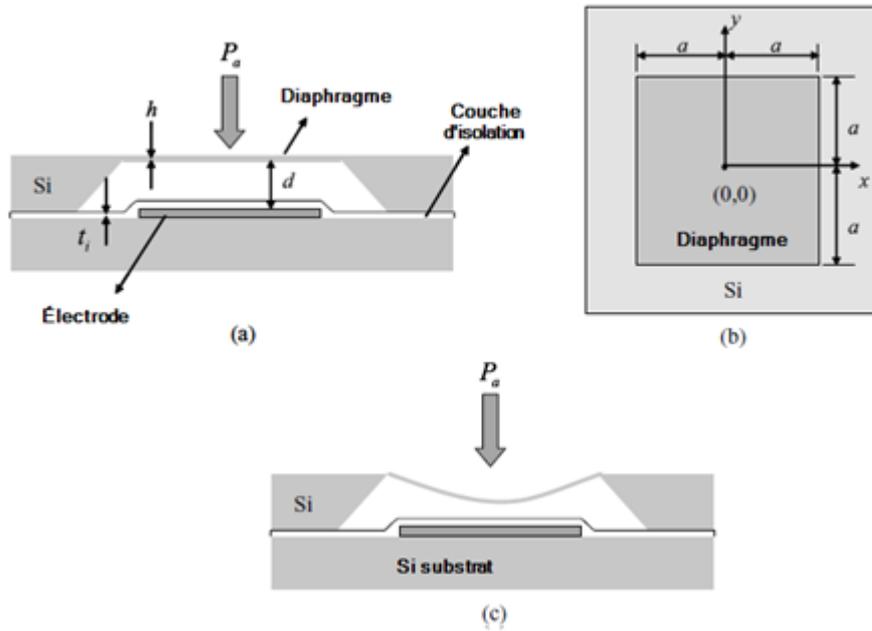


Figure II.5 : Schémas de principe du capteur de pression capacitif a) vue en coupe, b) vue de dessus, c) fonctionnement en mode normal [55].

Le mode particulier du capteur de pression capacitif est le «touch mode», ou la membrane, considérée comme électrode supérieure, vient au contact du fond de la cavité de détection recouvert d'une couche d'isolant. Le substrat joue le rôle d'électrode inférieure. Quand la pression augmente, la surface en contact augmente aussi. La capacité du capteur garde donc un comportement linéaire en pression comme décrit en Figure II.6 [56, 57].

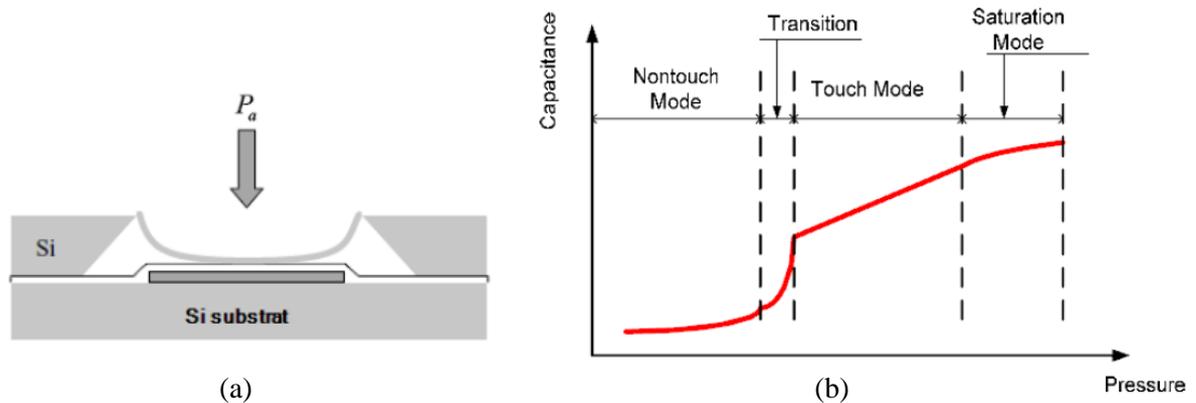


Figure II.6 : Capteur de pression capacitif en touche mode [55, 56].

Ces capteurs sont caractérisés par une haute sensibilité à la pression, faible consommation d'énergie et une remarquable baisse de sensibilité à la température. Ils peuvent fonctionner dans des gammes de température assez élevée et presque sans hystérésis [31]. Les inconvénients de ce type est la réponse non linéaire en mode classique, faible capacité généralement en pF et l'influence des capacités parasites sur le comportement du capteur, ce qui complique un peu

leur circuit électronique de traitement de signal, ainsi que ses limitations de l'utilisation souvent dans le cas des faibles pressions [58].

c) Capteur de pression piézoélectrique

Un corps piézoélectrique est un corps ayant la propriété de présenter un potentiel à ses bornes lorsqu'il est soumis à une contrainte, et réciproquement. Les capteurs de pression piézoélectriques actuels utilisent l'effet piézoélectrique direct. Ils sont robustes et bien intégrés dans un dispositif, les matériaux utilisés sont le plus souvent le quartz ou le ZnO (oxyde de Zinc) ou le PZT (Piezoelectric lead Zirconate Titanate) [59, 60].

Un capteur de pression en PZT est illustré sur la figure II.7. L'application d'une pression sur la membrane PZT permet de la déformer. Le matériau piézoélectrique assure la transformation de cette déformation en variation de tension [60]. Le deuxième exemple est le capteur de pression en quartz (figure II.8). Une cavité oscillante en quartz est soumise à une contrainte de pression hydrostatique. Cette cavité est excitée à sa fréquence de résonance via une paire d'électrodes situées de part et d'autre de l'oscillateur [61].

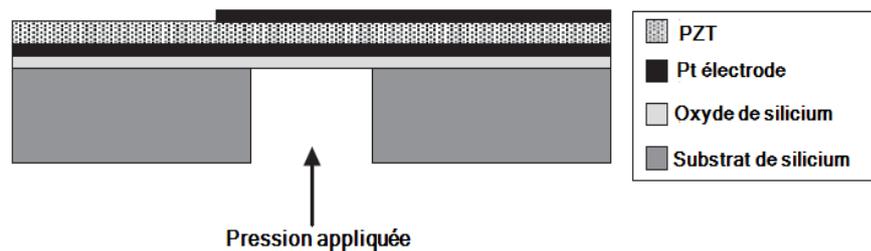


Figure II.7 : Capteur de pression en PZT [60].

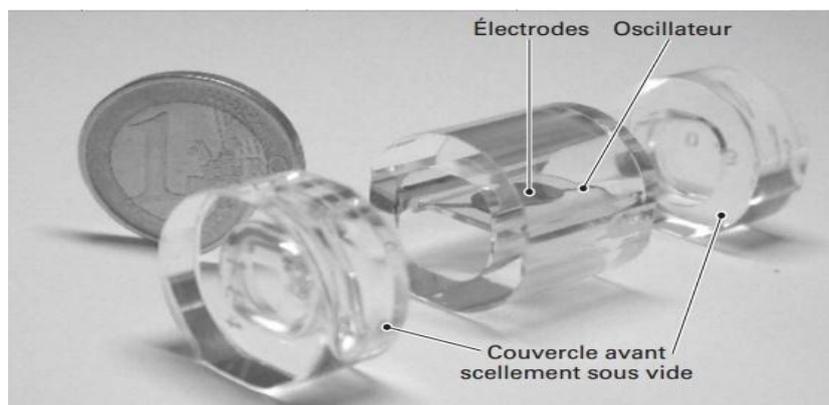


Figure II.8 : Capteur de pression en quartz [61].

Les avantages du capteur de pression piézoélectrique sont : transduction à puissance consommée nulle (les variations de contraintes produisant un potentiel), très sensible,

construction robuste, petite taille, grande plage dynamique, l'absence d'électronique interne au capteur permet d'utiliser ce dernier à haute température. Cependant, la conception de l'interface électronique de conditionneur est plus complexe que les autres types de capteurs. Les capteurs de pression piézoélectrique des amplificateurs de charge, des amplificateurs spéciaux à haute impédance d'entrée capable de mesurer les très petites charges (exprimées en pC ou 10^{-12} Coulombs)[51, 62].

II.4. Conditionneur associé

La plupart des dispositifs ne sont aptes à traiter le signal électrique que sous la forme de tension. Le rôle du conditionneur est donc de convertir, lorsqu'elle n'est pas une tension, la grandeur électrique de sortie du capteur, ou ses variations par rapport à un état d'origine, en une tension dont l'amplitude ou (et) la fréquence sont déterminées par la sortie du capteur. Certains conditionneurs offrent la possibilité supplémentaire d'effectuer des corrections sur le signal qu'ils délivrent : compensation des grandeurs d'influence, linéarisation, etc...[63].

II.4.1. Conditionneur de capteurs de pression piézorésistive.

Le circuit de conditionnement pour un capteur de pression piézorésistif comprend les blocs suivants : un circuit de polarisation, l'étage de compensation des dérives thermiques, l'amplification du signal de sortie et, dans le cas où une sortie numérique est requise, un convertisseur analogique numérique[64].

a) Conditionnement en pont de Wheatstone

L'inconvénient majeur des jauges de contraintes est la forte dérive thermique de la résistivité (de 300 à 500 ppm/°C, pour les dopages utilisés) qui peut être du même ordre de grandeur que l'amplitude de la réponse en pression (environ quelques pour cent). C'est pourquoi les capteurs à jauges de contraintes sont le plus souvent réalisés avec quatre résistances montées en pont de Wheatstone afin de rejeter le mode commun (cf. figure II.4(c))[30, 65].

Une des techniques utilisées pour rendre le capteur de pression robuste est de disposer de deux ponts piézorésistifs similaires (double pont de Wheatstone), un à l'intérieur et un autre à l'extérieur de la membrane. La partie interne mesure l'effet de la pression et de la température, tandis que la partie externe mesure l'effet de la température uniquement. La différence entre les

sorties de ces deux ponts nous donne une bonne estimation de la sortie du capteur de pression indépendamment de la température ambiante [66].

b) Conditionneur de capteur de pression Freescale

Freescale a utilisé deux types de configuration de piézorésistance dans les capteurs de pression, le X-ducur et le cadre. La conception originale en « X- ducur » ressemble à un « X » situé au bord de la membrane de déviation de la pression (figure II.9 (a)). La conception en X-ducur présente l'avantage de réduire la distribution de décalage, attribut indésirable de certains ponts de Wheatstone. La Configuration « cadre » permettant une augmentation d'environ 40 % signal de sortie que la conception X-ducur (figure I.9 (b)) [15, 67, 68].

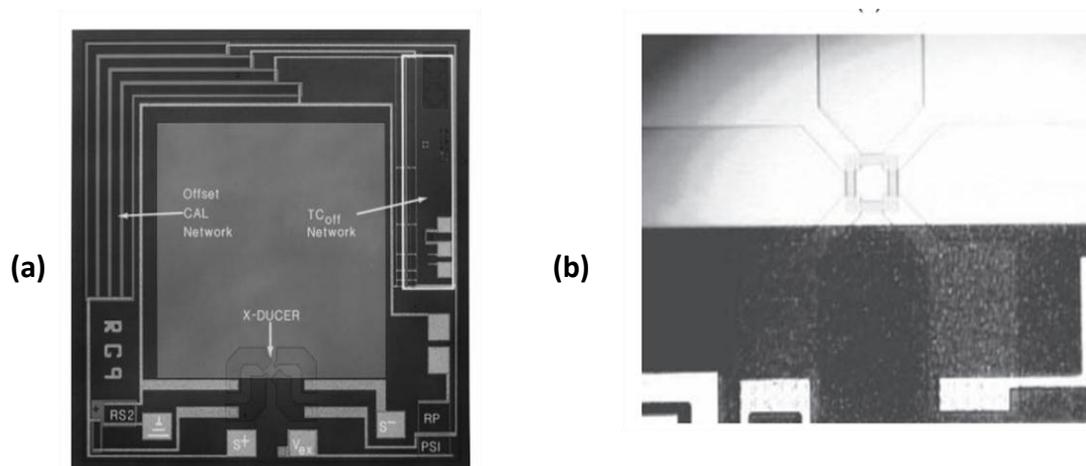


Figure I.9 :

- Photographie optique de la surface supérieure du capteur de pression « Freescale Semiconductor » utilisant la configuration « X-ducur » d'origine [12],
- Nouvelle configuration « cadre » de piézorésistances [69].

II.4.2. Conditionneur de capteurs de pression capacitif

Un capteur de pression capacitif fonctionne sur le principe de la variation de capacité en fonction de la pression appliquée. Pour mesurer ces variations de capacité, des interfaces de conditionnement électronique ont été développées afin d'obtenir un signal électrique exploitable telles qu'une tension, un courant, une fréquence ou directement une sortie numérique.

a) Convertisseur capacité-fréquence ou tension

Il y a plusieurs types de circuits de convertisseur capacité-fréquence ou tension reliée au capteur de pression capacitif dans le but de mesurer sa capacité. Par exemple l'utilisation du circuit de la figure II.10, comme un multivibrateur astable, permet de convertir directement les variations de la capacité due à la pression appliquée en fréquence [51].

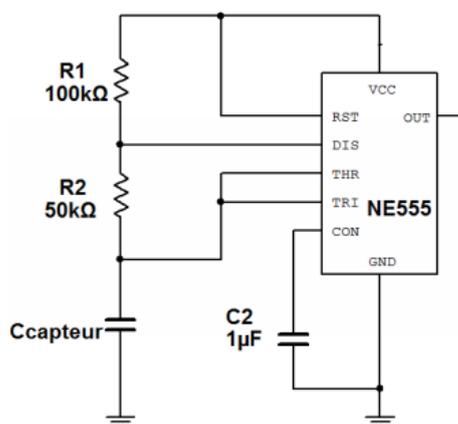


Figure II.10 : Schéma électrique de circuit convertisseur astable [51].

L'utilisation des amplificateurs opérationnels comme illustrés à la figure II.11 permettant de convertir directement les variations de la capacité due à la pression appliquée en tension.

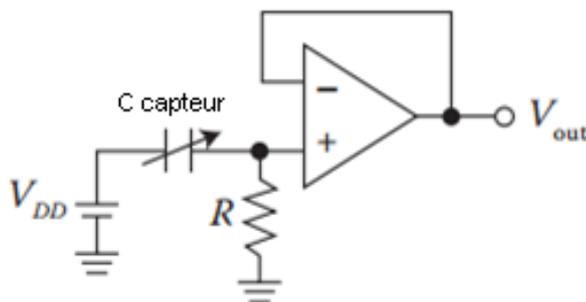


Figure II.11 : Circuit de conversion capacité-tension [70].

b) Linéarisation

L'utilisation des amplificateurs opérationnels permettant d'éliminer la non-linéarité dans les signaux générés par les capteurs capacitifs [70]. Une autre technique de linéarisation appliquée aux capteurs de pression capacitifs est la modulation de largeur d'impulsion [33].

II.4.3. Conditionneur de capteurs de pression piézoélectrique

Le capteur de pression piézoélectrique peut être modélisé comme une source de charge. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un amplificateur de charge ou la sortie de charge du capteur piézoélectrique est convertie en une tension directement proportionnelle au moyen d'un amplificateur de charge [18, 53].

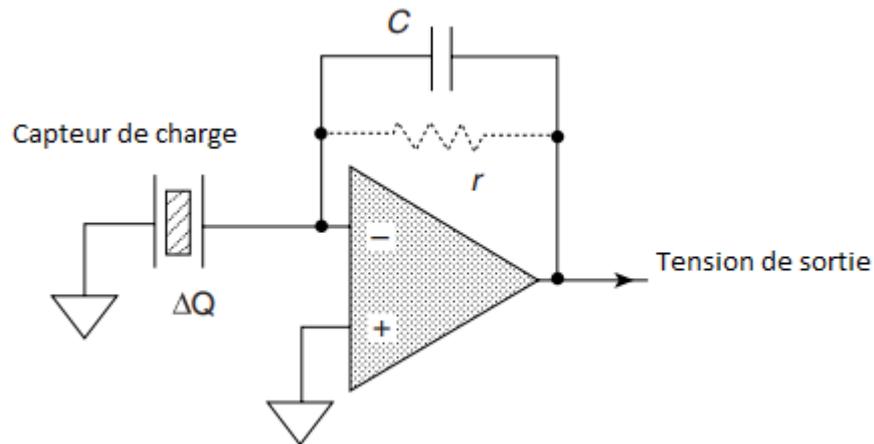


Figure II.12 : Circuit préamplificateur de charge d'un capteur de pression piézoélectrique [18].

II.5. Domaines d'application des capteurs de pression

D'après les études économiques menées par Yole [METTRE LA REFERENCE ICI], on s'aperçoit que le marché des capteurs de pression MEMS augmentera de 3,8 % par an, pour atteindre une valeur de 2 milliards US dollars en 2023. Cette augmentation est largement soutenue par leur propagation sur une grande variété d'applications telles que l'industrie automobile qui est le marché le plus ancien et le plus important des capteurs de pression MEMS [71].

À l'heure actuelle, des milliers d'applications courantes dépendent des capteurs de pression pour fonctionner correctement. Les capteurs de pression utilisent désormais une gamme extrêmement large de technologies et tirent parti d'une multitude de conceptions, ce qui permet de couvrir la majorité des applications (automobile, médicale, industrie, etc...) et une large gamme de pression (de 1 Pa à 10000 bar) comme l'illustre la figure II.13 [72].

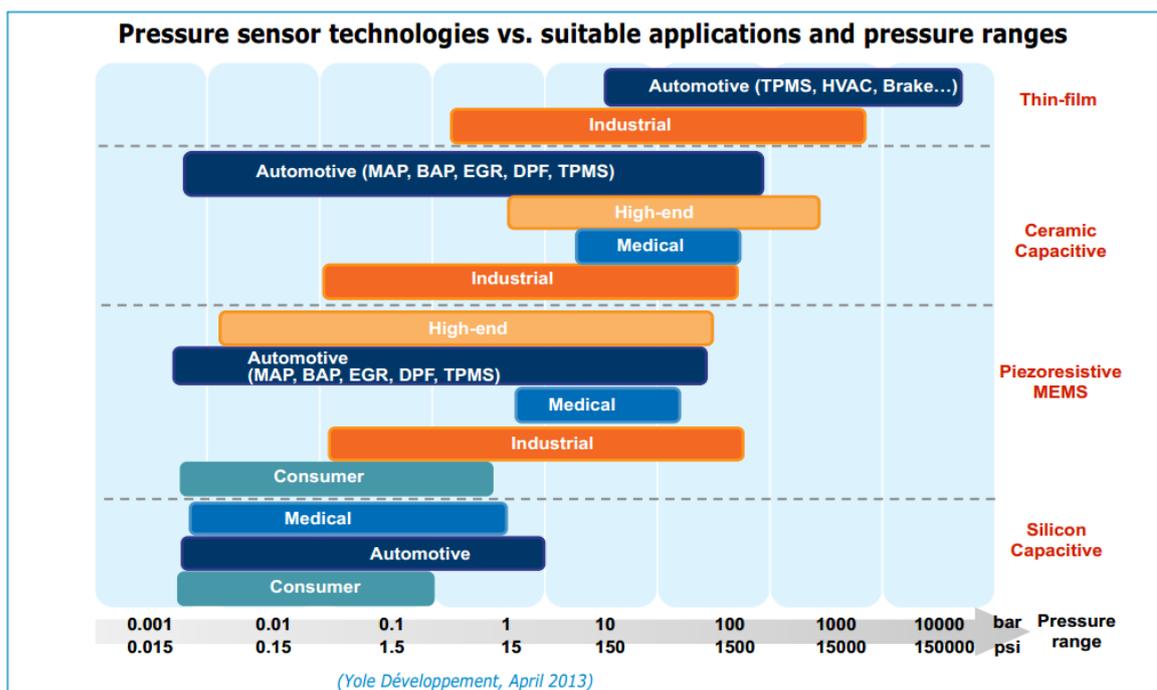


Figure II.13 : Classification des différentes technologies de capteur de pression MEMS par rapport à leur application et gamme de fonctionnement [72].

II.5.1. Applications automobiles

Dans les applications automobiles, le capteur de pression est largement utilisé dans différents systèmes de véhicules. Les applications typiques sont : le capteur de pression des pneus, appelé TPMS (Tire Pressure Monitoring System, soit système de surveillance de la pression du pneu) permet de contrôler une baisse de pression des pneus sur une voiture pendant qu'elle roule, des capteurs de pression d'huile, le système de gestion du moteur, le servofrein à dépression et la pression du fluide de transmission [73-75], comme l'illustre la figure II.14.

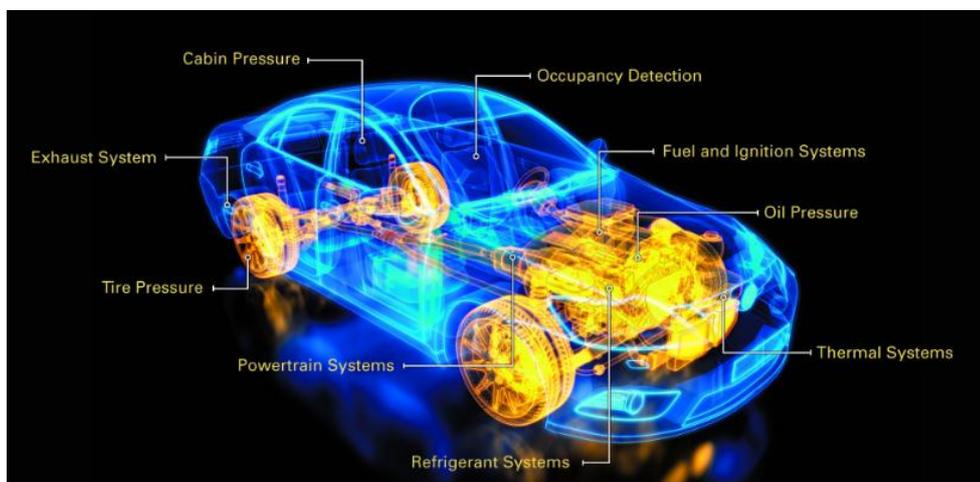


Figure II.14 : Applications automobiles du capteur de pression [76].

II.5.2. Applications médicales

Les capteurs de pression jouent un rôle important dans le domaine médical, où ces capteurs peuvent être utilisés pour mesurer la pression intracrânienne, la surveillance de la pression artérielle, la surveillance de la pression veineuse centrale, etc. comme l'illustre la figure II.15.

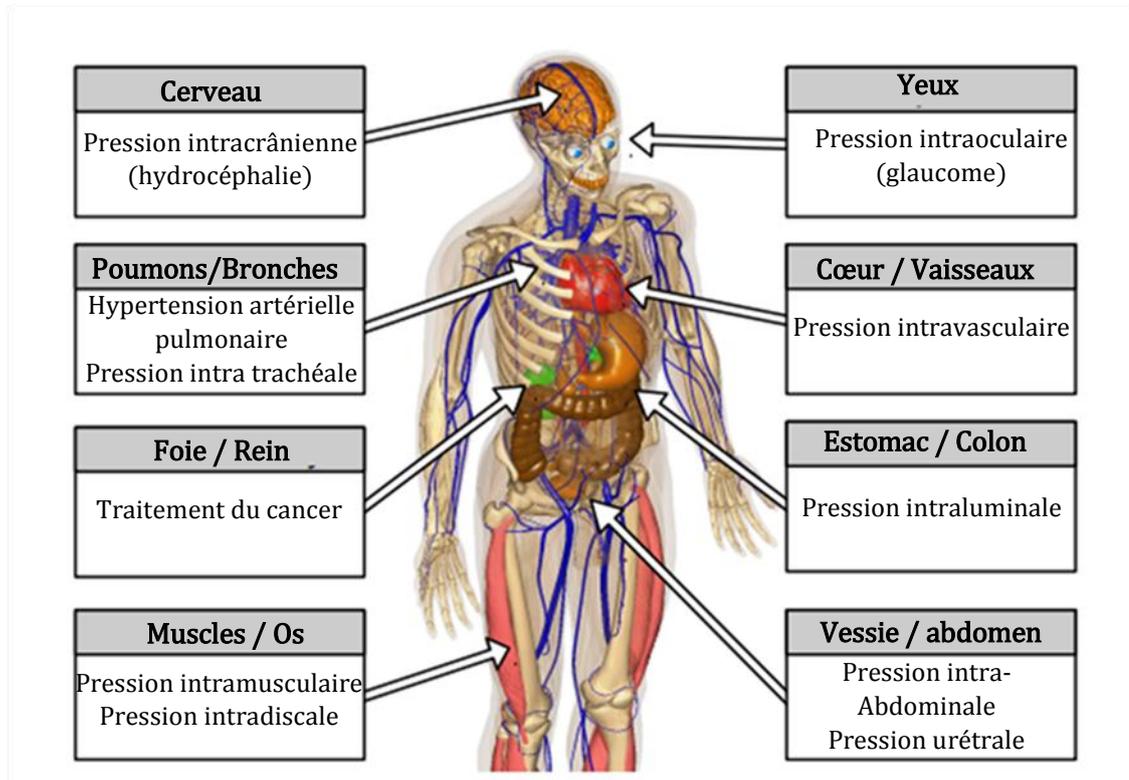


Figure II.15 : Mesure de la pression des différents organes du corps [77].

II.6. Technologies de fabrication des capteurs de pression

II.6. 1. Technologies MEMS

Il existe deux familles de technologies MEMS qui se démarquent : le micro-usinage en volume (bulk micromachining) et le micro-usinage en surface (surface micromachining). Les capteurs de pression micro-usinés sont fabriqués à l'aide de techniques de micro-usinage en volume et en surface ou d'une combinaison des deux. [66, 78-82].

a) Micro-usinage en surface

Le micro-usinage en surface est la technique de micro fabrication la plus directement dérivée de la technologie du circuit intégré [83]. Elle est basée sur l'utilisation des couches sacrificielles. Comme leur nom l'indique, ces couches sont partiellement ou entièrement

gravées par une étape de gravure sélective et isotrope. Ainsi, les couches non gravées sont suspendues formant les structures mécaniques. Contrairement au micro-usinage en volume, cette technique n'attaque pas le silicium du substrat. [5, 9]. Le principe de base du micro-usinage de surface du silicium est présenté en Figure II.16. Cette figure illustre les étapes fondamentales de fabrication qui sont le dépôt des couches, le transfert de forme et la gravure.

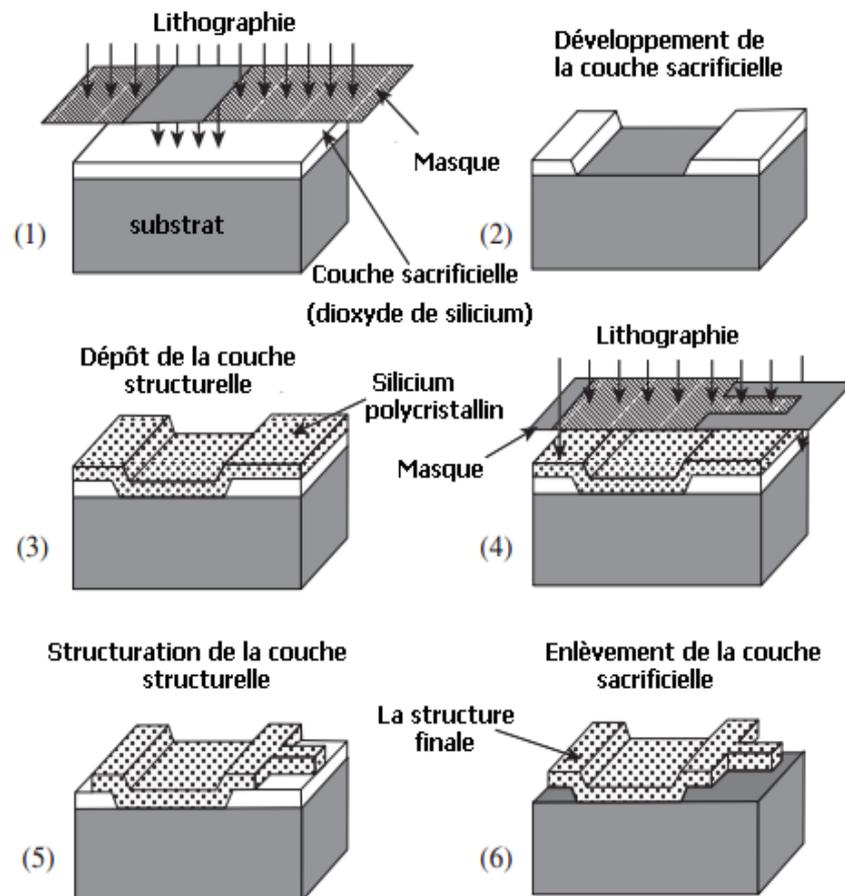


Figure II.16 : Étapes simplifiées de la technique du micro-usinage en surface [18].

Le micro-usinage en surface peut être compatible avec les procédés standards de la microélectronique si ceux-ci ont été modifiés et adaptés. Il permet d'obtenir des structures de plus petites tailles, avec la possibilité d'intégrer les circuits électroniques associés, offrant ainsi une plus grande diversité de capteurs avec de meilleures performances [9].

Ce type de procédé de fabrication permet d'obtenir exactement les dimensions des membranes utilisées dans les capteurs de pression ou ces dispositifs obtenus sont le plus souvent basés sur la détection capacitive et il permet aussi de réaliser tout type de géométrie grâce au procédé d'arrêt de gravure du silicium ou la structure obtenue est insensible aux variations de température [38, 62].

b) Micro-usinage en volume

Le micro usinage en volume est une technique permettant l'obtention de microstructures suspendues par gravure du substrat. Le terme de volume est utilisé ici puisque la gravure forme une cavité dans le volume du substrat sous les couches déposées. Cela peut se faire avec de différentes manières de gravures. Cette approche a été utilisée pour la fabrication des capteurs de pression dans le domaine de l'industrie automobile depuis les fin des années 1970/début des années 1980 [84].

Une illustration d'un processus de micro usinage en volume est présentée dans la figure II.17.

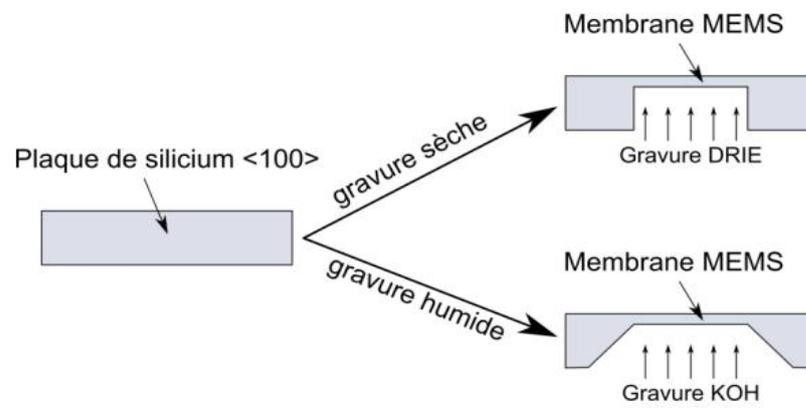


Figure II.17: Vue en coupe de la fabrication d'une membrane MEMS par micro usinage de volume [85].

II.6. 2. Technologies CMOS-MEMS

Depuis, un grand nombre de microsystèmes ont été mis au point grâce à la combinaison de la technologie CMOS et de différentes étapes de micro-usinage et/ou de dépôts de couches minces. Ces différentes étapes, nécessaires à la fabrication des MEMS sont [9] :

- Procédé CMOS traditionnel, on parle alors de « *pré-CMOS process* » ;
- Suivie du procédé CMOS, on parle cette fois de « *post-CMOS process* » ;
- Etre réalisées entre les étapes du procédé CMOS, on dira alors « *intermediate-CMOS process* » ou « *intra-CMOS process* ».

a) Pré-CMOS process

Les technologies pré-CMOS sont représentées par le processus d'intégration modulaire M³EMS (« Modular, Monolithic Micro Electro Mechanical Systems ») développée par les laboratoires SANDIA. Dans l'approche pré-CMOS, les structures MEMS sont enterrées et scellées lors des premières étapes de fabrication dédiées aux microsystèmes. Ensuite, la surface du substrat contenant les microstructures est planéarisée, servant ainsi de matériaux de départ pour le procédé CMOS à venir (figure II.18). Les principaux défis de ce processus sont la planéarisation du substrat et les interconnexions entre les structures MEMS et les circuits électroniques. Cette méthode est généralement utilisée dans les microstructures en poly silicium qui requièrent des recuits à des températures pouvant atteindre les 1100 °C, et ainsi être intégrées avec les circuits CMOS[86, 87].

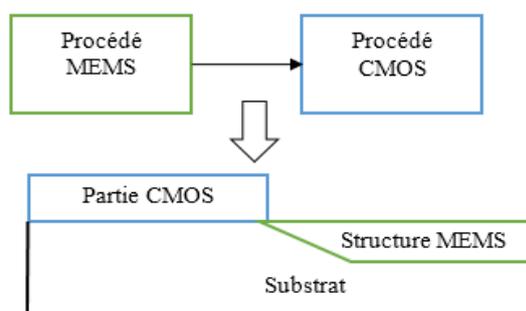


Figure II. 18 : Pré-CMOS process[45].

Parameswaran et al [67] ont utilisé la technologie pré-CMOS pour la fabrication de capteur de pression et d'accéléromètres intégrés (figure II.19). Ce procédé offre l'avantage de réaliser à la fois des capteurs de pression et des capteurs inertiels (accélération ou vitesse angulaire) ainsi que des circuits CMOS. De plus, il offre une flexibilité dans la conception des capteurs de pression, car des orifices de pression peuvent être réalisés à l'avant et à l'arrière, et des cavités de référence pour les capteurs de pression absolue peuvent être situées sous ou au-dessus du diaphragme.

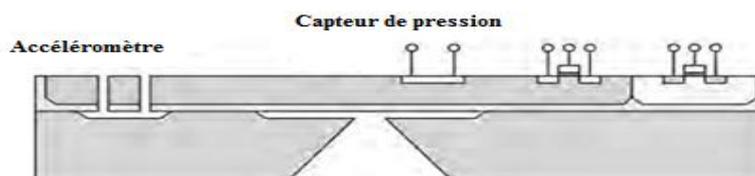


Figure II.19 : Vue en coupe d'un capteur de pression intégré à base du procédé pré-CMOS [67].

I.4.2. Post-CMOS process

L'intégration post-CMOS remonte à la fin des années 1970, lorsque la première génération de dispositifs MEMS intégrés (capteurs de pression au silicium) a été démontrée. Dans cette approche, les microstructures sont fabriquées après la finalisation du procédé CMOS (figure II.20). Le principal avantage de cette approche est que la fabrication peut être complètement externalisée, la réalisation des membranes suspendue pour les captures de pression et l'emplacement du MEMS au-dessus de la Partie CMOS, réduit la surface totale du dispositif. Cependant, cette flexibilité de fabrication est limitée par la température, puisque toutes les étapes de fabrication après le procédé CMOS ne doivent pas dépasser une température maximale d'environ 450 °C [9, 86, 88].

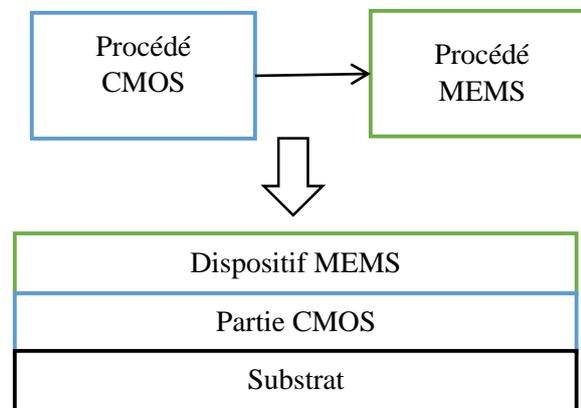


Figure II.20 :Post-CMOS process [45].

La technologie Post-CMOS a été utilisée pour la fabrication de capteur de pression capacitif intégré au circuit oscillateur sur la même puce (Figure II.21).

Ce capteur de pression nécessite un processus post-CMOS pour libérer la membrane suspendue et sceller les cavités [88].

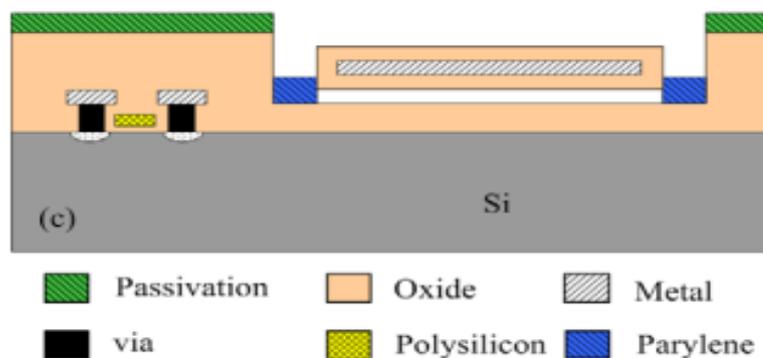


Figure II.21 : Vue en coupe d'un capteur de pression intégré à base du procédé post-CMOS process[88].

I.4.3. Intermediate-CMOS process

Le micro-usinage en intermédiaire (ou intra-CMOS) est utilisé pour intégrer des microstructures en poly silicium avec la technologie CMOS/BiCMOS. Le recuit à haute température de certains matériaux micro-structuraux, comme le polysilicium, doit être achevé avant la métallisation afin d'éviter la fusion des métaux d'interconnexion. Ainsi, l'insertion des étapes de micro-usinage des microstructures MEMS dans les étapes du processus CMOS permet d'assurer la compatibilité avec les processus de dépôt et de recuit du polysilicium. La température de recuit est généralement limitée à environ 900 °C afin de ne pas affecter le profil de dopage du procédé CMOS[89].

Tous les procédés intra-CMOS décrits jusqu'à maintenant utilisaient du polysilicium pour les microstructures et l'oxyde en tant que couche sacrificielle. Mais les laboratoires Toyota proposent une approche similaire pour fabriquer un capteur de pression où le polysilicium est la couche sacrificielle (figure II.22).

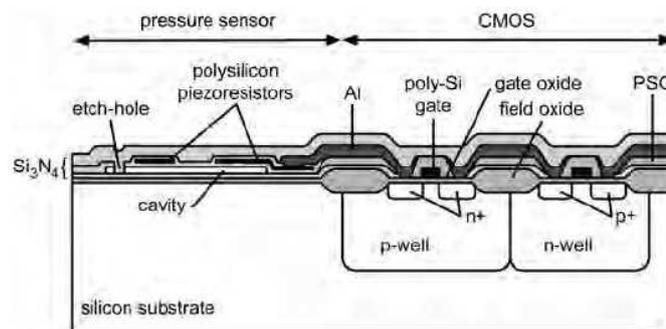


Figure II.22 : Vue en coupe du capteur de pression des laboratoires Toyota fabriqué par le procédé intra-CMOS [67].

II.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de détection d'un capteur de pression MEMS, ainsi que les différents procédés de fabrication des microsystèmes. On s'est intéressé aux technologies MEMS compatibles avec les procédés CMOS standard pour donner des solutions performantes et moins coûteuses à la réalisation des capteurs à semi-conducteurs qui sont très utilisés dans divers domaines de l'industrie.

Les capteurs qui seront étudiés dans le cadre de ce projet sont les capteurs à transistors à effet de champ pour la détection de la pression. On utilise le transistor MOS en tant que capteur de pression et le conditionneur associé en même temps. Les différentes approches de ce type de capteurs seront explicitées dans le chapitre suivant

Chapitre III.

Capteurs de pression à effet de champ PSFET

III.1. Introduction

Aujourd'hui, l'intégration des microsystèmes (MEMS) et de la technologie CMOS est largement exploitée pour la conception et le développement des capteurs intelligents. De nombreux chercheurs ont tenté d'utiliser le MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) comme circuit conditionneur pour détecter le changement de la pression et amplifier le signal en même temps. Ils ont utilisé les effets de la pression supplémentaire sur la capacité de grille, la tension de seuil, la mobilité des porteurs dans le canal, pour concevoir et fabriquer des capteurs de pression à base d'un transistor MOSFET [90].

Comparé à d'autres types de capteurs de pression (capacitif, piézoresistif et piézoélectrique), le capteur de pression à effet de champ PSFET présente certains avantages importants, tels que la compatibilité totale avec la technologie CMOS, l'implication de moins de circuits de conditionnement pour extraire le signal de sortie du capteur [91, 92]. Nous présentons dans ce qui suit les trois diverses approches de ce type du capteur de pression.

III.2. PSFET à base de grille suspendue SG-MOSFET

Dans ce contexte, des capteurs de pression ont été fabriqués avec une membrane déformable utilisée comme une grille suspendue d'un transistor MOSFET [93].

III.2.1. Description et principe de fonctionnement

La figure III.1 illustre la structure d'un capteur de pression PSFET à base SG-MOSFET, qui est constitué d'un NMOS et une membrane suspendue. La grille du NMOS est composée de la membrane suspendue et d'une cavité d'air. Les régions de la source et de drain sont obtenues par diffusion silicium (N+) au-dessus de la membrane. La membrane suspendue est réalisée par le processus post-CMOS. Typiquement, on polarise le MOSFET en inversion, et son courant de sortie est proportionnel à la pression appliquée [94, 95].

Comparés aux capteurs de pression capacitifs, ils présentent de très hautes performances et notamment un signal de sortie (tension ou courant) amplifié simultanément. De plus, la compatibilité totale de l'intégration avec la technologie CMOS des fonctionnalités pour évoluer vers un capteur intelligent. Ces capteurs présentent une haute sensibilité à la pression et un coefficient de température modéré. L'effet de la température peut être simplement compensé par la structure FET de référence. [96, 97]

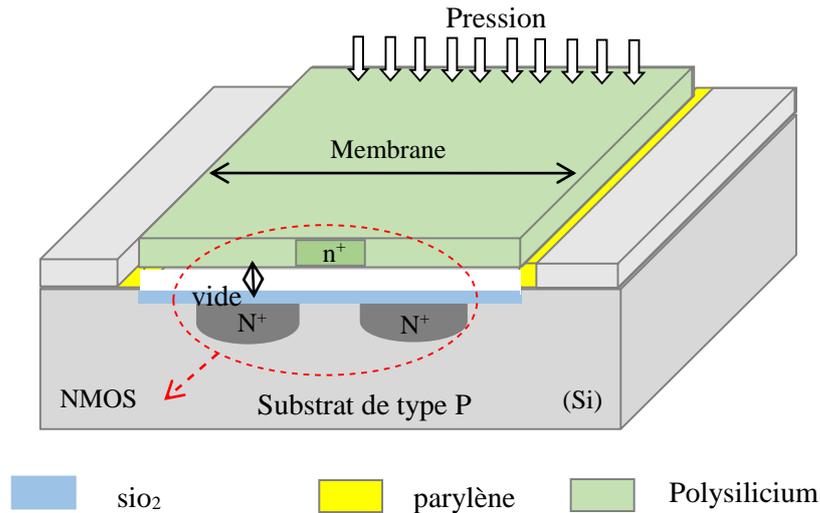


Figure III.1 : Structure d'un capteur de pression à effet de champ PSFET à base SG-MOSFET [94].

Le principe de fonctionnement de ce dispositif comme le montre la figure III.2 est le suivant : une variation de pression environnante entraîne la déflexion de la membrane suspendue qui se déforme et réduit l'épaisseur de l'oxyde de la grille suspendue. Ce changement induit une dérive de la capacité de grille et conduit à une modification du courant de drain qui peut ensuite être utilisé pour mesurer la pression appliquée.

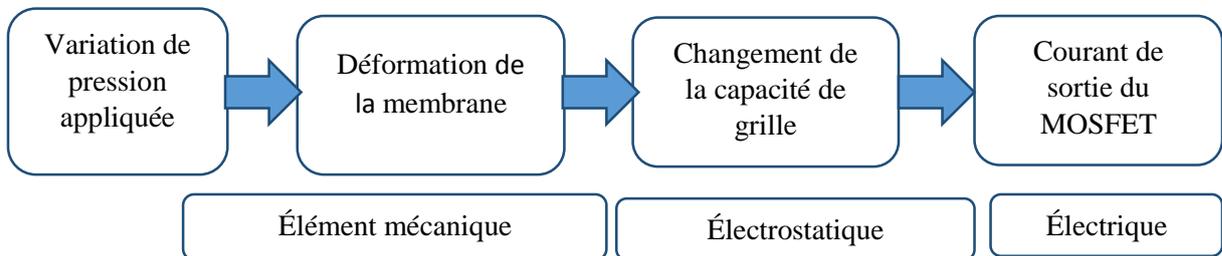


Figure III.2 : Schéma de principe d'un capteur de pression à base SG-MOSFET [98].

Le point de fonctionnement du transistor est réglé par les tensions V_g et V_d de façon à être en régime de saturation pour maximiser le courant de sortie et avoir la plus grande sensibilité possible. La réponse du capteur est régie par son courant de saturation I_{Dsat} exprimé par [99] :

$$I_{Dsat} = \frac{\mu_n W_g}{2L_g} C_{gate} (V_g - V_T)^2 \quad (III.1)$$

Où μ_n est la mobilité des électrons du canal, W_g la largeur de canal, L_g la longueur de canal, C_{gate} la capacité de grille et V_g la tension de grille.

Dans cette optique, plusieurs études ont été menées pour mettre au point et optimiser des capteurs de pression à effet de champ PSFET à base SG-MOSFET, parmi lesquelles on peut citer :

En 1988 Voorthuyzen [100] a présenté la théorie et les premiers résultats expérimentaux d'un nouveau capteur de pression à base de SG-MOSFET. Ce capteur de pression est fabriqué avec un gap de 5 μm et une longueur de canal de transistor MOSFET de 15 μm il présente une sensibilité à la pression de 0.75 $\mu\text{A/KPa}$ et une sensibilité à la température modérée de 0.3 %/°C.

Lysko et al en 1995 [7] ont utilisé la technologie standard des circuits intégrés pour fabriquer un capteur de pression basé sur une structure FET, dont le schéma structurel est illustré par la figure III.3. L'avantage de cette configuration est que la compensation des dérives thermiques du capteur est réalisée par l'intégration facile d'un FET de référence sur la même puce.

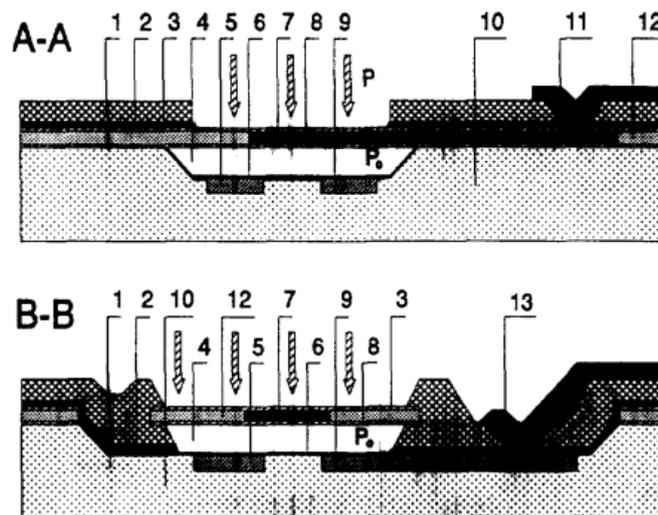


Figure III.3 : Schéma en coupe de la structure d'un capteur de pression fabriqué par Lysko, (1) — phosphosilicate glass (PSG), (2) — SiO_2 , (3) — Si_3N_4 , (4) — cavité, (5) — drain (n+), (6) — SiO_2 , (7) — grille poly-si, (8) — Si_3N_4 , (9) — source (n+). (10) — substrat Si mono, (11) — contact métallique de grille, (12) — poly-Si non dopé, (13) — contact métallique de la source. [96].

Par ailleurs, est dans le cadre du développement de la technologie de la fabrication des capteurs de pression, Svensson et al en 1996 [93] ont employé un processus de micro-usinage de surface pour fabriquer un capteur de pression FET. Le capteur est un transistor MOSFET dont la grille est la membrane et les régions de source et de drain sont les deux diffusions de silicium situées sous la membrane. Ce capteur de pression avait une sensibilité de 0,1 mA/bar.

Et par la suite, d'autres chercheurs ont utilisé le même processus (micro-usinage de surface) avec les diverses technologies CMOS pour la fabrication de plusieurs structures de ce type de capteurs de pression. Parmi lesquels on peut citer le capteur PSFET circulaire fabriqué par Berney avec la technologie CMOS standard de 5 μm (Figure III.4) [95, 99, 101-104].

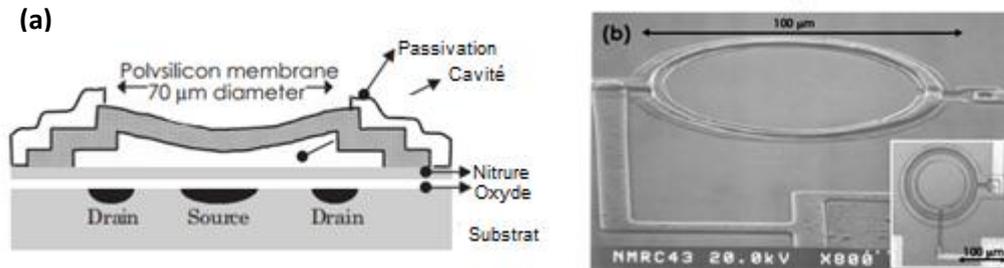


Figure III.4 : (a) Vue en coupe de capteur de pression PSFET circulaire
(b) microscopie électronique par balayage (SEM) de capture fabriquée [101].

En 2000 Hynes et al [102] ont conçu un modèle permettant de déterminer la déflexion de la membrane en fonction de la pression, par la méthode des différences finies. Et par la suite, ils ont déterminé la capacité de la grille suspendue (C_{gate}) qui leur a permis de déterminer la réponse électrique du capteur I_{Dsat} .

À partir de l'équation de base d'un MOSFET, Sallese en 2001 [105] a établi un modèle analytique simple et efficace pour la caractérisation électrique de ce type des capteurs de pression. Il a ainsi montré que l'effet électrostatique est négligeable dans le cas où la hauteur de la cavité est supérieure à 65 nm. Néanmoins, ce modèle reste incomplet, car il ne prend pas en compte les effets mécaniques de la membrane.

Pour cela, Jachowicz [91] a présenté en 2002, en premier temps, une nouvelle approche tenant en compte de la modélisation du comportement mécanique de la membrane du capteur de pressions sous environnement SAMCEF (Système pour l'Analyse des Milieux Continus par Eléments Finis). En second temps, il a utilisé les résultats de déflexion de la membrane dans un algorithme itératif pour la partie électrique de la modélisation.

Baishya et al en 2014 [106] ont utilisé la modélisation mathématique et la simulation PSpice du dispositif pour étudié ses caractéristiques dans le domaine AC. Le capteur présente une réponse (fréquence de coupure) proportionnelle à la pression appliquée.

Ajay [92] en 2015 a proposé un nouveau capteur de pression en combinant les effets piézorésistifs et de la grille suspendue du MOSFET comme le montre la figure III.5. Cette

nouvelle conception de capture a une sensibilité supérieure à celle d'un capteur similaire utilisant un seul effet piézorésistif ou capacitif.

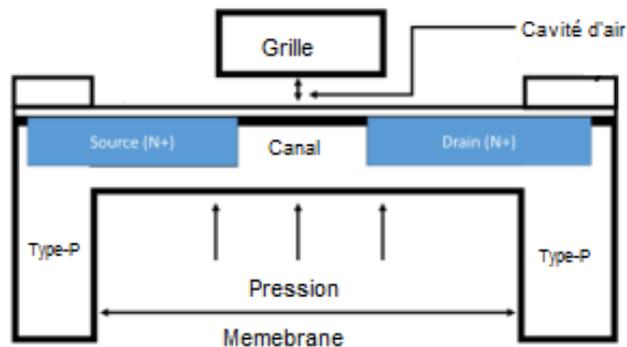


Figure III.5 : Vue en coupe de nouveau capteur de pression propose par Ajay [92].

Les modèles analytiques établis pour modéliser un capteur de pression PSFET montrent que : d'une part, ses limitations concernant l'étude en température, et d'autre part des difficultés rencontrées lors du couplage de différents phénomènes physiques pour la simulation précise de la réponse du capteur. Dans ce contexte, nos travaux de recherche sont été consacrés au développement de ce type de capteur de pression pour diverses applications. Ce qui permet une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu et de la détermination de tous les effets des paramètres d'influences régissant leur principe de fonctionnement.

III.2.2. Exemple de fabrication

La fabrication de ce type de capteurs de pression est basée sur la technologie CMOS-MEMS et la technique post processus pour la réalisation des membranes suspendue qui placée au-dessus de la partie CMOS (MOSFET) [88, 99, 107].

Plusieurs auteurs utilisent l'évolution de la technologie CMOS pour miniaturiser et optimiser ces captures. Le procédé de fabrication du capteur de pression à base SG-MOSFET réalisé par Berney présenté dans le cadre de cette étude, comme un exemple est basé sur le procédé de fabrication CMOS standard de 5 μm . Le principe de base de la fabrication est résumé sur la figure III. 6.

- Généralement ce type de capteurs utilise des transistors MOS à canal N à enrichissement. Cela signifie qu'il faut réaliser dans un substrat de type P qui constituera la zone de canal, les deux zones très dopées de type N qui constitueront la source et le drain. Le dopage de zone de canal, qui a une influence importante sur la tension de seuil du transistor MOS, est ajusté avec précision par implantation ionique de bore (figure III. 6 (a)).

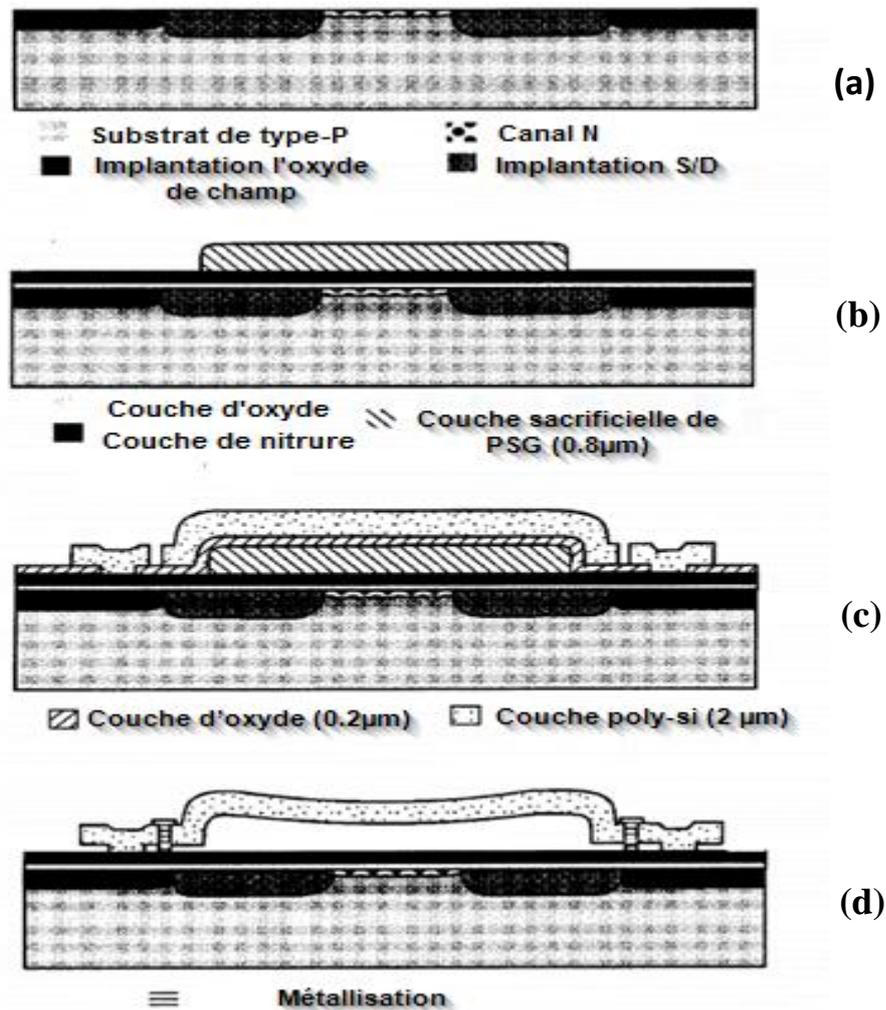


Figure III.6 : Différentes étapes de base pour la fabrication d'un capteur de pression à base Implantation l'oxyde de champ SG-MOSFET [93].

L'étape suivante consiste à former l'oxyde de MOSFET, dans ce cas deux couches, l'oxyde de silicium et le nitrure de silicium. Ensuite, la déposition d'une couche sacrificielle de PSG (verres de phosphore) pour la création de la cavité de capteur dans l'étape finale (figure III. 6 (b)).

- Définition de la zone de la membrane par déposition d'une couche mince dans cet exemple la couche de poly silicium dopé qui est en même temps la grille du transistor MOS (figure III. 6 (c)).

- La gravure de la couche sacrificielle libère la membrane et crée la cavité et finalement la déposition de la métallisation pour constituer les contacts (figure III. 6 (d)).

La figure III.7 présente la photographie d'une puce avec plusieurs capteurs de pression réalisés.

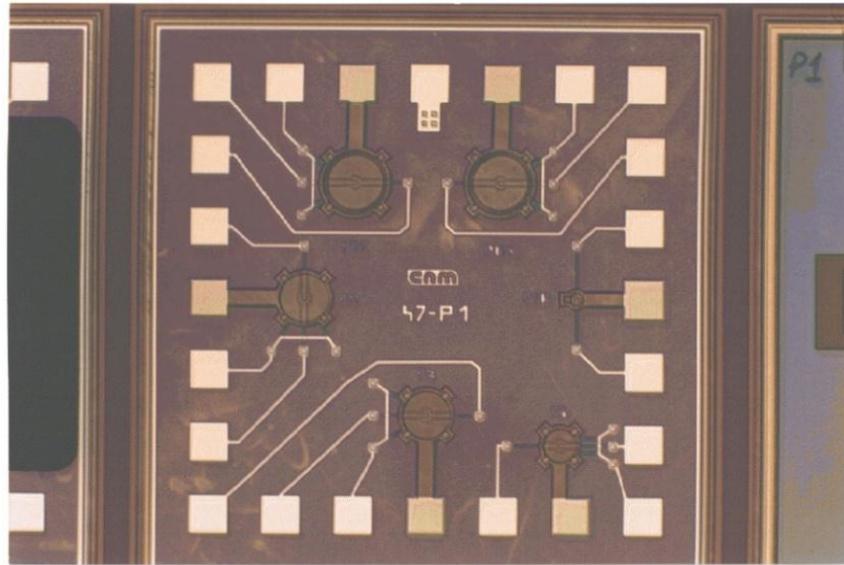


Figure III.7 : Vue de dessous et de dessus des plusieurs capteurs de pression SG-MOSFET réalisée par Svensson et al [93].

II.3. PSFET à base d'effet piézorésistif

L'effet piézorésistif dans les dispositifs MOSFETs est l'une des techniques de détection alternatives les plus prometteuses, offrant une compatibilité totale avec les processus CMOS standard. Les chercheurs ont rapporté les coefficients de piézorésistance de MOSFETs à canal N et P dans la littérature. Thompson et al ont été les premiers à proposer une étude expérimentale complète des coefficients de piézorésistance de MOSFETs orientés $\langle 110 \rangle$ et $\langle 100 \rangle$. Toutefois, les coefficients piézorésistifs des MOSFETs pour les deux orientations de canal ont été traités indépendamment [108-110].

Coefficients	Dispositif NMOS ($\times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$)	Dispositif PMOS ($\times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$)
Π_{11}	1020	-66
Π_{12}	-534	11
Π_{44}	136	-1380
$\Pi_s = \Pi_{11} + \Pi_{12}$	486	-55

Tableau III.1 : Valeurs des coefficients de piézorésistance de MOSFETs à canal orienté (100) [109].

II.3.1. Description et principe de fonctionnement

Dans cette approche, des capteurs de pression ont été fabriqués avec une membrane déformable utilisée comme la région du canal d'un transistor MOSFET. Où ce dernier est considéré comme une simple piézorésistance ayant une valeur de résistance égale à la résistance du canal d'inversion R_{ch} . La région de canal du MOSFET constitue elle-même l'élément de détection piézorésistif ainsi qu'un diaphragme élastique qui se plie sous une pression externe, comme illustré sur la figure III.8 [111].

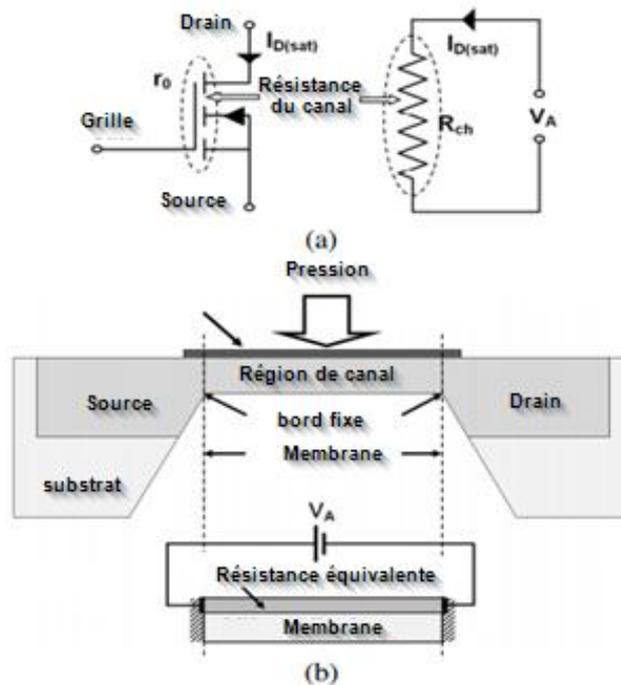


Figure III.8 : (a) MOSFET en tant que piézorésistance (b) Structure de capteur de pression composée d'une piézorésistance équivalente à NMOS intégrée sur la membrane [111].

Ces capteurs de pression fonctionnent selon le principe de la variation du courant de drain du transistor sous pression appliquée en raison de l'effet piézorésistif dans le MOSFET. En présence d'une pression extérieure, des déformations et des contraintes sont engendrées dans la membrane qui est la région du canal du transistor. Ces contraintes provoquent un changement dans la mobilité de canal par l'effet piézorésistif dans le MOSFET. Ce changement conduit à une modification du courant de drain qui peut ensuite être utilisé pour mesurer la pression appliquée.

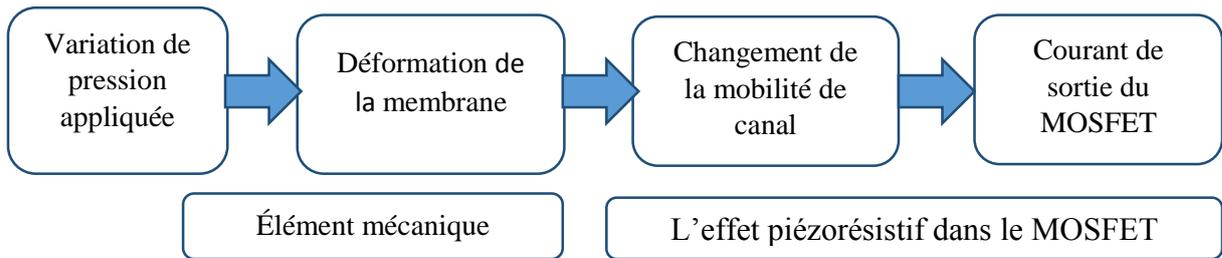


Figure III.9 : Schéma de principe d'un capteur de pression basé sur l'effet piézorésistif dans le MOSFET.

Le point de fonctionnement du transistor est situé dans la région de saturation permettant d'avoir une plus grande sensibilité possible, la réponse du capteur est régie par [112] :

$$I_{Dsat} = (\mu_n \mp \Delta\mu_n) \frac{w_g}{L_g} C_{ox} \frac{(V_g - V_T)^2}{2} \quad (\text{III.2})$$

Ce modèle analytique est mis en œuvre pour régir le fonctionnement d'un capteur de pression à base d'effet piézorésistif dans un MOSFET (figure III.9).

Au cours des dernières années, les chercheurs ont eu recours à cet effet pour concevoir et fabriquer des différentes structures de ce type des capteurs de pression.

Yan-Hong Zhang et al [113] en 2006 ont proposé un nouveau capteur de pression basé sur l'effet piézorésistif dans un MOSFET utilisant deux MOSFETs et deux piézorésistances pour former un pont de Wheatstone comme la montre la figure III.10. La fabrication de ce capteur en 2012 par les mêmes auteurs, montre que ce dernier présente des performances élevées en matière de sensibilité et de consommation électrique comparable au capteur de pression piézorésistif traditionnel [114].

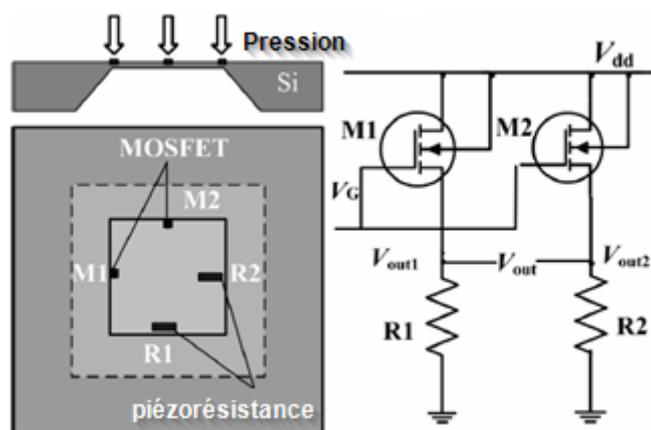


Figure III.10 : Schéma du nouveau capteur de pression proposé par Yan-Hong Zhang [113].

L'utilisation d'un circuit miroir de courant comme alternatif au circuit à pont de Wheatstone traditionnel pour la conception et le développement des capteurs de pression

miniaturisés intégrés basés sur l'effet piézorésistif dans un MOSFET, ont fait l'objet des travaux de Pradeep Kumar Rathore (2013-2016) [111, 115-121].

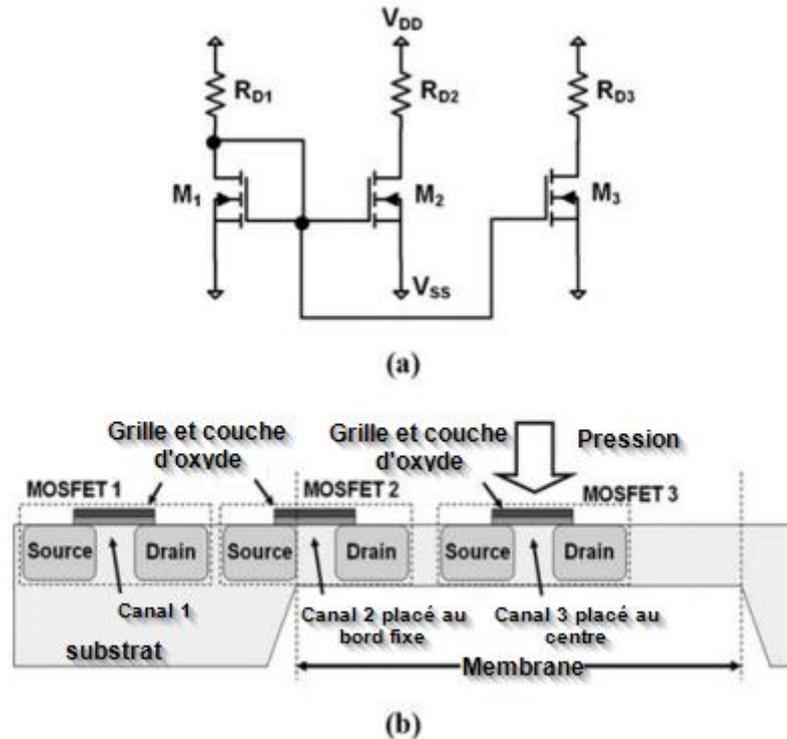


Figure III.11 : (a) Circuit miroir de courant de détection (b) vue en coupe du capteur de pression intégré basé sur la détection miroir de courant [121].

III.3.2. Exemple de fabrication

Le procédé de fabrication du capteur de pression réalisé par Yan-Hong Zhang, présenté comme un exemple, est basé sur le procédé de fabrication des circuits intégrés et la technique de fabrication des MEMS [122]. La figure III.10 montre les diverses étapes de fabrication de ce capteur.

Tout d'abord, la déposition des couches minces d'oxyde SiO₂ et Si₃N₄ sur les deux faces du substrat du silicium de type N orienté (100). Par la suite, la formation de la membrane par la technique de micro usinage en volume. Puis, l'implantation de la source est du drain. Ensuite, il faut créer les piézorésistances par un dopage de bore. La couche d'aluminium a été pulvérisée et gravée pour réaliser l'interconnexion. Enfin, la liaison Si-Au/Ti-Si est réalisée sous vide pour élaborer la cavité référentielle de pression.

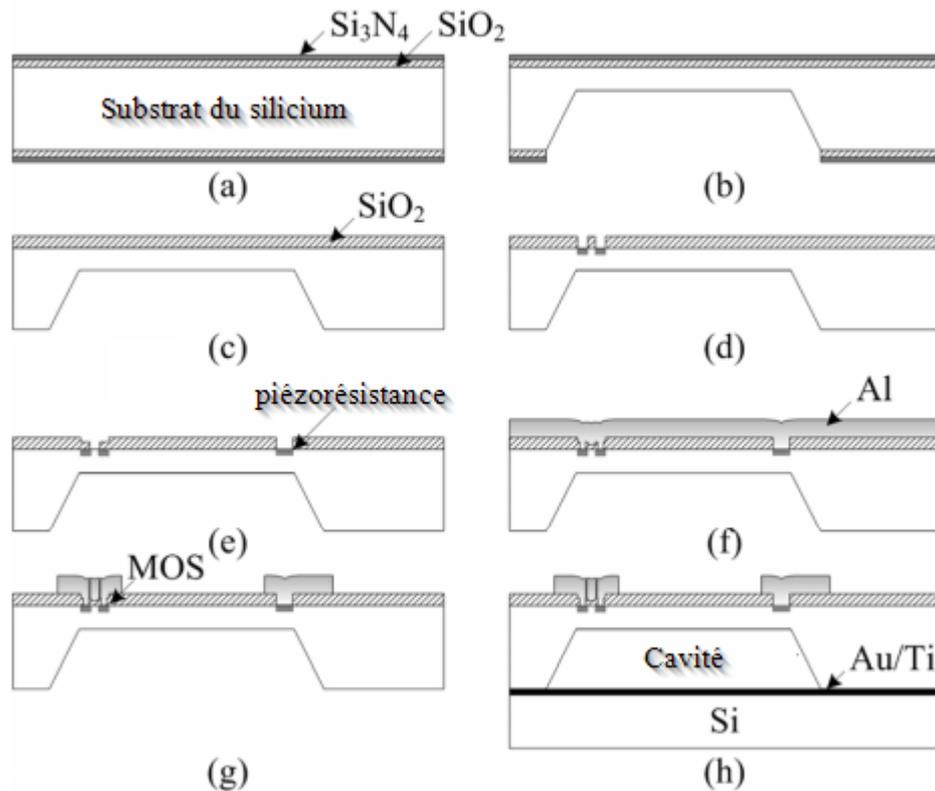


Figure III.12 : Etapes de fabrication du capteur de pression réalisé par Yan-Hong Zhang et al [122].

III.4. Capteur de pression à base d'effet piézoélectrique POSFET

De nombreux chercheurs ont tenté d'utiliser les effets piézoélectriques de films polycristallins orientés déposés sur des dispositifs MOS pour la conception et la réalisation des capteurs de force, de contrainte et de pression [123-129].

Ce nouveau dispositif appelé POSFET (Piezoelectric Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), dont la structure est illustrée sur la figure II.13 (capteurs de pression ou de force).

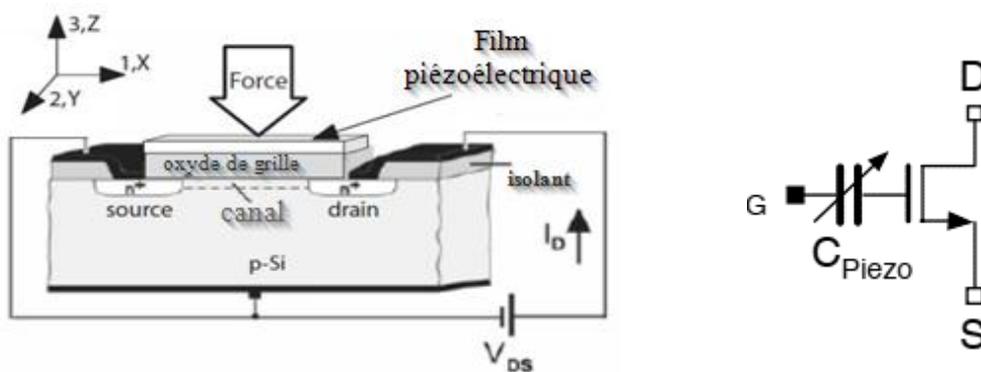


Figure III.13 : Structure d'un dispositif POSFET et son symbole schématique [129, 130].

La grille permet de polariser le MOS dans un régime de conduction, sous l'action d'efforts exercés verticalement. La différence de potentiel apparaissant aux bornes du film piézoélectrique modifie le régime de conduction du transistor [131].

Une autre approche consiste à utiliser un Pseudo-MOS inversé ou Ψ -MOSFET comme élément transducteur avec une grille piézoélectrique (PZT) sensible à la pression (figure II.14) [124, 132].

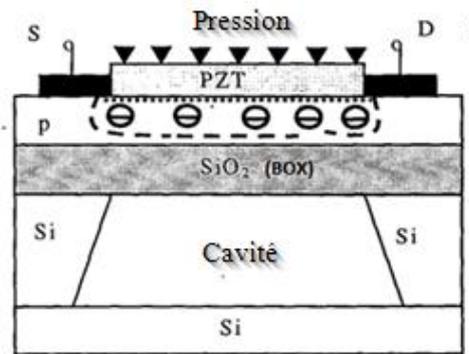


Figure III.14 : Structure d'un capteur de pression Ψ -MOSFET.

III.5. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté une étude des capteurs de pression de pression à effet de champ PSFET, en explicitant leurs principales caractéristiques, leurs performances, leur technique de conception et de fabrication. Le tableau III.2 résume des performances des différentes captures de pression PSFET publiées dans la littérature.

Auteur	Réf	Année	Principe de fonctionnement	Gamme (KPa)	Sensibilité	Lg μm	Remarques
Voorthuyzen	[100]	1988	SG-MOSFET	-13-54	0.75 $\mu\text{A/KPa}$	15	
James	[133]	1990	SG-MOSFET	0-40	/	12.7	
Svensson	[93]	1996	SG-MOSFET	100-400	0.1 $\mu\text{A/KPa}$	5	
Hynes	[97]	1999	SG-MOSFET	100-650	0.18 $\mu\text{A/KPa}$	20	
Liang Dai	[95]	2007	SG-MOSFET	0-500	0.032 mV/KPa	0.35	16 cellules
Liang Dai	[104]	2008	SG-MOSFET	0-500	0.022 mA/KPa	0.35	16 cellules
Liang Dai	[99]	2009	SG-MOSFET	0-500	0.08 mV/KPa	0.35	16 cellules

Soumen Deb	[134]	2014	SG-MOSFET	10-205 MPa	0.316 μ A/MPa	0.5	
Alcantara	[41]	1998	piezorésistif MOSFET	0-100	2.2 mV/KPa	40	4 PMOS en pont de Wheatstone
Zhang	[122]	2008	piezorésistif MOSFET	0-400	0.3 mV/KPa	/	4 PMOS et 2 R en pont de Wheatstone
Rathore	[115]	2013	piezorésistif MOSFET	0-1000	10mV/MPa	100	circuit miroir de courant
Byung-Min	[135]	2015	piezorésistif MOSFET	0-1200	0.0096 μ A/kPa	/	
Rathore	[121]	2015	Piezorésistif MOSFET	0-1000	785mV/MPa	5	circuit miroir de courant
Ravariu	[124]	2002	Ψ -MOSFET	1-340 MPa	/	2	
Hyeon Jun Hwang	[136]		Piezoelectrique	3Mpa	/	/	utilisant le graphène

Tableau III.2 : Différentes PSFETs publiées dans la littérature.

Chapitre IV.

Etude, simulation et optimisation d'un
PSFET à base SG-MOSFET

IV.1. Introduction

Le coût de fabrication des microsystemes relativement faible est assuré par des techniques de « post processing » où des milliers de composants peuvent être fabriqués sur le même wafer de silicium. Par contre, les coûts de prototypage de microsystemes sont élevés. Les nombreuses itérations nécessaires pour la production d'un seul composant microsysteme qui varient entre la modélisation, la simulation et l'optimisation de composant microsysteme rendent cette opération très coûteuse.

Ce chapitre a pour objectif de poser les bases du modèle comportemental du capteur de pression à base SG-MOSFET (PSFET à détection capacitive). Ce dernier est développé pour déterminer les expressions du module de la déflexion de la membrane et de la capacité totale de la grille en fonction de la pression appliquée. Ces expressions sont par la suite utilisées pour calculer le module du courant de sortie du dispositif.

Une interface graphique a été mise en œuvre sous environnement Matlab à l'aide de l'interface GUI (Graphical User Interface) utilisant le modèle du capteur capacitif de pression et celui du PSFET à détection capacitive. Cette interface permet de tracer les courbes de caractérisation électromécanique de ces deux dispositifs.

Nous avons établi un modèle 3D de la structure d'un capteur de pression PSFET sous environnement COMSOL Multiphysics qui utilise la méthode des éléments finis (FEM) afin de simuler la réponse du capteur et sa sensibilité pour diverses formes de membrane. Le modèle du capteur établi par SILVACO ATLAS est utilisé pour valider le comportement électrique du modèle (GUI) ainsi que le modèle de simulation FEM.

Dans la dernière partie de ce chapitre, une étude est consacrée à l'optimisation des performances des capteurs de pression PSFET à détection capacitive.

IV.2. Modélisation analytique

Une première approche de la simulation de phénomènes physiques est la modélisation analytique. C'est l'approche qui requiert le moins de ressources informatiques puisqu'elle cherche à s'approcher du phénomène et/ou de la structure étudiée de façon à avoir le modèle le plus simple possible. Pour cela, les modèles analytiques se basent sur les équations de base de la théorie régissant ce phénomène.

Aussi, on l'étudie sur une représentation abstraite du système réel, prenant en compte toute ou simplement une partie de la géométrie de la structure analysée [137].

Le fonctionnement du capteur de pression à base SG-MOSFET est basé sur la modification de la capacité de la grille, mais au lieu de la mesurer directement, on utilise son influence sur le transport électronique dans le MOSFET pour en mesurer le courant de sortie du transistor en fonction de la pression appliquée. Le modèle capacitif équivalent d'un capteur de pression à effet de champ, qui est constitué d'un NMOS et une membrane suspendue, est présenté sur la figure IV.1. Donc le comportement du capteur de pression dans son intégralité se fait par la modélisation mécanique de la membrane, de la grille suspendue et de l'analyse électrique du capteur PSFET.

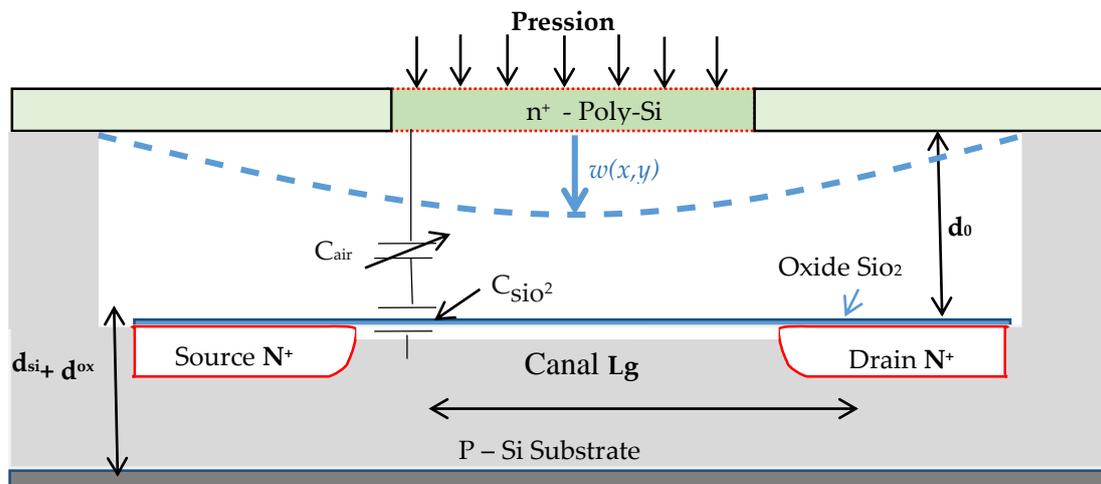


Figure IV.1 : Vue en coupe transversale d'un capteur de pression PSFET avec son modèle capacitif équivalent [94].

De manière générale, un modèle idéal d'un capteur de pression doit satisfaire les points suivants :

- Le modèle doit donner une bonne précision sur les caractéristiques de sortie en fonction de la pression appliquée.
- Il doit avoir un nombre minimum possible de paramètres. Ceux-ci doivent être reliés directement à la structure du composant et au procédé de fabrication technologique.
- La méthode d'extraction des paramètres du modèle doit être la plus simple possible.
- Le modèle doit être facile à intégrer (implémenter) dans un simulateur. Pour le calcul numérique, il doit être robuste et continu entre les régimes de fonctionnement.

Tous les points énoncés précédemment représentent évidemment le cas d'un modèle idéal. Il n'existe pas de modèle pouvant satisfaire la totalité de ces exigences. Cependant, l'approche et le type de modélisation font apparaître divers avantages et inconvénients. Ainsi,

le choix d'un modèle ou d'une approche de modélisation doit s'effectuer en fonction des besoins comme des moyens offerts [138].

Les modèles analytiques mis en œuvre pour modéliser un capteur de pression PSFET à détection capacitive ont fait l'objet des travaux de Suminto [133] en 1990 et de Baishya [106] en 2014. Ces auteurs ont considéré la capacité totale de NMOS égale la capacité par unité de surface de la cavité ou l'effet de l'oxyde est négligeable, et pour une forme carrée de membrane seulement. Les modèles analytiques mis en œuvre pour modéliser un capteur de pression PSFET à détection capacitive ont dû être adaptés pour décrire les différentes architectures du capteur.

Dans cette étude, nous proposons un modèle de capteur de pression PSFET considérant différentes formes de la membrane et diverses structures de matériaux diélectriques. Ce qui permet d'éliminer les limites du modèle précédent.

IV.2.1. Modélisation mécanique de la membrane

La variation de la capacité entre la grille suspendue et le canal NMOS du capteur dépend de la déflexion de la membrane. Cette déflexion est généralement représentée par une équation à dérivée partielle de quatrième ordre qui est complexe à résoudre. Les solutions établies dans la littérature sont du type semi-analytique dans le cas des membranes de forme carrée ou rectangulaire et analytique dans le cas de membrane de forme circulaire[30, 139].

a) Membrane de forme carrée et rectangulaire :

Fondamentalement, la déflexion mécanique d'une membrane fine de forme carrée ou rectangulaire, soumise à une pression constante et uniforme et parfaitement encadrée, à l'état stationnaire est régie par l'équation de Lagrange d'ordre quatre, en coordonnées cartésiennes, elle est donnée par [140] :

$$\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2} + 2\alpha_{si} \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^2} = \frac{P}{D} \quad (IV.1)$$

Où $w(x, y)$ est la déflexion de la membrane, P est la pression appliquée et D est la rigidité du matériau décrite par l'équation ci-dessous [23] :

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

Et α_{si} le coefficient caractérisant l'anisotropie du silicium défini par [23] :

$$\alpha_{si} = \nu + \frac{2G(1-\nu^2)}{E} \quad (\text{IV.3})$$

Où ν est le coefficient de Poisson, E le module de Young et G le coefficient de Coulomb.

Plusieurs solutions approchées ont été proposées dans la littérature pour la résolution de l'équation de Lagrange Eq.IV.1 [30, 140-143]. Parmi lesquelles on peut citer celle établie par Kerrou [140, 141].

$$w(x, y) = \frac{w_0}{16} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n K_{ij} \frac{1}{2} \left[\cos^2 \left((2i+1) \left(\frac{\pi x}{2a} \right) \right) \right] \times \frac{1}{2} \left[\cos^2 \left((2j+1) \left(\frac{\pi y}{2b} \right) \right) \right] \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

a, b : largeur et longueur de la membrane

n, i et j : des nombres entiers pairs.

k_{ij} : sont des coefficients réduits représentés dans le tableau IV.1.

w_0 est la déflexion maximale au centre de la membrane donnée par :

$$w_0 = K(rd) \frac{Pa^2b^2}{16D} \quad (\text{IV.5})$$

Où rd est le facteur de forme ($rd = a/b$) les valeurs de $k(rd)$ sont données dans le tableau suivant.

	k(r)	k ₀₀	k ₀₂	k ₀₄	K ₂₀	K ₂₂	k ₂₄	k ₄₀	K ₄₂	k ₄₄
rd=1	0.022 4	1.00	0.028 4	0.003 8	0.028 4	0.012 3	0.003 0	0.0038	0.003 0	0.001 6
rd=2	0.011 7	1.00	0.014 3	0.001 9	0.166 2	0.012 3	0.001 8	0.0274	0.008 1	0.001 6
rd=3	0.005 7	1.00	0.013 0	0.001 7	0.434 5	0.012 3	0.001 7	0.0106	0.010 6	0.001 6

Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients réduits k_{ij} pour différentes valeurs de rd [5].

b) Membrane de forme circulaire

La loi qui gouverne la déflexion d'une membrane fine de forme circulaire de rayon R , parfaitement encadrée aux bords et soumise à une pression uniforme et symétrique, dans le cas des faibles perturbations, est régie par l'équation de Lagrange d'ordre 4 en coordonnées polaires [24] :

$$\nabla^4 w(r) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w(r)}{\partial r} \right) \right] \right] = \frac{P}{D} \quad (\text{IV.6})$$

Où ∇ est l'opérateur Hamiltonien, $w(r)$ représente les faibles déflexions (c.-à-d. très petites devant l'épaisseur de la membrane), r est la coordonnée radiale, D le coefficient de rigidité du silicium. La solution analytique exacte est donnée par [54] :

$$w(r) = w_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^2 \quad (\text{IV.7})$$

w_0 est la déflexion maximale au centre de la membrane donnée par :

$$w_0 = \frac{PR^4}{64D} \quad (\text{IV.8})$$

En général, la déflexion maximale au centre d'une membrane de forme carrée ou circulaire est donnée par :

$$w_0 = \alpha P \quad \text{ou} \quad \alpha = \begin{cases} 0.0224 \frac{a^4}{16D} & \text{carrée} \\ \frac{R^4}{64D} & \text{circulaire} \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

IV.2.2. Modélisation de la capacité de grille suspendue

Comme le montre la figure IV.1, le diélectrique de la grille suspendue du MOSFET est composé d'une couche d'oxyde et d'un gap d'air. En considérant l'approximation de premier ordre de la grille suspendue et du canal comme un condensateur à plaques parallèles. La capacité totale de NMOS peut être considérée comme une association série de deux condensateurs et la capacité totale de la grille par unité de surface C_{gate} est donnée par :

$$\frac{1}{C_{gate}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{air}} \quad (\text{IV.10})$$

Où C_{ox} et C_{air} sont les capacités par unité de surface de l'oxyde et de la cavité respectivement. Ces différentes capacités peuvent être calculées à partir des expressions IV.11 :

$$\begin{cases} C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \\ C_{air} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d_0 - w_0} \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

Où ϵ_0 la permittivité du vide, ϵ_{ox} la permittivité relative de l'oxyde, ϵ_r la permittivité de l'air, t_{ox} est l'épaisseur de l'oxyde, d_0 l'épaisseur initiale de la cavité d'air et w_0 la déflexion maximale de la membrane.

Le comportement électrique du capteur PSFET peut être modélisé en le considérant comme un dispositif NMOS normal avec une épaisseur d'oxyde variable. L'épaisseur équivalente de l'oxyde (EOT) est donc donnée par :

$$EOT = t_{ox} + \varepsilon_{ox}(d_0 - w_0) \quad (IV.12)$$

On va décrire le fonctionnement du capteur à l'aide d'un modèle analytique en considérant le diélectrique, ayant un facteur de forme f_0 dépendant des propriétés du diélectrique de la grille suspendue de MOSFET. La capacité totale de la grille par unité de surface C_{gate} en fonction de la pression appliquée peut se mettre sous la forme :

$$C_{gate} = \varepsilon_0 f_0 (1 - \alpha f_0 P)^{-1} \quad (IV.13)$$

Où f_0 , est un facteur de forme de diélectrique dépendant des propriétés du diélectrique de la grille suspendue de MOSFET, qui est donné par :

$$f_0 = \left(\frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox} + \varepsilon_{ox} d_0} \right) \quad (IV.14)$$

IV.2.3. Caractéristiques I-V du PSFET

L'expression de la tension de seuil V_T du capteur est donnée par [144] :

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_s q N_A (2\phi_B)}}{C_{gate}} \quad (IV.15)$$

Où ε_s est le constant diélectrique relatif du semi-conducteur, q est la charge d'électron, N_A dopage de substrat, V_{FB} est la tension de bande plate et ϕ_B est le potentiel de Fermi donné par :

$$\phi_B = \frac{K_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A}{ni} \right) \quad (IV.16)$$

En combinant (IV.13) et (IV.15), la tension de seuil du capteur peut se mettre sous la forme :

$$V_T = f_2 + f_1 f_0^{-1} (1 - \alpha f_0 P) \quad (IV.17)$$

Où f_1, f_2 sont des constantes dépendantes des propriétés géométriques ainsi que des paramètres du processus de fabrication du capteur, elles sont données par :

$$f_2 = V_{FB} + 2\phi_B, \quad f_1 = \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_s qNA(2\phi_B)} / \varepsilon_0 \quad (\text{IV.18})$$

L'expression du courant de drain I_D dans la région linéaire lorsque $V_g > V_T$ et $V_d < (V_g - V_T)$, est donnée par [145] :

$$I_D = \mu_n C_{gate} \frac{W_g}{L_g} \left[(V_g - V_T) V_d - \frac{1}{2} V_d^2 \right] \quad (\text{IV.19})$$

Où : μ_n est la mobilité des électrons.

W_g et L_g la largeur du dispositif et la longueur du canal.

V_g et V_d la tension de grille et la tension drain respectivement.

À partir des relations (IV.13) à (IV.19), l'expression du courant I_D peut se mettre sous la forme :

$$I_D = f_3(1 - \alpha f_0 P) + f_4 \quad (\text{IV.20})$$

Où f_3, f_4 sont des constantes dépendent des propriétés géométriques ainsi que des paramètres du processus de fabrication et les tensions de polarisation du capteur, ils sont donnés par :

$$f_3 = \frac{\mu_n W_g \varepsilon_0}{L_g d_0} \left(V_g - V_{FB} - 2\phi_B - \frac{V_d}{2} \right) V_d, \quad f_4 = \frac{\mu_n W_g}{L_g} \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_s qNA(2\phi_B)} V_d \quad (\text{IV.21})$$

L'expression du courant de saturation du transistor MOSFET est donnée par [99] :

$$I_{Dsat} = \frac{\mu_n W_g}{2L_g} C_{gate} (V_g - V_T)^2 \quad (\text{IV.22})$$

En combinant les équations (IV.13), (IV.17) et (IV.22), le courant de saturation du capteur peut se mettre sous la forme :

$$I_{Dsat} = \left[f_5 f_0^{1/2} (1 - \alpha f_0 P)^{-1/2} + f_6 f_0^{-1/2} (1 - \alpha f_0 P)^{1/2} \right]^2 \quad (\text{IV.23})$$

Où f_5, f_6 sont des constantes dépendantes des propriétés géométriques ainsi que des paramètres du processus de fabrication et les tensions de polarisation du capteur donnés par :

$$f_5 = \sqrt{\frac{\mu_n W_g \varepsilon_0}{2L_g}} (V_g - V_{FB} - 2\phi_B), \quad f_6 = -\sqrt{\frac{\mu_n W_g \varepsilon_s qNA(2\phi_B)}{L_g}} \quad (\text{IV.24})$$

IV.3. Conception et réalisation de l'outil de Simulation

La conception assistée par ordinateur ou CAO (computer Aided Design ou CAD) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique – et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer. Ces outils de CAO sont devenus des appuis incontournables pour les ingénieurs et les scientifiques, au moment d'exécuter tous types de projets, particulièrement ceux dont la complexité et le temps de développement sont importants [146, 147].

Dans cette partie, un outil de simulation complet pour les capteurs de pression capacitifs et les capteurs PSFET à détection capacitive basés sur la modélisation analytique utilisant l'interface graphique GUI Matlab est présenté.

Les interfaces graphiques sous MATLAB (Graphical User Interface) permettent d'interférer avec un programme informatique, grâce à différents objets graphiques (menus, boutons, cases à cocher...) actionnés généralement à l'aide de la souris ou du clavier. Bien que les interfaces graphiques semblent secondaires au développement du cœur d'une application, elles doivent néanmoins être conçues et développées avec soin et rigueur.

La figure IV.2 montre la conception de l'interface GUI PSFET, elle se divise en deux parties, capteur de pression capacitif et capteur de pression PSFET à détection capacitive. Le programme est divisé en trois parties :

- Première partie consiste à définir les dimensions du capteur étudié pour les deux formes de la membrane carrée ou circulaire ainsi que les différents matériaux utilisés pour la conception du capteur. L'interface dispose d'une vaste bibliothèque de matériaux utilisés dans les MEMS allant entre les métaux, les semi-conducteurs et les isolants. Les paramètres des matériaux de la membrane (coefficient de Poisson et module de Young), diélectrique de cavité et semi-conducteur de NMOS peuvent être modifiés.

- À partir de la rubrique « Étude », nous procédons à la caractérisation de notre structure étudiée. À partir de l'étude simple (pression constante), nous présentons une visualisation qualitative de l'état de la membrane dans l'espace lorsqu'elle est soumise à une pression uniforme et constante, la pression maximale et la réponse du capteur. L'étude paramétrique permet de déterminer la réponse au centre la membrane, la réponse de capteur en fonction de la pression appliquée ainsi que sa sensibilité et sa non linéarité. On peut aussi déterminer les caractéristiques I-V du capteur PSFET pour diverses pressions appliquées.

- La dernière étape de notre simulation consiste dans l'affichage des résultats de la simulation.

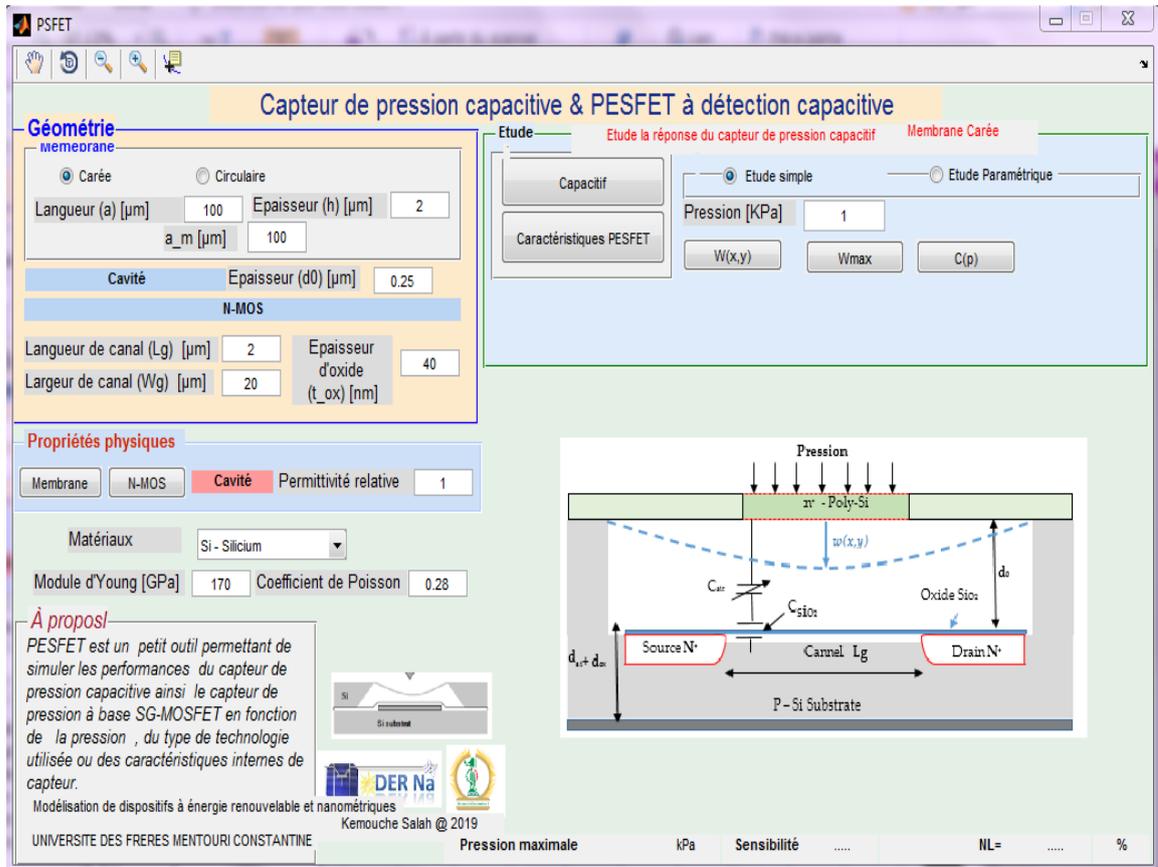


Figure IV.2 : Vue générale sur l'interface GUI PSFET.

a) Déflexion de la membrane

À partir des expressions (IV.4), (IV.5), (IV.7) et (IV.8), nous pouvons déduire la déflexion de la membrane $w(x, y)$ avec $rd = 1$, la déflexion $w(r, \theta)$, ainsi que la déflexion au centre de la membrane.

À partir de l'outil de simulation, nous pouvons tracer les courbes de variations de déformation $w(x, y)$ avec $rd = 1$, la déflexion $w(r)$ et la déflexion au centre de la membrane, qui sont représentées sur les Figures IV.3, IV.4, IV.5, IV.6. Cette représentation dans l'espace permet une visualisation qualitative de l'état de la membrane lorsqu'elle est soumise à une pression uniforme et constante.

Les figures IV.3 et IV.4 représentent la déflexion de la membrane circulaire en fonction de la pression appliquée (100 kPa). Elle montre bien que la variation de la déflexion au centre de la membrane est maximale.

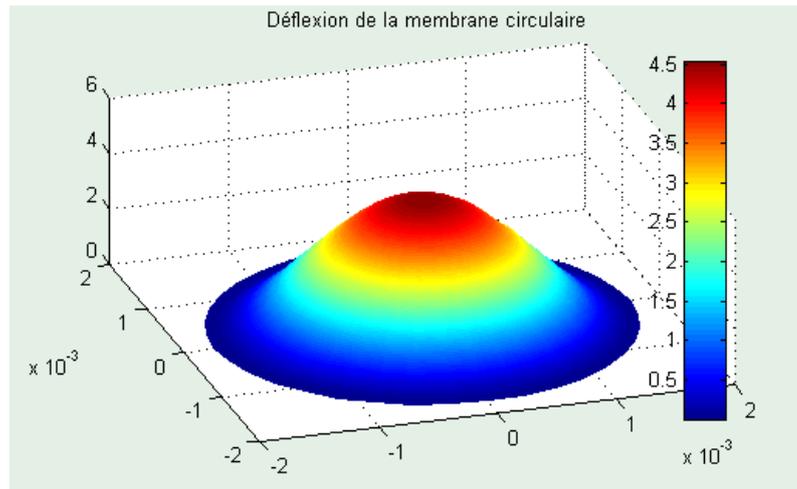


Figure IV.3 : Vue 3D de la déflexion $w(r)$ de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée.

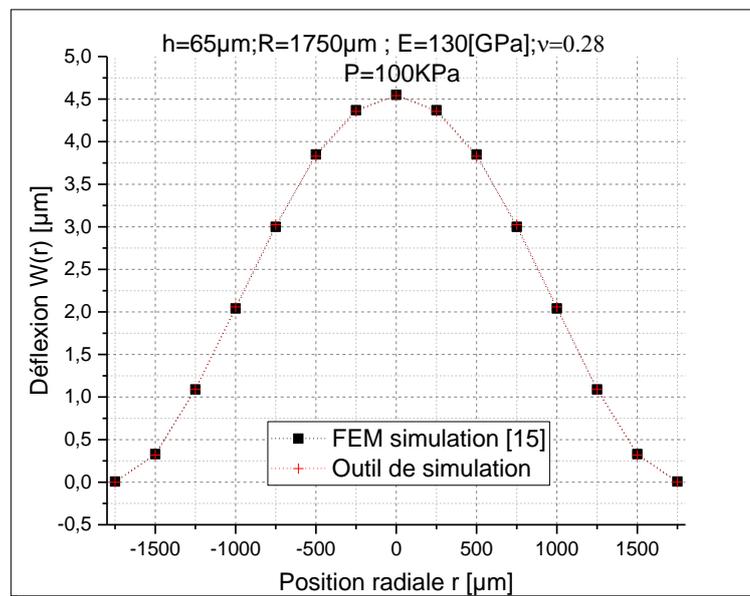


Figure IV.4 : Vue 2D de la déflexion $w(r)$ de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée.

La figure IV.5 montre les variations de la déflexion maximale w_0 au centre de la membrane de forme circulaire. Le résultat de la déflexion de la membrane circulaire obtenu par le modèle analytique est presque identique par rapport au résultat obtenu par la simulation COMSOL.

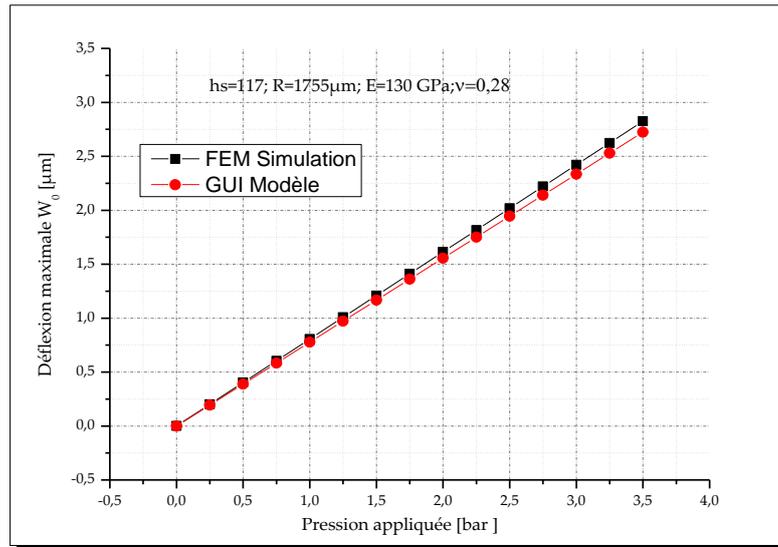


Figure IV.5 : Déflexion maximale de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée

Les résultats obtenus de la simulation d'une membrane de forme carrée sont représentés sur les figures IV.6 et IV.7. Ces figures représentent respectivement les courbes de variations de la déflexion de la membrane $w(x, y)$, ainsi que la déflexion maximale au centre de la membrane $w(0,0)$ en fonction de la pression appliquée. On notera que l'allure de ces courbes est similaire à celle des résultats de la simulation par la méthode des éléments finis sous environnement COMSOL[51].

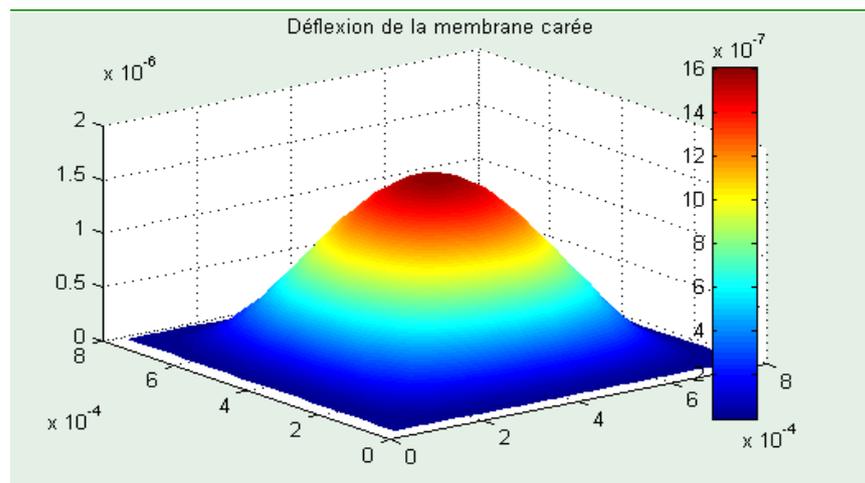


Figure IV.6 : Vue 3D de la déflexion $w(x, y)$ de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée $P=100\text{MPa}$.

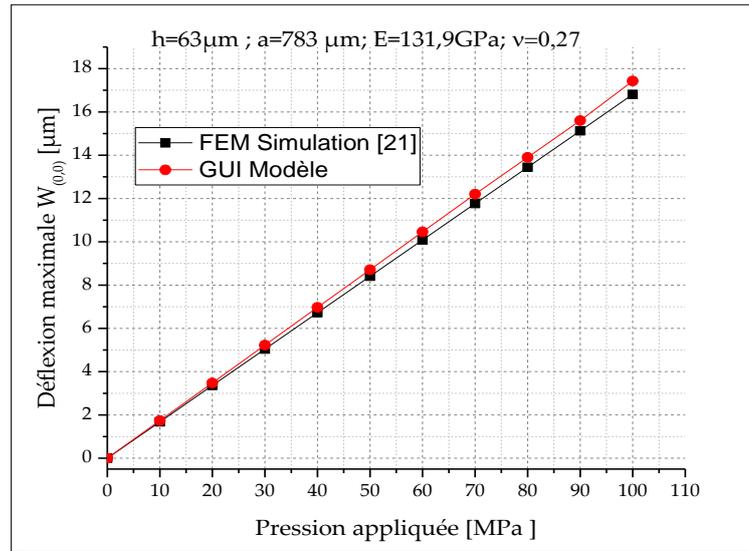


Figure IV.7 : Déflexion maximale de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée.

b) Capteur de pression capacitif

La structure du capteur de pression capacitif est illustrée sur figure IV.8, elle contient une armature déformable (membrane) et un substrat en pyrex 7740, sur laquelle est déposée une couche métallique formant l'électrode fixe. Les deux armatures, fabriquées séparément, sont collées par la technique de soudure anodique [54].

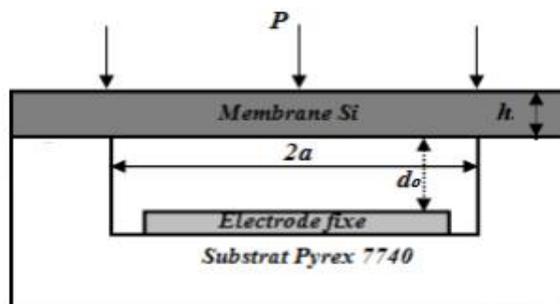


Figure IV.8 : Schéma en coupe de la structure d'un capteur de pression capacitif [54].

Au repos la valeur de la capacité C_0 , est donnée par la relation suivante [148] :

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0} \quad (\text{IV.25})$$

Où A est la surface de l'armature fixe. Pour trouver l'expression de la capacité du capteur en fonction de la pression appliquée, on calcule l'intégrale sur tout l'espace déformé dans la cavité. L'expression de la capacité en fonction de la pression appliquée devient :

- Dans le cas de la membrane circulaire [54] :

$$C_{\text{circulaire}}(P) = \iint_A \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d_0 - w(r, P)} dA \quad (\text{IV.26})$$

L'expression analytique de la capacité $C(P)$ est donnée par [149] :

$$C_{\text{circulaire}}(P) = C_0 \frac{a \tanh\left(\sqrt{\frac{P}{P_{\max}}}\right)}{\sqrt{\frac{P}{P_{\max}}}} \quad (\text{IV.27})$$

où P_{\max} est la pression maximale qui peut être appliquée sur la membrane est définie lorsque la déflexion maximale w_0 est égale à la distance entre les deux armatures " d_0 " :

$$P_{\max} = \frac{64Dd_0}{R^4} \quad (\text{IV.28})$$

Dans la figure IV.9, les courbes représentent les variations de la capacité $C(P)$ en fonction de la pression appliquée P dans le cas d'une membrane de forme circulaire. On notera que l'allure de ces courbes est similaire à celle des résultats expérimentaux [150] et la simulation par la méthode des éléments finis sous environnement COMSOL [24]. Ce qui permet de valider notre modèle.

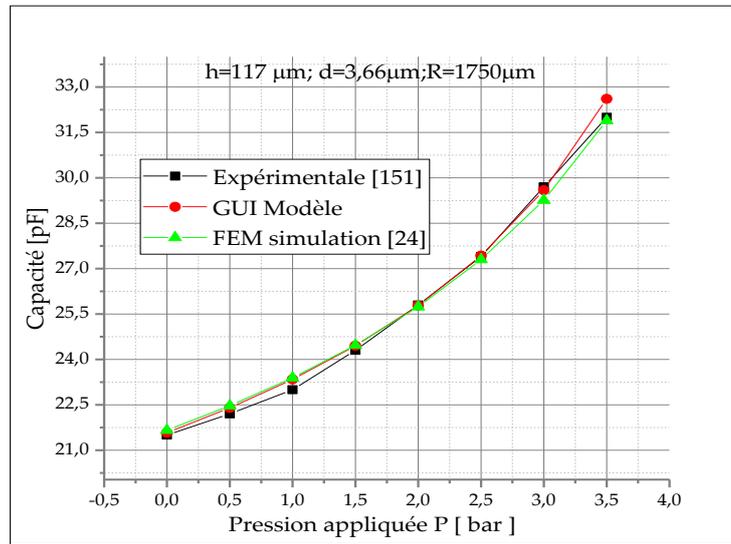


Figure IV.9 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée pour une membrane de forme circulaire.

- Dans le cas de la membrane carrée

$$C_{Carrée}(P) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \iint_A \frac{dA}{d - w(x, y, P)} \quad (IV.29)$$

Le calcul de l'intégrale double de l'équation (IV.29) est compliqué et la solution est de type semi-analytique. la capacité $C(P)$ est donnée par [151] :

$$C_{Carrée}(P) = \int_0^a \left(\frac{2a\varepsilon_0\varepsilon_r}{\pi\sqrt{d_0^2 - \beta^2 w_0^2}} \left[\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{\beta w_0}{d_0^2 - \beta^2 w_0^2} \right) \right] \right) dy \quad (IV.30)$$

$$\text{Où : } \beta = \sin\left(\frac{\pi y}{a}\right) \quad (IV.31)$$

L'intégrale complexe de (Èq. IV.30) est évaluée à l'aide d'intégration numérique (méthode de trapèze) dans MATLAB® afin d'estimer la réponse capacitive en fonction de la pression appliquée.

Dans la figure IV.10, les courbes représentent les variations de la capacité $C(P)$ en fonction de la pression appliquée P dans le cas d'une membrane de forme carrée. On notera que l'allure de ces courbes est similaire à celle des résultats expérimentaux [152], néanmoins une légère différence des valeurs qui est probablement due aux contraintes thermiques causées par le processus de la fabrication du dispositif. Ce qui permet de valider notre modèle.

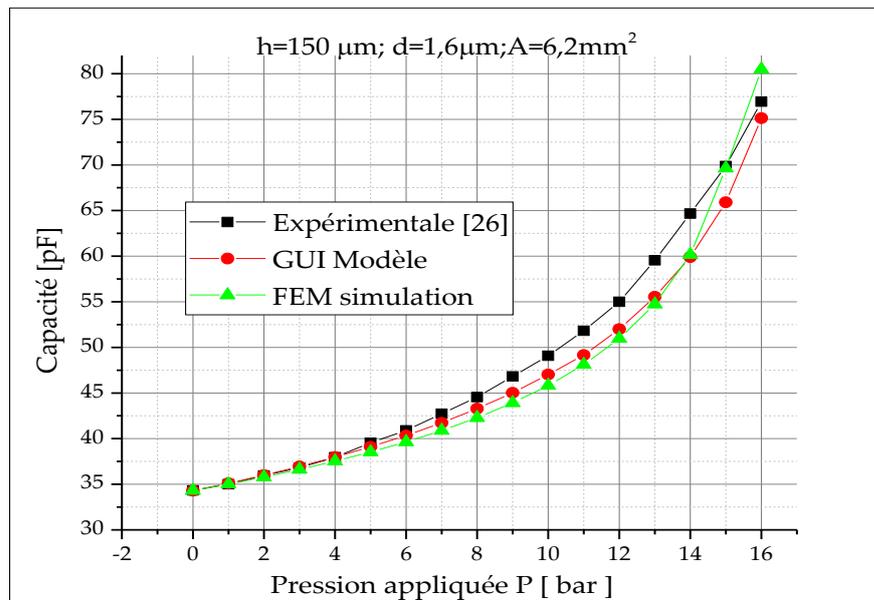


Figure IV.10 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée dans le cas d'une membrane de forme carrée.

c) Capteur de pression à base SG-MOSFET

La réponse de capteur de pression à base SG-MOSFET est basé sur la modélisation analytique de paragraphe précédent (§. IV.2) et les résultats sont comparés et validés par une simulation numérique dans le paragraphe suivant (§. IV.5).

IV.4. Simulation numérique

La simulation numérique est amenée à prendre une place de plus en plus importante dans de nombreux domaines de recherche et développement : électronique, mécanique, physique nucléaire ... etc. La réalisation d'une étude par simulation numérique passe par trois grandes phases qui sont généralement communes à de nombreux secteurs de la recherche (voir figure (IV.11)) [153] :

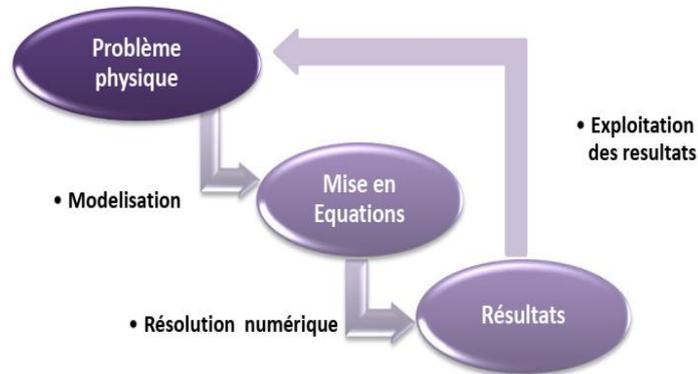


Figure IV.11 : Schéma de Principe d'une simulation numérique [153].

La simulation numérique est un outil de prototypage virtuel accélérant les processus de création et d'optimisation. Que cela concerne l'amélioration d'un procédé en fonction de nouvelles normes, la mise au point d'un produit pour un nouveau marché, un regard plus pointu sur un phénomène physique. Avec une prise en compte toujours plus grande des interactions entre physiques parce que le monde est multi physiques.

La notion de multi physiques est représentée dans la combinaison de plusieurs phénomènes physiques lors de la description d'un processus. On peut décrire mathématiquement des phénomènes physiques très différents par les mêmes équations générales. Alors que des géométries et des phénomènes complexes nécessitent la modélisation avec des équations complexes et des conditions aux limites.

Les couplages multi physiques peuvent être réalisés à partir de différents logiciels spécialisés : des logiciels dédiés à la modélisation des fluides (CFD pour Computational Fluid

Dynamics) comme FLOTHERM, ceux dédiés à la mécanique de solides (CSM pour Computational Solid Mechanics) comme ANSYS, et ceux dédiés aux calculs électromagnétiques (CEM pour Computational Electromagnetics) comme HFSS. Récemment, on a vu apparaître sur le marché des logiciels dédiés aux couplages multi physiques dans le domaine des microsystèmes. On peut citer : ANSYS, COMSOL Multiphysics, ANSOFT, FLOMERICS et PHYSICA entre autres [154].

Dans ce travail de thèse, on a choisi le logiciel COMSOL Multiphysics pour réaliser la modélisation du capteur de pression PSFET, car il est bien conçu, rapide, facile à utiliser, COMSOL Multiphysics répond aux défis de la simulation multi physiques. Résoudre des modèles complexes de plus de 10 millions de degrés de liberté, coupler arbitrairement n'importe quelle équation, modifier à loisir les modes d'application prédéfinis, tout en restant transparent à l'utilisateur.

IV.4.1 Méthodologie de conception et modélisation sous COMSOL

La conception du modèle numérique fait appel à des équations à dérivées partielles gouvernant le comportement de notre système nommé modèle EDP sous COMSOL Multiphysics. Afin d'analyser le comportement électromécanique de notre capteur de pression PSFET, nous introduisons toutes les variables, les constantes et les conditions aux limites nécessaires.

La conception d'un capteur de pression PSFET à détection capacitive nécessite une compréhension fine des physiques impliquées, en prenant en compte le couplage entre différents phénomènes. Le modèle global est composé de deux sous modèles élémentaires :

- Le modèle électromécanique pour simuler la déflexion de la membrane, le changement de capacité grille et Épaisseur équivalente de l'oxyde (EOT) en fonction de la pression appliquée qui est la variable de couplage.
- le modèle semi-conducteur pour simuler la réponse du capteur en fonction de la pression appliquée.

La figure IV. 12 résume les étapes effectuées pour pouvoir simuler le modèle sous environnement COMSOL Multiphysics.

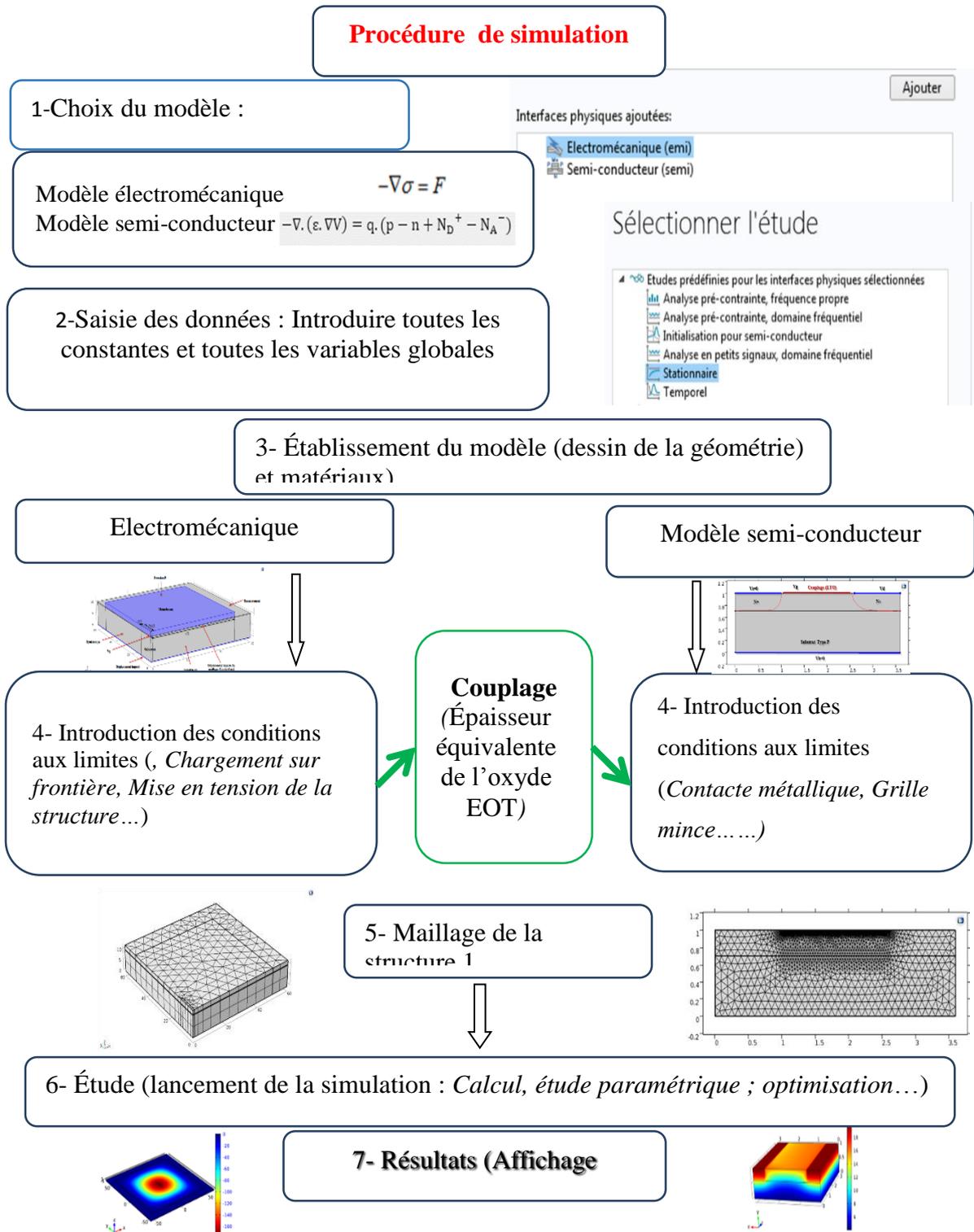


Figure IV.12 : Étapes de simulation sous environnement COMSOL Multiphysics.

A. Comportement électromécanique

L'interface électromécanique sous l'environnement COMSOL permet de résoudre les équations électriques conjointement avec celles de la mécanique des structures. Cette interface est utilisée pour la modélisation des dispositifs MEMS, ainsi que pour les capteurs à base d'une capacité qui détectent les déformations structurelles [54].

Le modèle contient trois modules physiques : mécanique des structures, maille en mouvement et l'électrostatique.

Dans un premier temps, la mécanique des structures est utilisée pour réaliser la déformation de la membrane lorsqu'elle soumise à une pression. La déformation des matériaux élastiques linéaires soumis à des charges externes est décrite par l'équation du mouvement :

$$\rho \ddot{u} = \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma} + \bar{F}_v \quad (\text{IV.32})$$

Où ρ est la masse volumique, u est le vecteur déplacement, σ est le tenseur des contraintes, F_v représente les forces de volume.

Dans notre travail, on s'intéressera essentiellement aux problèmes statiques. L'équation du mouvement devient alors l'équation d'équilibre [54] :

$$-\vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma} = \bar{F}_v \quad (\text{IV.33})$$

L'équation IV. 34 représente la relation contrainte-déformation

$$\sigma = \sigma_0 + C : (\varepsilon - \varepsilon_0 - \alpha(T - T_{ref})) \quad (\text{IV.34})$$

Où C : est le tenseur d'élasticité qui est donné par :

$$C = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.35})$$

σ_0 sont les contraintes initiales, ε_0 les déformations initiales, α est le coefficient de dilatation thermique (CTE), T est la température et T_{ref} est la température de référence.

Ensuite, la maille en mouvement permet au maillage de se déplacer lorsque la membrane est déformée. Enfin, le module électrostatique est utilisé pour le calcul de la capacité. L'équation régissant la capacité est obtenue à partir de l'énergie du champ électrique, que l'on peut exprimer comme suit [23] :

$$C = \frac{2}{V^2} \int W_e d\Omega \quad (\text{IV.36})$$

Où V est la tension appliquée sur une électrode, Ω est la zone déformée correspondante à l'entrefer étroit dans le capteur et W_e est la densité de l'énergie électrique.

□ Les conditions aux limites

La géométrie de la partie électromécanique du capteur de pression étant symétrique. Dans le but de gain de temps et d'espace mémoire, nous utilisons la symétrie de notre structure, pour ne simuler que son quart. Le quart du capteur a été mis en place depuis le modèle de la mécanique des structures en utilisant l'interface de l'électromécanique.

Les conditions aux limites sont les suivantes (Figure IV.13) :

- Une pression uniforme et constante est appliquée sous la membrane
- Une condition de symétrie est appliquée sur les parties correspondantes.
- À partir de nœud déplacement imposé du maillage, on impose un maillage mobile selon la direction de la pression appliquée sur le domaine de cavité d'air.
- À partir de nœud déplacement imposé, on impose un déplacement nul suivant, les trois axes x , y et z ($u_x = 0$, $u_y = 0$, $u_z = 0$) ; sur le substrat.
- On applique une tension V_g à la grille suspendue du NMOS.

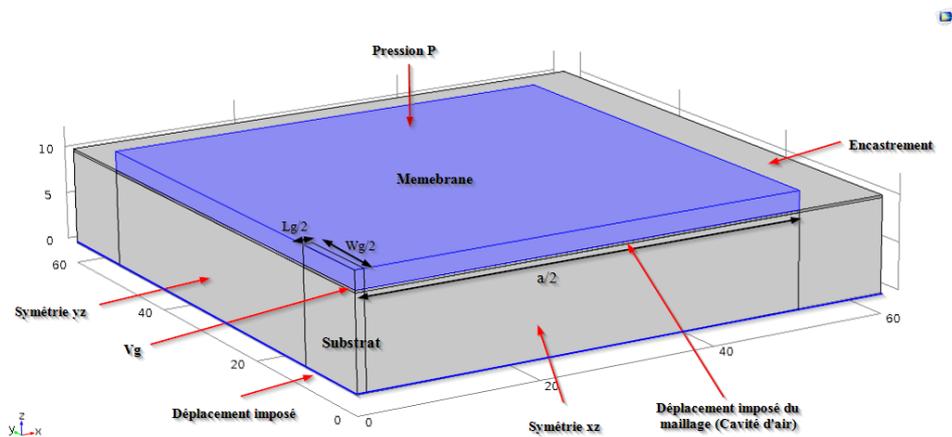


Figure IV.13 : Conditions aux limites pour le modèle électromécanique d'un quart de la structure.

□ Maillage

La modélisation par éléments finis permet en plus d'obtenir des résultats en tout lieu d'un espace autour et au sein du système étudié. Le découpage en mailles et en nœuds de chaque partie du dispositif lors du maillage permet suivant les besoins d'affiner l'analyse en certains endroits en diminuant la taille du découpage par l'augmentation du nombre de maille. Il a fallu comme dans toute utilisation de ce type de simulation, rechercher le meilleur compromis entre la finesse des calculs réalisés et le temps mis. Ce dernier augmente avec le nombre de mailles utilisées et donc avec la précision spatiale recherchée dans les résultats [155].

Dans notre cas, nous pouvons mailler la structure 3D directement avec des cellules de forme tétraèdre (Figure IV.14.(a)). Dans le but de gain de temps et d'espace mémoire, notre choix a été de mailler d'abord une géométrie 2D de la surface supérieure de la géométrie au triangle libre, et puis d'extruder ce maillage vers une géométrie 3D de forme hexaèdre ((Figure IV.14.(b))).

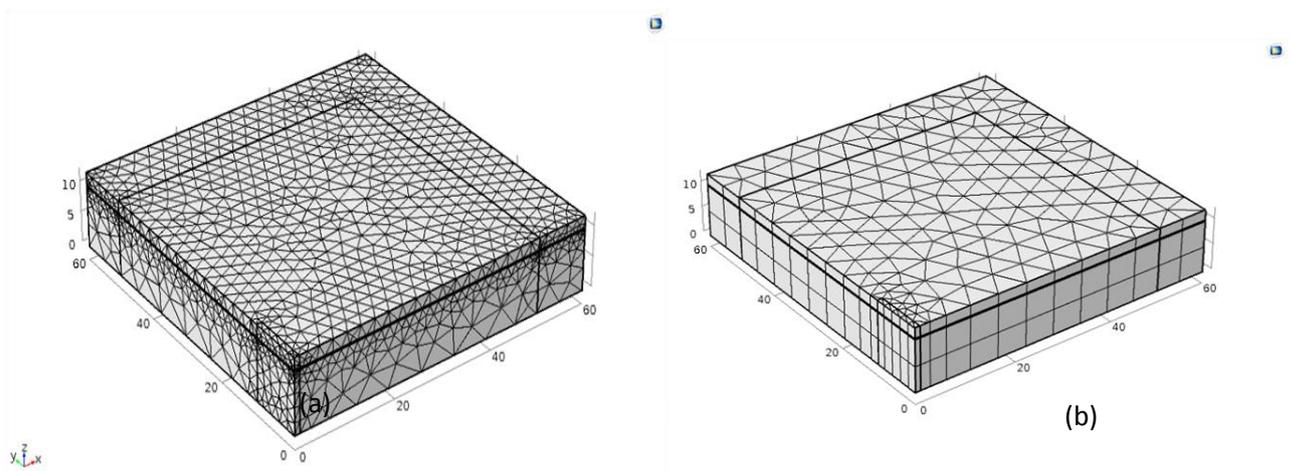


Figure IV.14 : Maillage du capteur a) maillage direct b) Procédé d'extrusion du maillage 2D vers une géométrie 3D.

Nous avons réalisé une étude indépendante afin de préciser la forme de maillage optimale de notre cas. Dans la figure IV.15, les courbes représentent les variations la déflexion maximale au centre de la membrane w_0 en fonction de la pression appliquée pour les deux types de maillage. On notera que l'allure de ces courbes est similaire. Le tableau IV.2 présente les statistiques sur le maillage étudié est temps de simulation. Le compromis entre temps de simulation et précision est trouvé dans notre choix de maillage.

Configuration	Extrusion du maillage 2D vers une géométrie 3D	Maillage direct 3D tétraèdre
N° éléments de domaine	700	8209
N° éléments de frontière	908	3474
N° éléments d'arête	248	452
N° de degrés de liberté résolus	12972	49424
Durée du calcul	1 minute, 19 secondes	6 minutes, 19 secondes

Tableau IV.2 : Caractéristiques des maillages présentés sur la Figure IV.14.

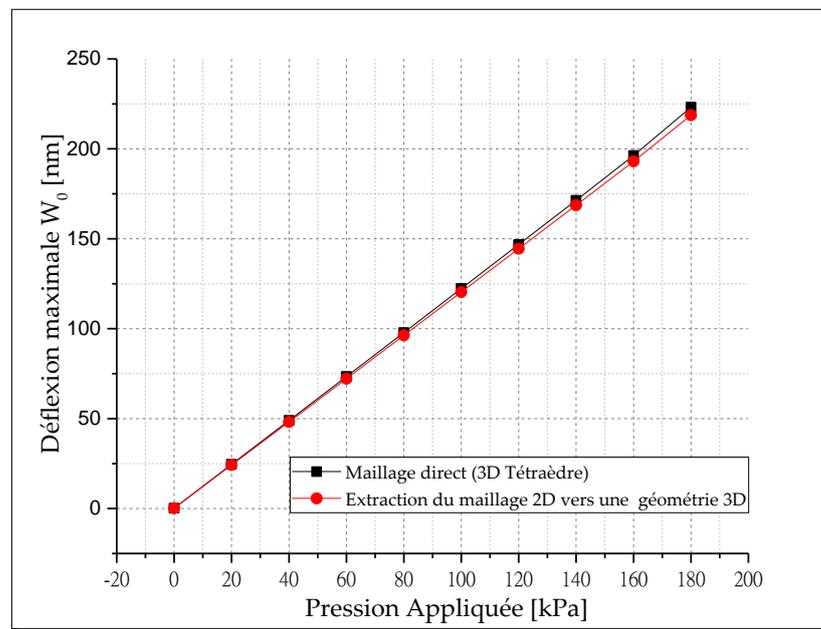


Figure IV.15 : Déflexion maximale de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée.

B. Comportement semi-conducteur

Le module Semi-conducteur est conçu pour simuler des composants semi-conducteurs à des échelles de l'ordre de quelques centaines de nm ou plus, modélisé au travers d'une approche classique de dérive-diffusion avec des équations aux dérivées partielles. Plusieurs interfaces physiques spécifiques permettent de préciser les données d'entrée, les équations et les conditions aux limites. Il s'agit d'interfaces servant à modéliser le transport d'électrons et de trous dans les composants semi-conducteurs et leur comportement électrostatique. Il est

également possible de coupler une simulation de semi-conducteurs avec un circuit électrique au format SPICE [156].

De façon très brève, nous pouvons dire que cette simulation constitue la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique, elle est basée sur les trois équations suivantes [157, 158] :

✓ **Équation de Poisson** : l'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs :

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \cdot \nabla V) = q \cdot (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (\text{IV.37})$$

Où ϵ_0 et ϵ_r sont respectivement la permittivité du vide et la permittivité relative du matériau, q est la valeur absolue de la charge élémentaire de l'électron, N_D^+ et N_A^- est la densité des ions donneurs et accepteurs, n est la densité d'électrons libres, et p est la densité de trous libres.

✓ **Équations de continuité** : l'équation de continuité et l'équation de transport relient les concentrations locales de charges aux phénomènes de transport et aux mécanismes de génération-recombinaison.

L'équation de continuité est donnée séparément pour chacun des deux types de porteurs de charge par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n &= GR_n \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p &= GR_p \end{aligned} \quad (\text{IV.38})$$

Où R_n , R_p sont respectivement les taux de recombinaison des électrons et des trous, j_n et j_p sont les densités de courant des électrons et des trous et G est le taux de génération.

✓ **Équations de transport** : Le module Semiconductor résout les équations (IV.37) et (IV.38) en utilisant les définitions de J_n et J_p données dans l'équation (IV.39) à l'aide de la discrétisation par la méthode des volumes finis qui conserve intrinsèquement le courant dans la modélisation des composants semi-conducteurs. Ce module s'appuie sur un schéma

Scharfetter-Gummel en amont pour les équations des porteurs de charge. Les densités de courant sont est définies par :

$$\begin{aligned} J_n &= n\mu_n \nabla E_c + \mu_n k_B T \nabla n + \frac{1}{2} n \mu_n k_B \nabla T \\ J_p &= p\mu_p \nabla E_v + \mu_p k_B T \nabla p - \frac{1}{2} p \mu_p k_B \nabla T \end{aligned} \quad (\text{IV.39})$$

□ Les conditions aux limites (figure IV.16)

L'interface de physique des semi-conducteurs est utilisée pour configurer un problème de simulation. Chaque interface physique exprime les phénomènes physiques pertinents sous la forme d'ensemble d'équations différentielles partielles ou ordinaires, ainsi que des conditions limites et initiales appropriées.

- Contact métallique pour drain, source et base.
- Grille mince pour la grille suspendue avec un couplage au module électromécanique avec la variable EOT.
- Utiliser le modèle de dopage analytique pour définir le type et la concentration de dopage dans chaque domaine du modèle.

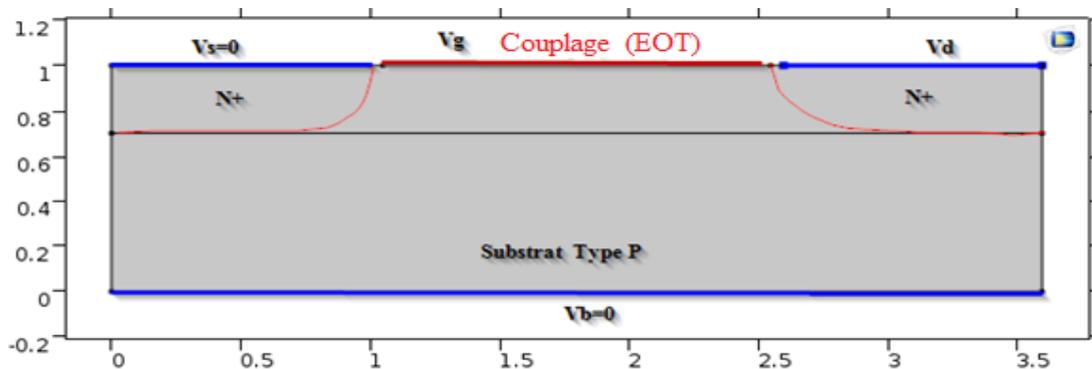


Figure IV.16 : Conditions aux limites pour le modèle semi-conducteur.

□ Maillage

La méthode des éléments finis autorise l'utilisation d'une large variété de polyèdres. La génération automatique de maillages quadrangulaires et polygonaux pour des domaines et des surfaces est encore un défi scientifique en raison de la grande variété de critères et de la qualité recherchée.

Le logiciel COMSOL Multiphysics propose des outils de maillage automatique. Un maillage automatisé contrôlé par la physique, ce qui facilite le travail des utilisateurs et réduit le temps nécessaire à l'élaboration d'un maillage efficace. Implémenté tout d'abord pour les

interfaces physiques, le maillage est défini automatiquement en fonction de la physique. La figure IV. 17 représente le maillage de NMOS étudié.

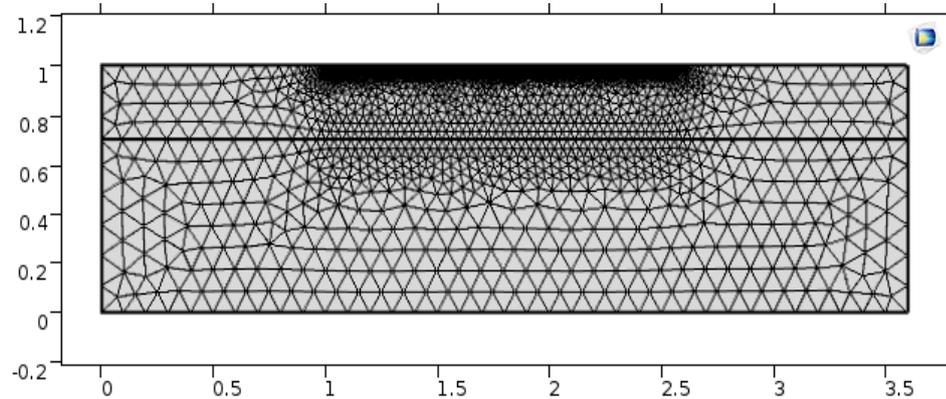


Figure IV.17 : Maillage NMOS.

C. Validation du modèle

Comme la validation du modèle est une étape essentielle dans la Méthodologie de conception et de modélisation sous COMSOL. Nous avons opté pour la comparaison de nos résultats à ceux obtenus par d'autres auteurs ou d'autres logiciels.

Pour valider notre modèle, les caractéristiques obtenues ont été comparées favorablement avec celles obtenues en utilisant le logiciel de simulation numérique réalisée grâce au logiciel commercial SILVACO-TCAD qui est un simulateur de dispositifs capable de prédire le comportement et les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs, cependant il ne modélise pas l'effet mécanique (la pression).

Pour cela, nous avons calculés l'épaisseur de la cavité d'air (d_0) en fonction de la pression pour chaque pression. Cette valeur est alors introduite dans la simulation sous SILVACO. Cette étape intermédiaire nous a permis l'application de la sollicitation externe, une pression P constante et uniforme sur le dispositif.

Paramètre	Valeur
l'épaisseur initiale de la cavité d'air d_0 (nm)	250
Épaisseur de l'oxyde (T_{ox}) (nm)	30
Dopage Substrat (cm^{-3})	1×10^{15}
X_j (nm)	300

Tableau IV.3 : Paramètres de NMOS de la technologie 1.5 μm .

a- Caractéristiques I-V du PSFET au repos ($P=0$)

La validation des résultats de la modélisation du PSFET au repos permet, d'une part de vérifier la précision du modèle (caractéristiques électriques). D'autre part, d'aller vers l'utilisation du modèle dans la simulation en fonction de la pression appliquée.

La structure complète du PSFET simulée sous SILVACO et le profil de dopage est représentée sur la figure (IV.18). Le plan (x y) correspond aux dimensions de la structure et la variation de la couleur donne le niveau de dopage en fonction de ses coordonnées.

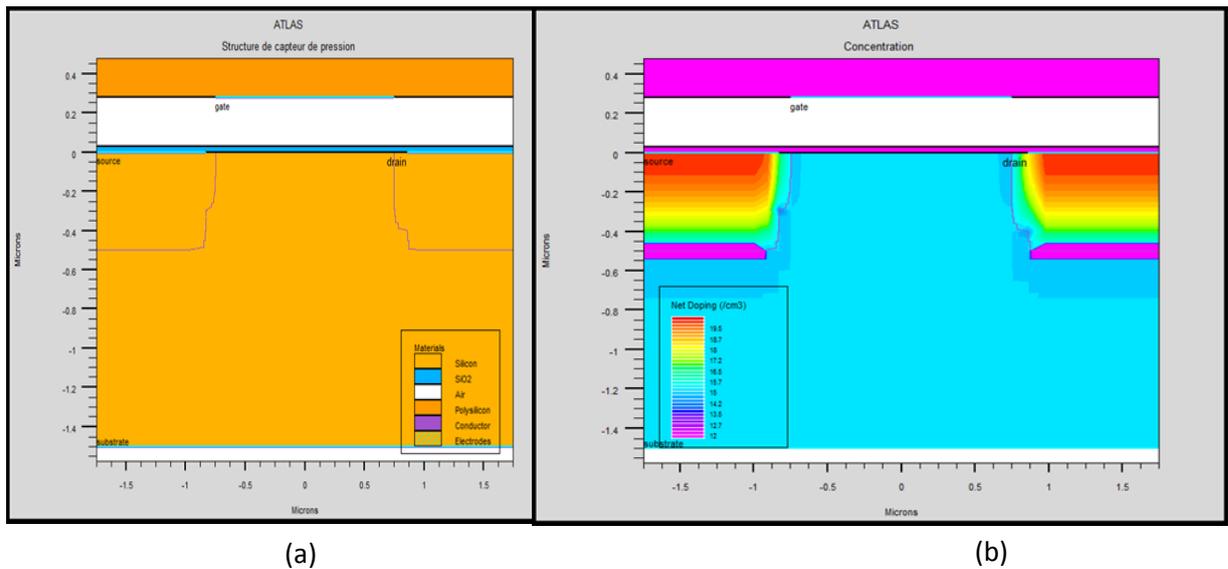


Figure IV.18 : (a) Structure (b) Dopage du PSFET simulé sous SILVACO.

Sur la Figure. IV.19, nous comparons la caractéristique courant- tension I_D (V_g) du dispositif au repos calculée par le modèle FEM sous COMSOL avec celle obtenue via la simulation numérique sous SILVACO-ATLAS-TCAD, pour une tension de drain constante $V_d=0.1V$ et une tension de grille V_g varie de 0 à 5 V. On peut nettement voir que la caractéristique courant- tension I_D (V_g) obtenue avec le calcul FEM est en bon accord avec celle obtenue via le calcul numérique sous SILVACO.

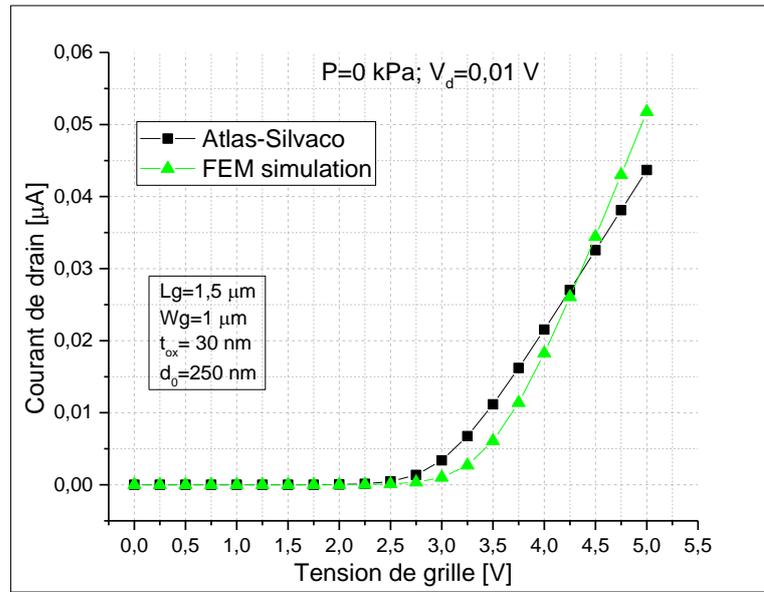


Figure IV.19 : caractéristiques I_D - V_g du PSFET au repos.

- **Réponse $I_D = f(P)$ du PSFET**

Afin de valider le modèle établi au repos, nous avons étudié la réponse du capteur en fonction de la pression appliquée.

Dans la figure IV.20, les courbes représentent les variations de courant de drain I_D en fonction de la pression appliquée P . La comparaison de nos résultats calculés par le modèle FEM avec ceux obtenus via la simulation numérique sous SILVACO-ATLAS-TCAD et le modèle GUI, sont pratiquement similaires. Ce qui permet de valider notre modèle.

On constate que le modèle établi dans la littérature par James T et al [133] Baishya et al [106] présente un seuil significatif, qui est probablement due à la négligence de l'effet de l'oxyde du NMOS dans ce modèle.

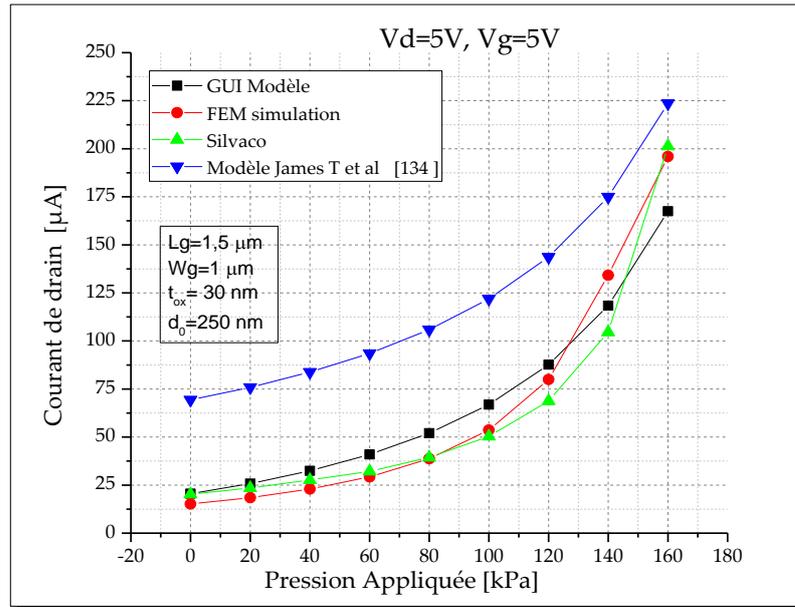


Figure IV.20 : Courant de drain I_D en fonction de la pression appliquée.

IV.4.2 Étude du PSFET en technologie CMOS 2 µm

Lors de cette simulation on a considéré une membrane de forme carrée d'une longueur $a = 100 \mu\text{m}$ et d'une épaisseur $d=2 \mu\text{m}$. L'épaisseur de cavité d'air est de 250 nm. Le matériau de la membrane est du polysilicium (module de Young $E=160 \text{ GPa}$, coefficient de Poisson ν est de 0.22 et la masse volumique de 2320 kg/m^3) [98].

La technologie CMOS 2 µm est utilisée pour la simulation du NMOS : les paramètres de cette technologie sont représentés dans le tableau IV.4. [117, 159, 160]. Le dopage faible de substrat d'ordre de $1 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-3}$ est le plus adapté dans ce type de capteur [105].

Paramètre	Valeur
Épaisseur de l'oxyde, T_{ox} (nm)	40
Largeur du canal, W_g (µm)	20
Mobilité des électrons, μ_n ($\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$)	1450

Tableau IV.4 : Paramètres de NMOS de la technologie 2 µm.

Dans ce type de capteurs, la membrane déformable est utilisée comme grille suspendue d'un transistor MOSFET. L'étude de la déformation de la membrane qui est l'élément sensible du capteur de pression est très importante dans le positionnement de la grille suspendue afin d'obtenir une réponse optimale et une valeur maximale de la sensibilité à la pression. La

figure IV.21 représente la courbe de variation de déformation $w(x, y)$. Ces résultats montrent que la déflexion de la membrane est maximale au centre, qui est conforme à ceux établis dans la littérature [142, 161].

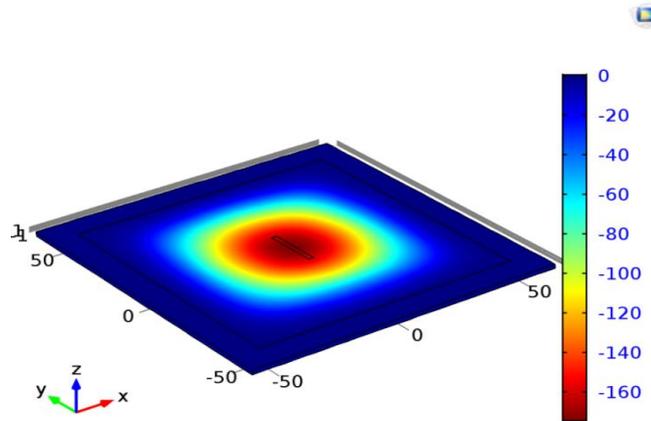


Figure IV.21 : Vue 3D de la déflexion $w(x, y)$ de la membrane pour $P=140$ kPa.

Pour une meilleure sensibilité à la pression il est clair que la position aux au centre de la membrane, est la position optimale de la grille suspendue, pour la conception des capteurs de pression PSFET à détection capacitive.

Pour une meilleure appréciation de la déflexion $w(x, y)$ en tout point de la membrane, ses variations le long de l'axe x sont représentées sur la figure IV.22 pour différentes valeurs de la pression appliquée.

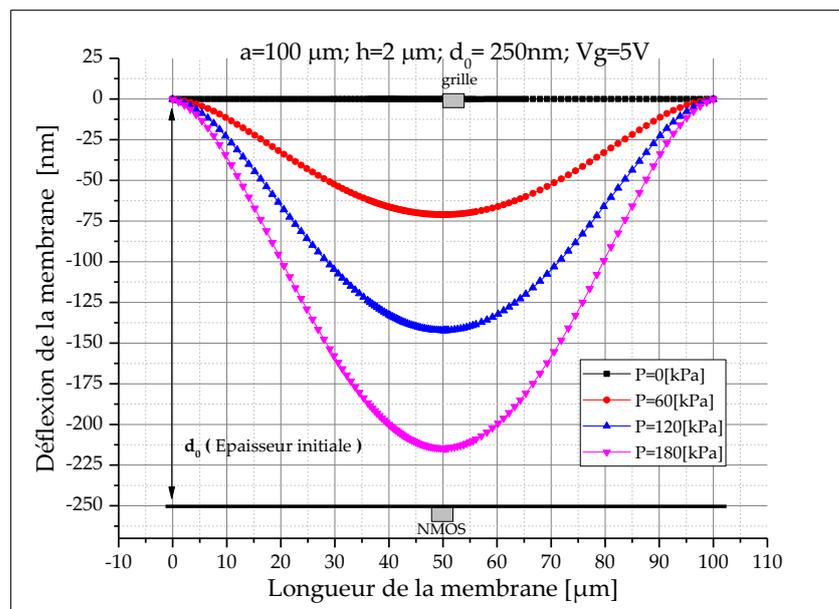


Figure IV.22 : Déflexion de la membrane fonction de la position axiale x pour $P \neq 0$.

L'application d'une tension de grille suspendue V_g génère une pression électrostatique P_{es} entre la membrane et le substrat séparé par l'air donné par [105] :

$$P_{es} \approx \frac{1}{2\epsilon_0} C_{gaw}^2 (V_g - V_{TO})^2 \quad (\text{IV.40})$$

Pour évaluer la déflexion suspendue de la membrane provenant de la force électrostatique, nous avons étudié le capteur au repos ($p=0$) avec différentes valeurs de tension de grille de zéro à 5 V. La figure IV.23 représente la courbe de variation de la déflexion de la membrane le long de l'axe x de cette étude. On rappelle que les forces électrostatiques sont ajoutées automatiquement dans notre module de simulation.

De la même manière qu'au travail précédent [105], les résultats montrent que l'effet de la force électrostatique peut être négligé dans ce type des capteurs. Cet avantage améliore les performances de ce dernier comparé au capteur de pression capacitif. Où la présence d'une force électrostatique peut entraîner une erreur systématique dans la pression mesurée et finalement une défaillance du capteur [162].

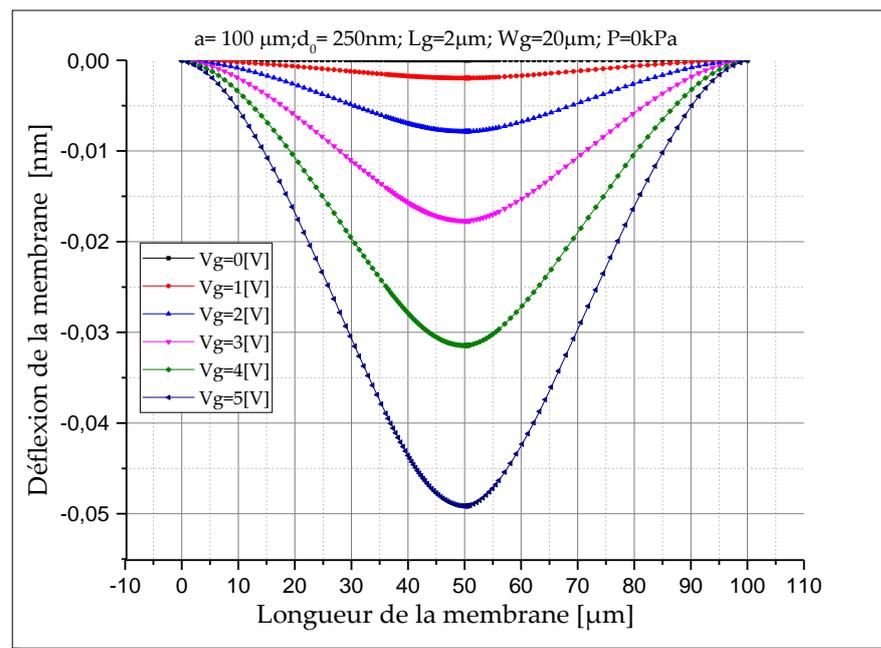


Figure IV.23 : Déflexion de la membrane fonction de la position axiale x pour $\neq V_g$.

Le phénomène de collage « *pull-in* » est géré par la force électrostatique et la force mécanique agissant sur la grille suspendue. Pour trouver la tension statique de collage « *pull-in* », la force électrostatique d'attraction est supposée être égale à la force de rappel, ce qui définit la gamme de fonctionnement stable du dispositif lorsque $V_g < V_{pi}$ [89, 163]. Cet effet de

pull-in permet l'utilisation le capteur de pression comme un commutateur MEMS dans certaines applications [164-166].

La tension de pull-in est donnée par [165] :

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8k_m \left(1 + \frac{C_{gate}}{C_{air}}\right)^2 d_0^3}{27\epsilon_0 L_g W_g}} \quad (IV.41)$$

où K_m est le coefficient de raideur de la membrane, donné par [61] :

$$k_m = Eh^3 \frac{b}{a^3} \quad (IV.42)$$

La figure IV.24 présente la variation de la tension pull-in en fonction de la pression appliquée. Cette courbe nous permet de renforcer l'hypothèse de négliger la force électrostatique dans ce type de capteurs.

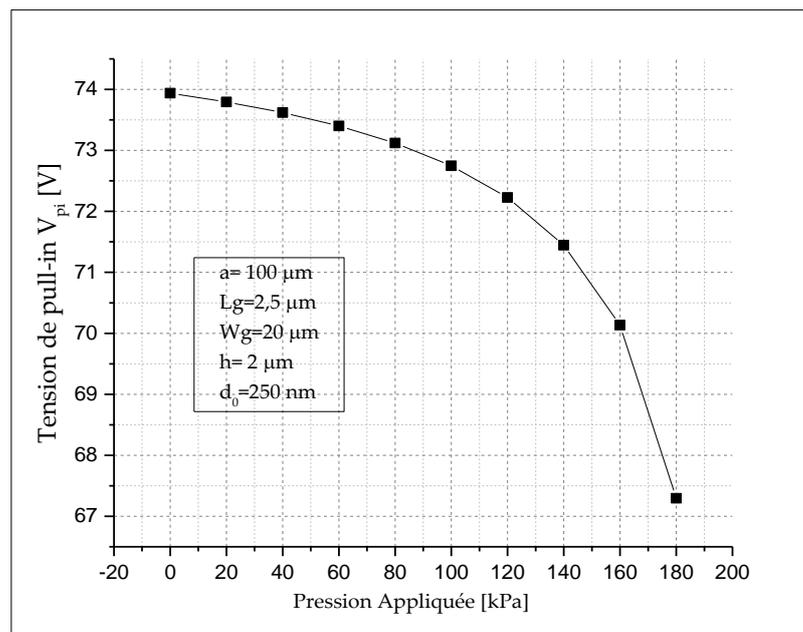


Figure IV.24 : Variation de la tension pull-in en fonction de la pression appliquée.

La Figure IV.25 montre les variations de la capacité de grille par unité de surface C_{gate} et de la tension de seuil V_T en fonction de la pression appliquée.

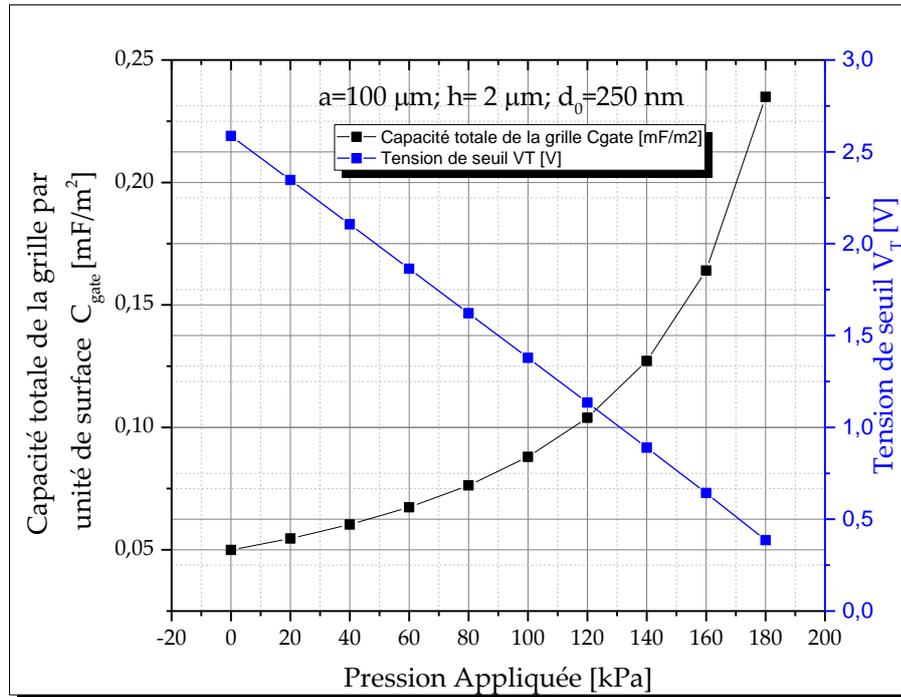


Figure IV.25 : Variations de la capacité de grille et de la tension de seuil du capteur en fonction de la pression appliquée.

À partir de cette courbe on peut constater que :

- La capacité de grille par unité de surface est proportionnelle à la pression appliquée.
- La tension de seuil du transistor MOSFET V_T est inversement proportionnelle à la pression appliquée. Ce phénomène de réduction de la tension de seuil avec l'augmentation de la pression appliquée, est appelé « Effet de modulation de tension de seuil » (Variation de la tension de seuil sans modifier aucun paramètre électrique du NMOS).

Afin d'avoir une plus grande sensibilité possible, nous avons réglé le NMOS en régime de saturation. Après la polarisation par une tension de grille $V_g = 3\text{V}$ supérieure à la tension de seuil du capteur au repos ($V_T = 2.6 \text{ V}$) et une tension de drain $V_d = 5\text{V}$, on remarque que l'allure courbée du canal et le phénomène de pincement (figure IV.26(b)) et le transistor est en régime de saturation.

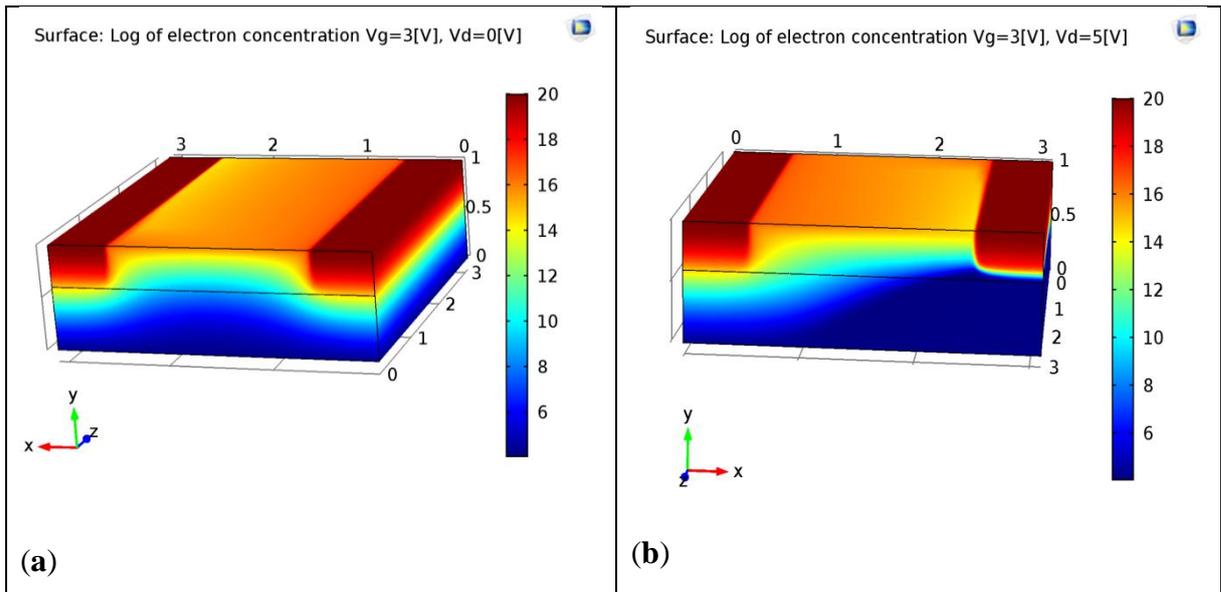


Figure IV.26 : Concentration de NMOS simulée pour $\neq V_d$

La figure IV.27 montre que le courant de sortie du capteur PSFET est proportionnel à la pression appliquée, conformément au modèle analytique.

À partir de cette figure, on constate que le courant de sortie du capteur de pression PSFET varie de 355 à 3624 μA quand la pression varie de 0 à 180 kPa. On note que la sensibilité du capteur est de 15,18 $\mu\text{A} / \text{kPa}$.

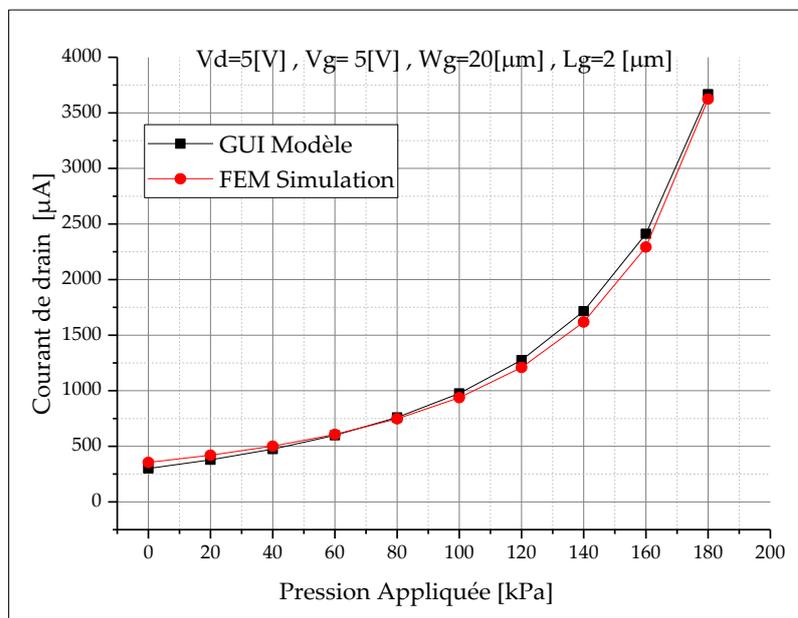


Figure IV.27 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée.

Chaque micro capteur de pression présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces caractéristiques sont l'étendue de mesure, la sensibilité à la pression, la linéarité et la sensibilité à la température.

Nous utilisons l'expression de la sensibilité Eq.I.1 établie au chapitre I qui peut se mettre sous la forme :

$$S_p(p) = \frac{1}{I_{D_{sat}}} \frac{\partial I_{D_{sat}}}{\partial P} \quad (\text{IV.43})$$

La sensibilité à la pression $S(p)$ peut être définie analytiquement comme la pente de la droite linéaire des moindres carrés de la courbe de réponse du capteur ($I_{D_{sat}} - P$) [94]. La non linéarité de la réponse en pression (NL) est calculée en faisant la différence entre un courbe de réponse du capteur ($I_{D_{sat}} - P$) et la droite des moindres carrés de ces mêmes points. Nous exprimerons cette différence en pourcentage, qui est donnée par [74] :

$$NL(\%) = \frac{|\Delta I_{D+}| + |\Delta I_{D-}|}{2(I_{D_{max}} - I_{D_{min}})} \times 100 \quad (\text{IV.44})$$

Où : ΔI_{D+} et ΔI_{D-} sont l'écart maximal et minimal par rapport aux caractéristiques de la droite au sens des moindres carrés, respectivement, $I_{D_{max}}$ et $I_{D_{min}}$ sont la réponse maximum et minimum dans l'étendue de la mesure de pression.

La sensibilité et la non linéarité du capteur de pression dépendent de l'étendue de la mesure de pression sur laquelle on a effectué les mesures. Le tableau IV.5 montre comment peuvent évoluer ces caractéristiques en fonction de P (E.M.).

P (E.M.)	60 [kPa]	100 [kPa]	140 [kPa]	180 [kPa]
Sensibilité ($\mu\text{A} / \text{kPa}$)	4,18	5,71	8,46	15,18
Non linéarité %	4,33	8,74	15,28	27,52

Tableau IV.5 : Évolution des caractéristiques S et NL en fonction de l'étendue de la mesure de pression considérée (E.M).

Nous pouvons remarquer que ce type de capteur possède une réponse d'autant plus non linéaire que la plage de mesure s'étend. En revanche, augmenter cette étendue de mesure améliore autant la sensibilité à la pression.

Conformément aux caractérisations métrologiques du capteur, nous avons étudié la dérive thermique de capteur. Afin de connaître l'effet de la température sur la réponse du

dispositif, nous avons simulé l'évolution du courant de sortie du capteur en fonction de la pression pour différentes valeurs de la température entre 0 °C et 100 °C (figure IV.28).

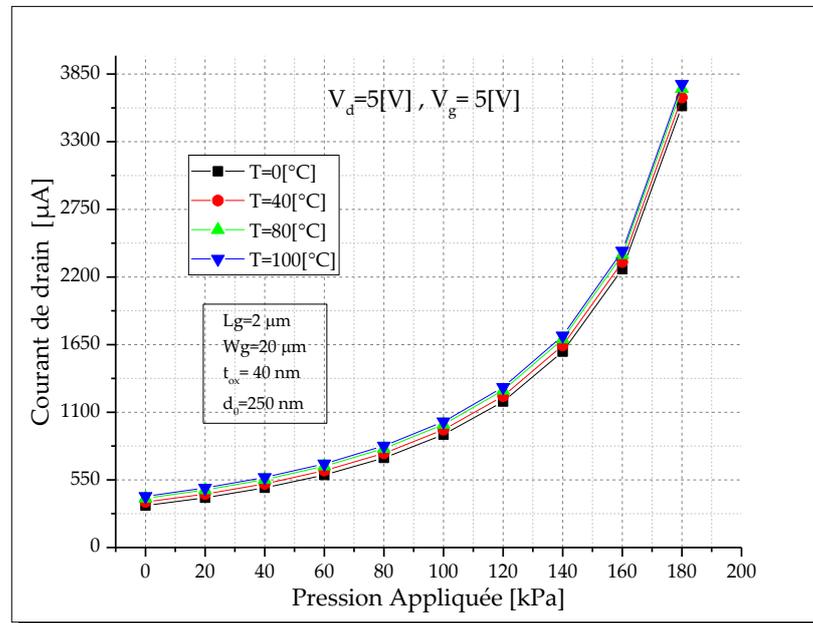


Figure IV.28 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée pour diverses températures.

Nous pouvons remarquer que, sur ces plages de pression et de température ce capteur a un coefficient de température de sensibilité (TCS) presque stable de $0.052 \mu\text{A} / \text{kPa} / ^\circ\text{C}$. Cette constatation est similaire aux études précédentes sur ce type de capteurs [40, 96, 134].

Un autre paramètre important est le coefficient de température de l'offset (TCO). La figure IV.29 représente la variation de « l'offset » en fonction de la température entre 0 °C et 100 °C. Cette figure montre que le courant d'offset est proportionnel à la température, car ce type du capteur considère comme un dispositif MOS qui présente un coefficient de température positif. La dérive de l'offset pouvant être considérée comme linéaire, le coefficient de température est constant de valeur : $\text{TCO} = 0,22 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

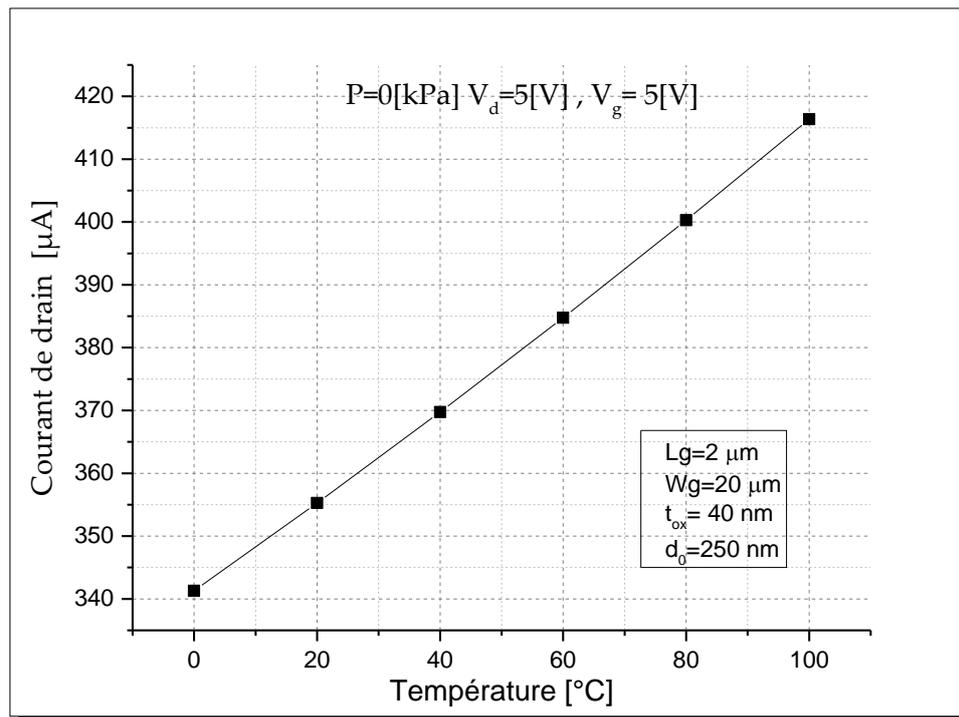


Figure IV.29 : Dérive thermique de « l'offset ».

Généralement, l'effet de la température est néfaste sur les circuits électroniques CMOS. Différentes techniques de conception sont disponibles pour atténuer ces effets à haute température dans l'électronique CMOS. Parmi lesquelles on peut citer l'utilisation des circuits d'interface différentielle qui fournissent une réponse stable sur une large plage de températures [167].

IV.4.3 Étude en fonction du facteur de forme du diélectrique MOSFET

La première partie de cette modélisation consiste dans l'étude de la structure de base d'un capteur de pression PSFET à détection capacitive où la capacité totale du NMOS peut être considérée comme une association série de deux condensateurs C_{ox} et C_{air} .

On rappelle que la capacité totale de la grille par unité de surface C_{gate} en fonction de la pression appliquée et le facteur de forme de diélectrique f_0 dans notre modèle analytique sont donnés par (Eq. IV.13) :

$$C_{gate} = \varepsilon_0 f_0 (1 - \alpha f_0 P)^{-1} \quad , \quad f_0 = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox} + \varepsilon_{ox} d_0}$$

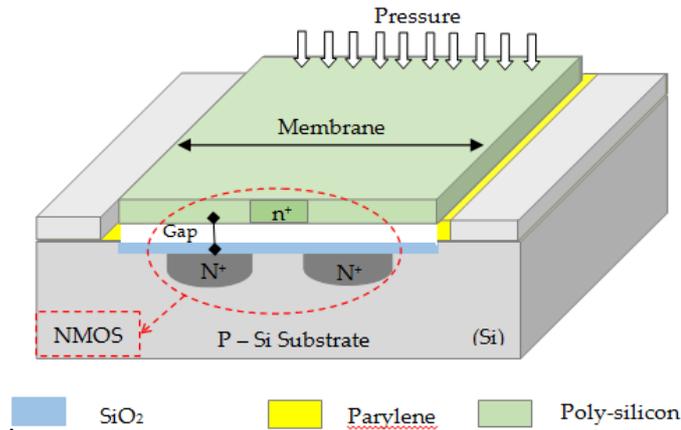


Figure IV.30 : Structure de base d'un PSFET à capacitif.

Il y a plusieurs structures du capteur de pression PSFET à détection capacitive. La différence entre ces structures se caractérise dans l'utilisation de diverses structures de diélectrique de la grille suspendue du MOSFET [90, 93, 99, 165].

Notre modèle analytique est adapté pour décrire diverses structures de diélectrique de la grille suspendue du MOSFET par le facteur de forme de diélectrique f_0 .

La figure IV.31 représente la structure de base du capteur PSFET à détection capacitive composé d'un oxyde de protection (Si_3N_4) ; la capacité totale de NMOS peut être considérée comme une association série de trois condensateurs C_{ox} , C_{air} et $C_{Si_3N_4}$.

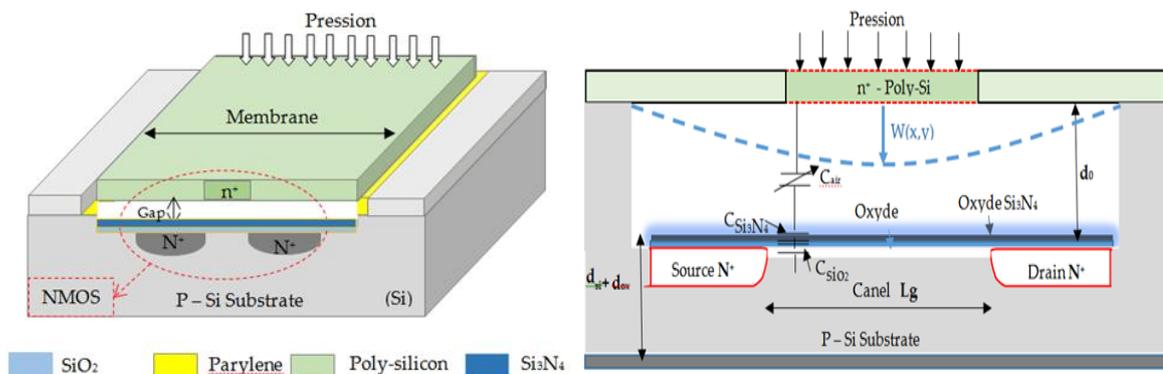


Figure IV.31 : Structure de base du capteur composé d'un oxyde de protection.

Le facteur de forme de diélectrique f_0 dans ce cas est donné par :

$$f_0 = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_{Si_3N_4}}{\epsilon_{Si_3N_4} t_{ox} + \epsilon_{ox} t_{Si_3N_4} + \epsilon_{Si_3N_4} \epsilon_{ox} d_0} \quad (IV.45)$$

Où $\epsilon_{Si_3N_4}$ et $t_{Si_3N_4}$ sont la permittivité relative et l'épaisseur de l'oxyde Si_3N_4 .

La structure similaire au capteur fabriquée par Dai *et al* [104], composée d'un oxyde de NMOS et une membrane diélectrique comme le montre la figure IV.32 ; la capacité totale de

NMOS peut être considérée comme une association série de trois condensateurs C_{ox} , C_{air} et C_{ox} .

Le facteur de forme de diélectrique f_0 dans ce cas est donné par :

$$f_0 = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox1} + t_{ox2} + \epsilon_{ox}d_0} \tag{IV.46}$$

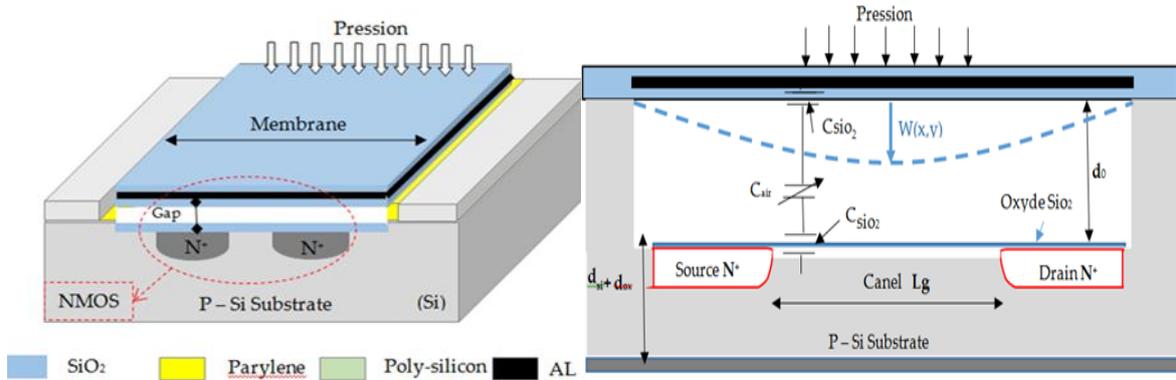


Figure IV.32 : Structure de base avec une membrane diélectrique.

Nous avons effectué une étude comparative des trois structures de PSFET, la figure IV.33 représente la réponse du capteur pour chaque structure modélisée. On voit bien que l'utilisation de l'oxyde de protection (Si_3N_4) ne change pas la sensibilité du capteur.

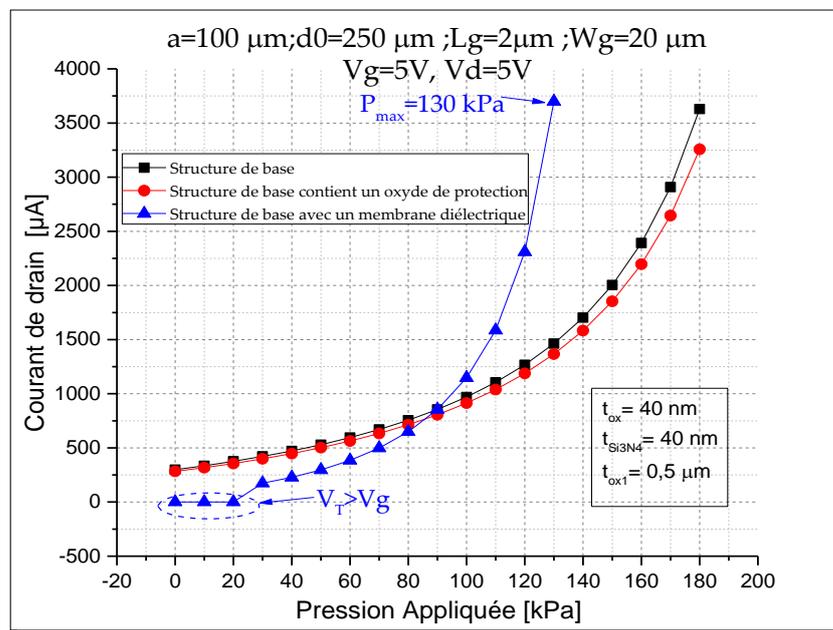


Figure IV.33 : Réponse du capteur PSFET pour différentes architectures

Dans la structure similaire au capteur fabriquée par *Dai et al* [99], la membrane diélectrique est une membrane composite $SiO_2/Al/SiO_2$. La partie diélectrique du capteur influence directement les propriétés mécaniques dans le corps d'épreuve, ce qui change les caractéristiques du capteur.

Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'importance de l'utilisation du facteur de forme. En effet nous pouvons alors simuler n'importe quelle structure sans avoir à modifier la structure pré établi.

IV.5 Optimisation du capteur

La phase d'optimisation d'un microcapteur est très importante parce qu'elle affecte la réussite du projet, elle est menée par des simulations sur des logiciels puissants. Ces derniers offrent la possibilité d'effectuer de nombreuses simulations dans un temps très court, permettant également d'estimer l'influence du procédé technologique sur les performances du capteur [31].

IV.5.1 Etude des paramètres géométriques de la membrane

Pour déterminer l'effet de la forme de la membrane sur la réponse et la sensibilité du capteur de pression PSFET, trois formes de la membrane (carrée, rectangulaire, circulaire) en polysilicium sont modélisées en gardant la même surface de la membrane " A " (figure IV.34). La technologie CMOS 2 μm est utilisée pour la simulation du NMOS déjà utilisés voir le tableau IV.4. Les paramètres géométriques sont regroupés dans le tableau IV.6.

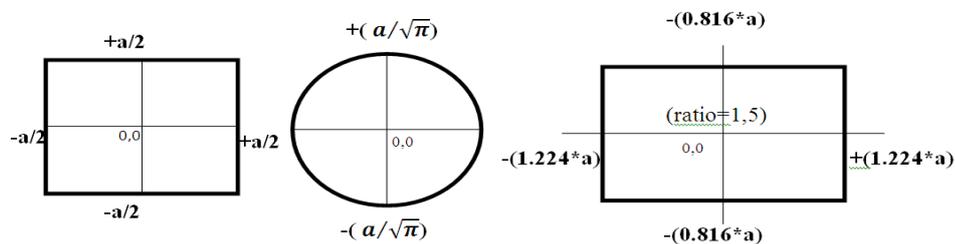


Figure IV.34 : Différentes formes de la membrane du capteur de pression PSFET [94].

Paramètres	Carrée	Rectangulaire (rd =1.5)	Circulaire
Dimensions (μm)	Coté $a = 100$	Largeur $a = 81$ Longueur $b = 122$	Rayon $R = 56$
Surface de la membrane A (mm^2)	0.01		
Épaisseur de la membrane h (μm)	2		
l'épaisseur initiale de la cavité d'air d_0 (nm)	250		

Tableau IV.6 : Les paramètres géométriques des capteurs utilisés dans la simulation.

La déformation mécanique de la membrane de formes carrée, rectangulaire et circulaire simulée est représentée sur la figure IV.35. Une comparaison entre les résultats de la déflexion

pour les trois formes de la membrane permet de constater que la membrane circulaire fléchit plus que les deux autres cas (carrée et rectangulaire).

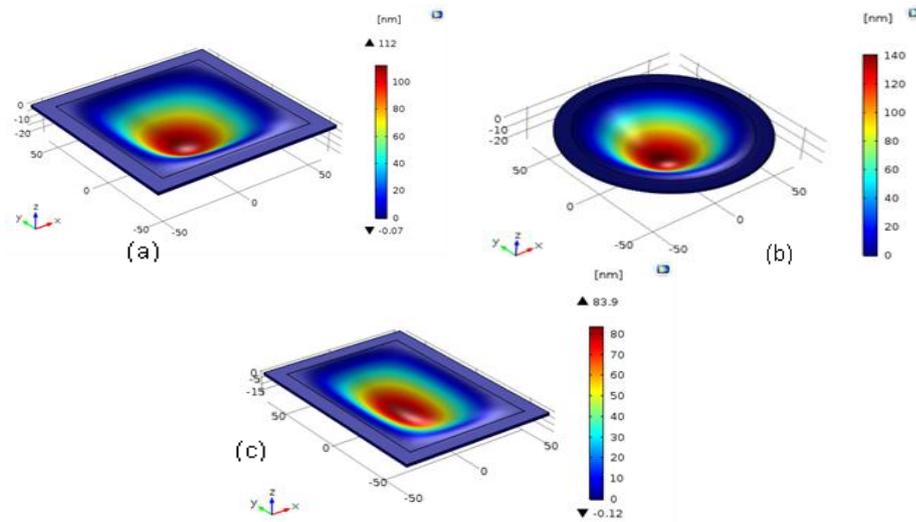


Figure IV.35 : Différentes formes de la membrane du PSFET.

Pour une meilleure appréciation de ces résultats, nous représentons les variations du courant de drain en fonction de la pression pour les différentes formes de la membrane sur la figure IV.36.

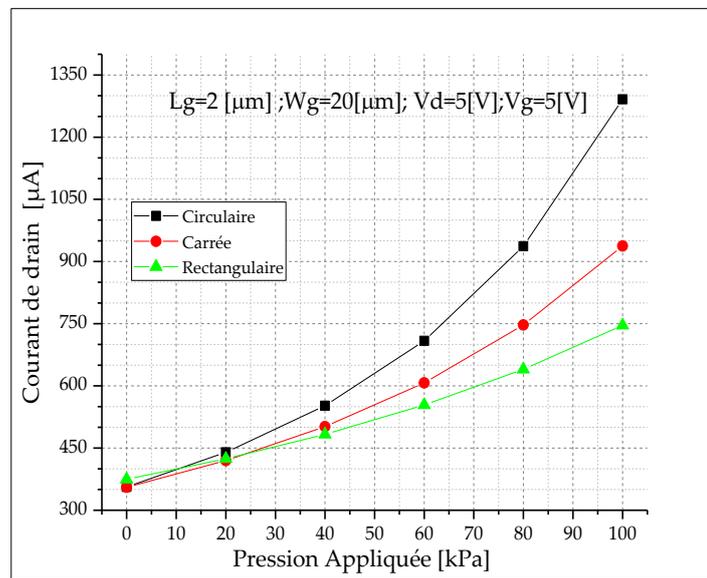


Figure IV.36 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée pour diverses formes de la membrane.

À partir de ces courbes, on peut conclure que l'effet de la forme de la membrane est très important et on constate bien que la forme circulaire présente une meilleure sensibilité à la

pression et que ce type de capteur possède une réponse d'autant plus non linéaire. Les valeurs typiques de sensibilité S_p et de Non linéarité sont regroupées dans le tableau IV.7

Type	Circulaire	carrée.	Rectangulaire
Sensibilité	9,03	5.71	3.67
Non linéarité %	11.83	8.74	6.06

Tableau IV.7 : Sensibilité et Non linéarité pour plusieurs formes de la membrane.

Nous avons analysé le comportement du modèle pour diverses valeurs de : la surface de la membrane «A», l'épaisseur initiale de la cavité d'air « d_0 » et l'épaisseur de la membrane «h». Les résultats obtenus sont représentés sur les figures IV.37, IV.38, IV.39.

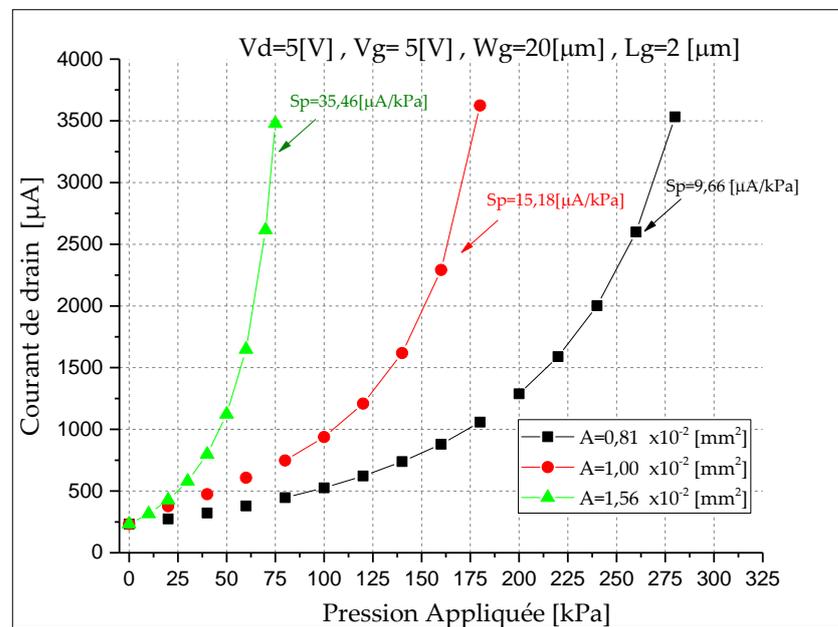


Figure IV.37 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes valeurs de la surface «A».

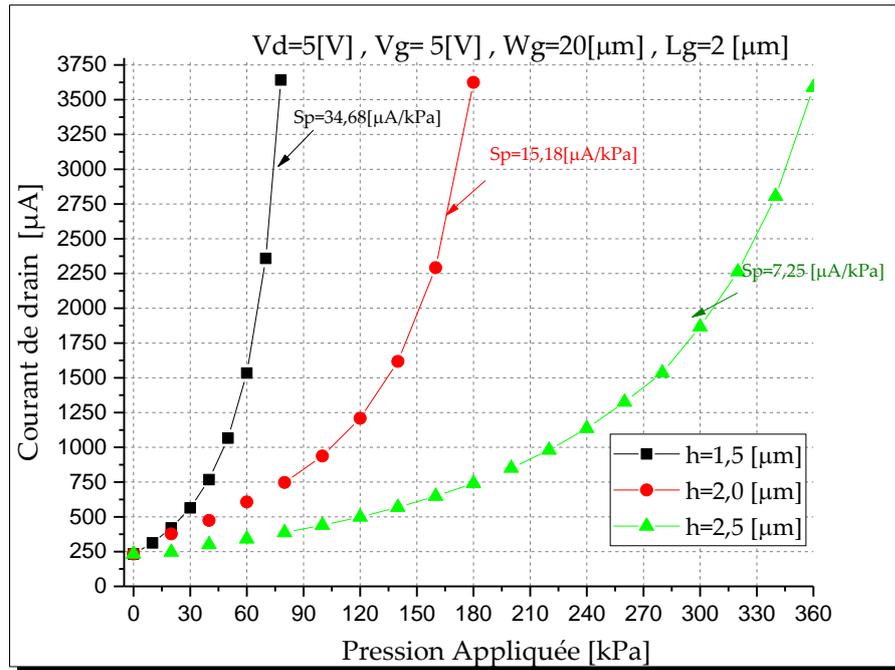


Figure IV.38 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane « h ».

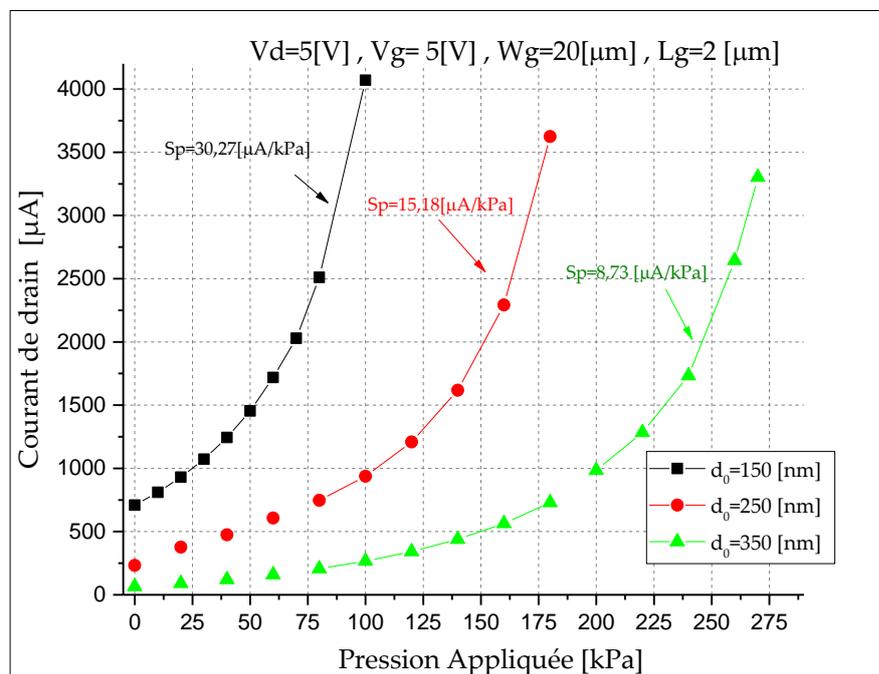


Figure IV.39 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes valeurs de l'épaisseur de la cavité d'air « d_0 ».

Les résultats sont en bon accord avec la théorie, et qu'effectivement une augmentation de courant de drain et de la sensibilité sont obtenues la maximisation de la surface « A », et la minimisation de l'épaisseur initiale de la cavité d'air « d_0 » et de l'épaisseur de la membrane « h ». L'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la réponse du capteur de pression à base SG-MOSFET est similaire à l'influence sur un capteur de pression capacitif.

IV.5.2 Etude des paramètres géométriques de MOSFET

La sensibilité du capteur de pression capacitif est limitée par les paramètres géométriques de la membrane et de la cavité. Les avantages des capteurs de pression PSFET sont également l'augmentation de la sensibilité par un autre paramètre indépendant qui est les paramètres du MOSFET.

Avec la réduction de la longueur de canal, tous les autres paramètres du MOSFET fondamental doivent être modifiés en fonction de la longueur de grille [168]. Les paramètres principaux de la technologie CMOS sont résumés dans le tableau IV.8.

Technologies	2 μm	1.5 μm	1 μm	0.7 μm
Épaisseur d'oxyde (nm)	40	30	25	20
Profondeur des jonctions (nm)	400	300	250	200
Polarisation (V)	5	5	5	5

Tableau IV.8 : Les paramètres principaux de la technologie CMOS.

La figure IV.40 représente la variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour diverses technologies CMOS. On remarque que le courant de drain est inversement proportionnel à la longueur de la grille.

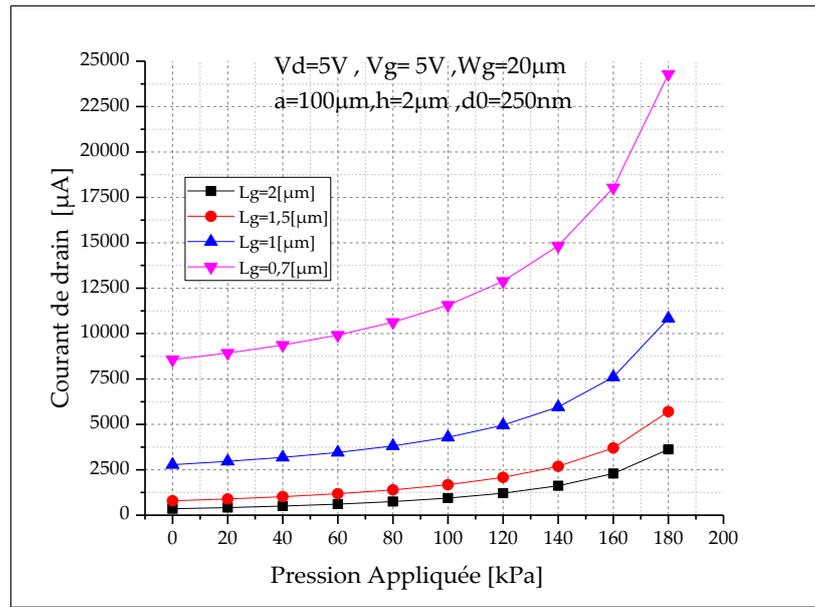


Figure IV.40 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme carrée pour différentes longueurs de la grille.

Nous avons regroupé dans le tableau IV.8 les valeurs de la sensibilité à la pression pour différents L_g , on voit que cette sensibilité est considérablement augmentée en miniaturisant longueur de grille. Par conséquent, les capteurs de pression PSFET à détection capacitive fabriqués par la technologie CMOS-MEMS présentent haute performance et petite taille.

Technologies	2 μm	1.5 μm	1 μm	0.7 μm
Sensibilité [$\mu\text{A/kPa}$]	18.15	27.26	44.63	87.23

Tableau IV.9 : Valeurs de la sensibilité à la pression pour différents L_g .

L'évolution du courant de drain en fonction de la largeur du canal W_g pour diverses pressions appliquée est illustrée sur la figure IV.41. Les résultats montrent que la réponse du capteur est proportionnelle à la largeur du canal.

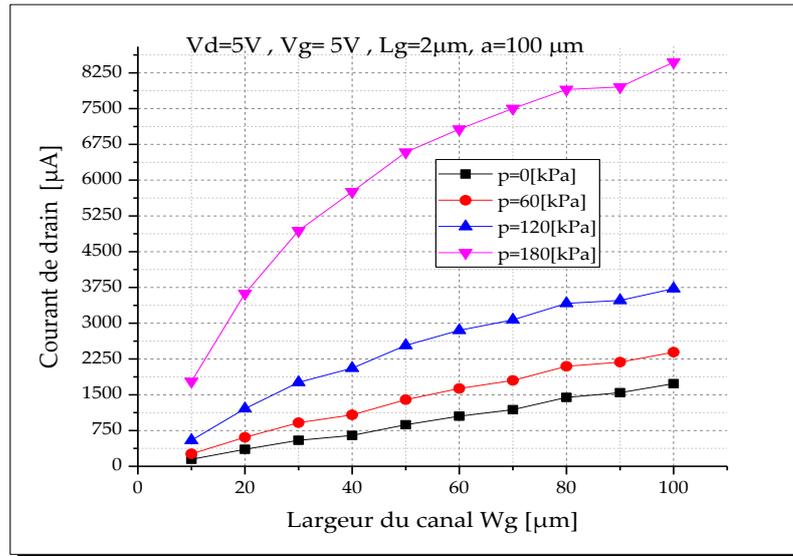


Figure IV.41 : Variation du courant de drain en fonction de la largeur du canal W_g pour différentes pressions.

Toutes les valeurs de la sensibilité à la pression obtenues sont regroupées dans le tableau IV.10. Prenant en compte que la largeur du canal est limitée par les dimensions de la membrane, l'augmentation de ce dernier augmente la réponse du capteur, mais aussi l'effet de la force électrostatique (equ IV.41). Cette sensibilité est considérablement élevée jusqu'à W_g égale la demi-longueur de la membrane. On constate aussi une légère augmentation au-delà de cet intervalle. On peut conclure que la largeur optimale du canal W_g est égale à la demi-longueur de la membrane.

La largeur du canal	20 μm	40 μm	50 μm	80 μm	100 μm
Sensibilité [$\mu\text{A}/\text{kPa}$]	18.15	28.38	31.55	35.86	36.44

Tableau IV.10 : Valeurs de la sensibilité à la pression pour différentes W_g .

IV.5.3 Effet du type et matériaux du MOSFET

Pour déterminer l'effet du type de MOSFET ainsi que son matériau sur la réponse et la sensibilité du capteur de pression PSFET, deux types de MOSFET (NMOS, PMOS) en divers matériaux sont modélisés en gardant la même géométrie du capteur. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures IV.42, IV.43.

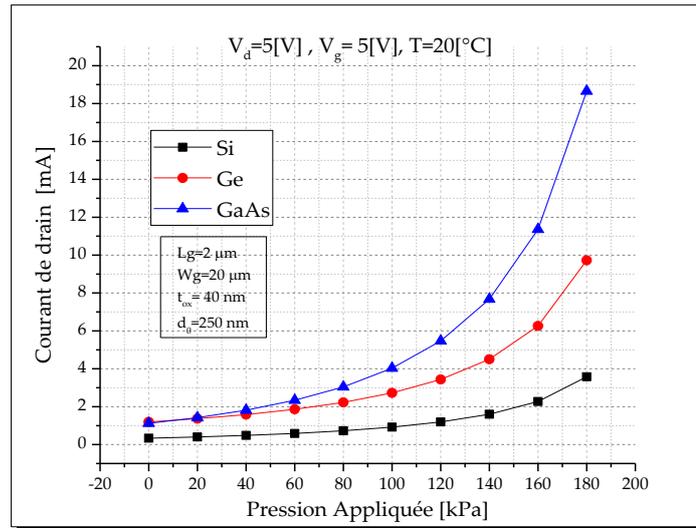


Figure IV.42 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une pour différents matériaux semi-conducteurs de NMOS.

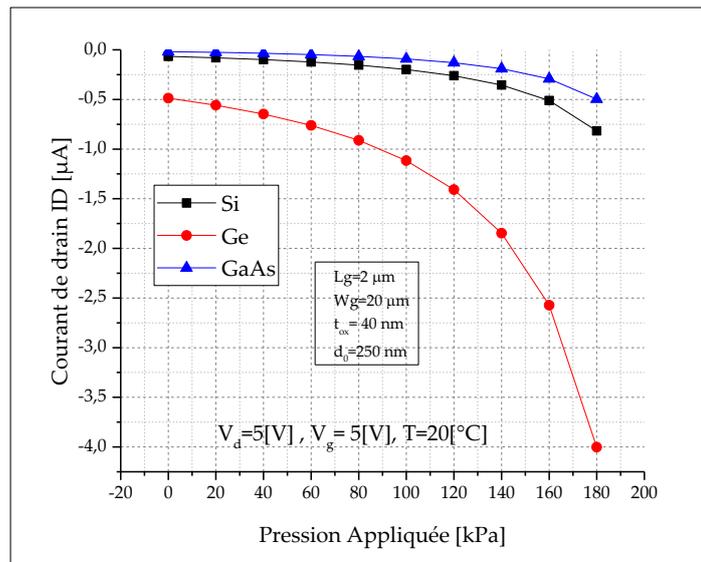


Figure IV.43 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée d'une pour différents matériaux semi-conducteurs de PMOS.

À partir de ces courbes, nous remarquons que l'utilisation des matériaux de haute mobilité des électrons engendre l'augmentation du courant de drain de NMOS. Par contre pour le type PMOS il faut utiliser des matériaux de haute mobilité des trous.

Pour une meilleure appréciation de l'effet du type de MOSFET ainsi que le type de matériau utilisé sur la sensibilité du capteur de pression PSFET. Le tableau IV.11 regroupe les résultats de cette étude.

Matériaux	NMOS		PMOS	
	Sp [uA/kPa]	NL %	Sp [uA/kPa]	NL %
Si	15,12	27	-3,4848	91.51
Ge	39,69	27	-16,33	90.03
GaAs	80,93	28.59	-2,1863	83.54

Tableau IV.11 : Sensibilité et Non linéarité dans deux types de MOSFET pour divers matériaux

À partir de ces résultats, on peut dire que, le capteur de pression à base SG-MOSFET en NMOS est très sensible à la pression en comparaison avec celui en PMOS, quel que soit le matériau utilisé. C'est ce qui confirme l'utilisation du NMOS par les auteurs dans la littérature qui fabriquent ce type de dispositif.

IV.6 Etude du capteur avec circuit électronique associé

Cette partie est consacrée à l'étude du circuit électronique de traitement du capteur de pression PSFET. Des simulations électriques avec le logiciel SPICE, intégré dans COMSOL, ont permis d'évaluer son comportement vis-à-vis des paramètres électriques du circuit. À partir de ces résultats, nous avons pu extraire les principales caractéristiques de ces circuits.

La qualité des résultats obtenus de l'étude et de la simulation des capteurs avec son circuit électronique dépend de la précision des modèles utilisés. Dans ce cadre, nous proposons une implantation du modèle de capteur de pression PSFET à détection capacitive établi sous environnement COMSOL dans le simulateur SPICE. Ce qui nous permet de tester les performances du modèle de capteur avec la configuration du circuit intégré utilisée.

Le couplage entre les solveurs FEM et les simulateurs de circuits électriques est l'objet des travaux de Schroth et al [169]. Dans cette approche, deux simulateurs (ANSYS © et PSPICE) sont couplés pour calculer la réponse d'une poutre vibrante. Le couplage entre les deux simulateurs n'est pas intrinsèque, mais il se fait itérativement en mettant à jour la réponse de chaque simulateur. Les problèmes de convergence ne sont pas discutés pour des cas plus compliqués. De plus, un tel couplage est très coûteux en termes de temps et de calcul [170].

L'interface Circuit électrique sous COMSOL contient les équations permettant de modéliser des circuits électriques avec ou sans connexions à un modèle FEM répartis, résolvant les tensions, les courants et les charges associés aux éléments du circuit. Les modèles de circuit peuvent contenir des éléments passifs tels que des résistances, des condensateurs et des inductances, ainsi que des éléments actifs tels que des diodes et des transistors. Il est également

possible de coupler une simulation de l'électromécanique avec un circuit électrique au format SPICE [171].

Deux modèles dans le simulateur COMSOL Multiphysics (Electromécanique et SPICE) sont couplés pour calculer la réponse du capteur. De façon très brève, nous pouvons dire que dans cette simulation le couplage Electromécanique /semi-conducteur est remplacé par le couplage Electromécanique /Spice. Ce dernier est développé pour évaluer son comportement vis-à-vis des paramètres électriques du circuit.

La figure IV.44 montre la comparaison des caractéristiques de sortie I_D (P) du capteur de pression PSFET issue de la simulation FEM (§ IV.4.2) et celles obtenues sous couplage COMSOL/SPICE. On observe que les deux courbes présentent la même allure, permettant ainsi la validation de notre modèle.

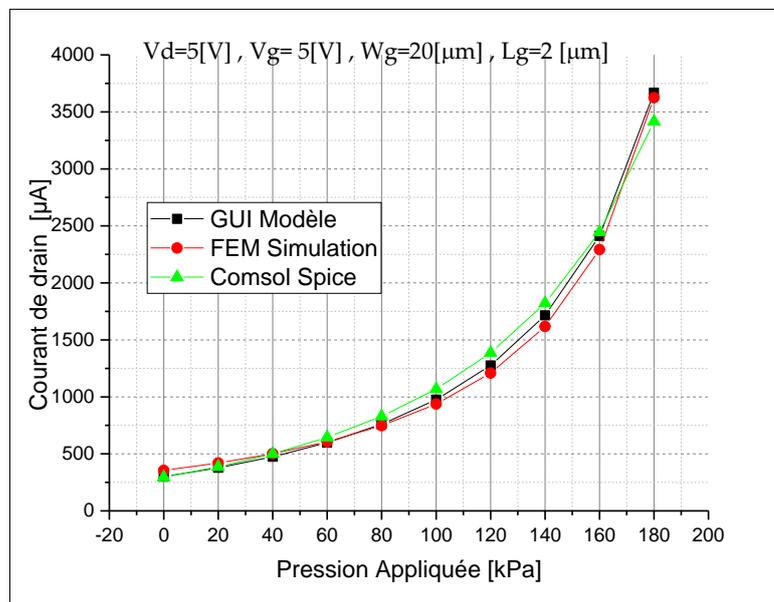


Figure IV.44 : Variation du courant de drain en fonction de la pression appliquée.

IV.6.1 Mise en parallèle de plusieurs PSFETs identiques

Une des caractéristiques les plus pratiques d'un PSFET est la possibilité de disposer plusieurs commutateurs en parallèle pour augmenter la capacité du courant. Si on place plusieurs PSFETs identiques en parallèle, l'ensemble fonctionne toujours comme un seul commutateur parce qu'ils s'ouvrent et se ferment simultanément puisque leurs électrodes sont connectées. Le courant total qui peut être transféré à travers l'ensemble des PSFETs est égal à la quantité de courant qui peut passer dans un seul MOSFET, fois le nombre des PSFETs en parallèle [134, 172]. Ce qui permet l'amplification du courant de sortie du dispositif.

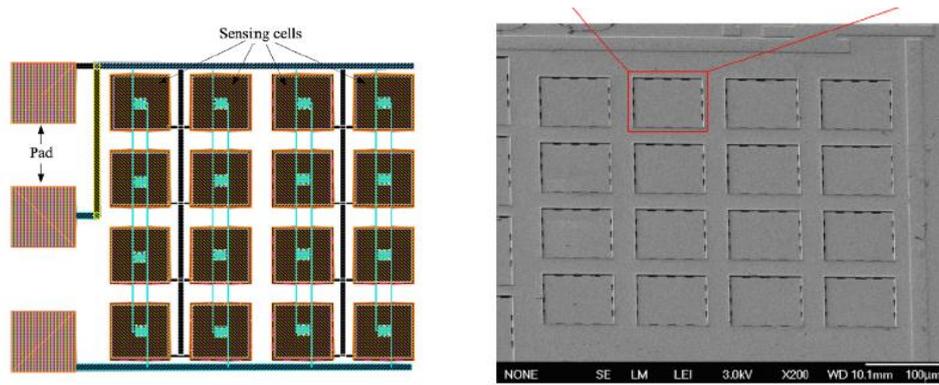


Figure IV.45 : Matrice des capteurs PSFET connectés en parallèle fabriqués par Dai et al [104].

La figure IV.46 représente la simulation de 9 PSFETs (étude 2 μm) identiques en parallèle. À partir du modèle Electromécanique /Spice, le courant total qui peut être transféré à travers l'ensemble des PSFETs en fonction de la pression appliquée varie de 2.69 au 32.66 mA avec une sensibilité de 143.10 $\mu\text{A/kPa}$. On a une augmentation de la sensibilité à la pression égale au nombre du dispositif configuré en parallèle

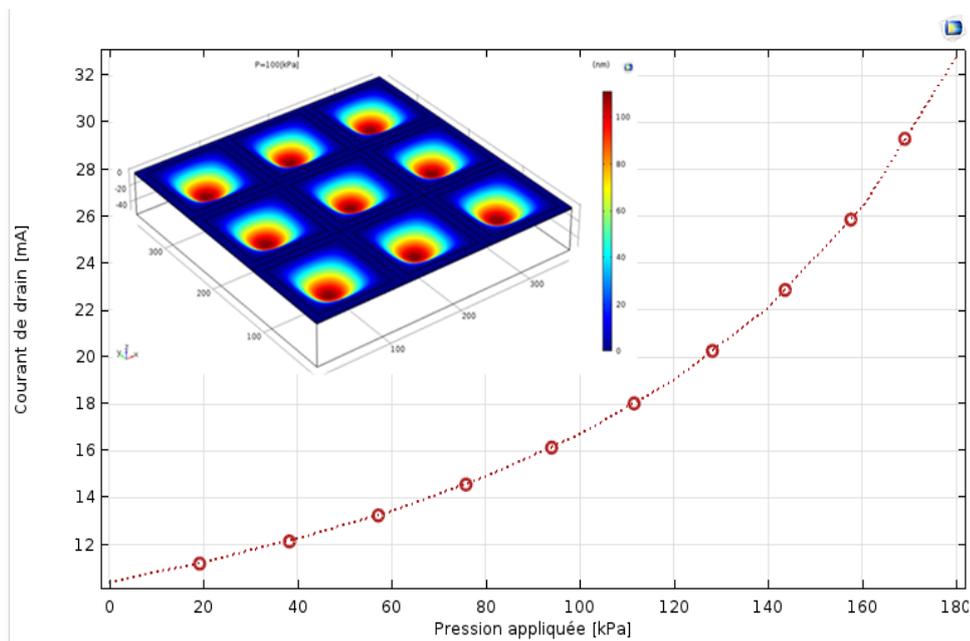


Figure IV.46 : Simulation de la configuration de 9 PSFET (étude 2 μm) identique en parallèle.

Les capteurs de pression utilisés dans les équipements de santé et le diagnostic médical sont pris en compte avec un grand intérêt. Dans le même temps, les capteurs sensibles à la pression moyenne de (10 à 100 kPa) reçoivent également une attention considérable, ce qui a

permis de réaliser des progrès notables dans l'application de ces capteurs dans les appareils de mesure du sang et du pouls [173].

Ce type de capteur présente une sensibilité élevée à la pression et la compatibilité totale de l'intégration avec la technologie CMOS des fonctionnalités pour évoluer vers un capteur intelligent, ce qui lui permet d'être utilisé dans le domaine médical notamment dans le diagnostic médical et la surveillance de la santé comme montre la figure IV.47.

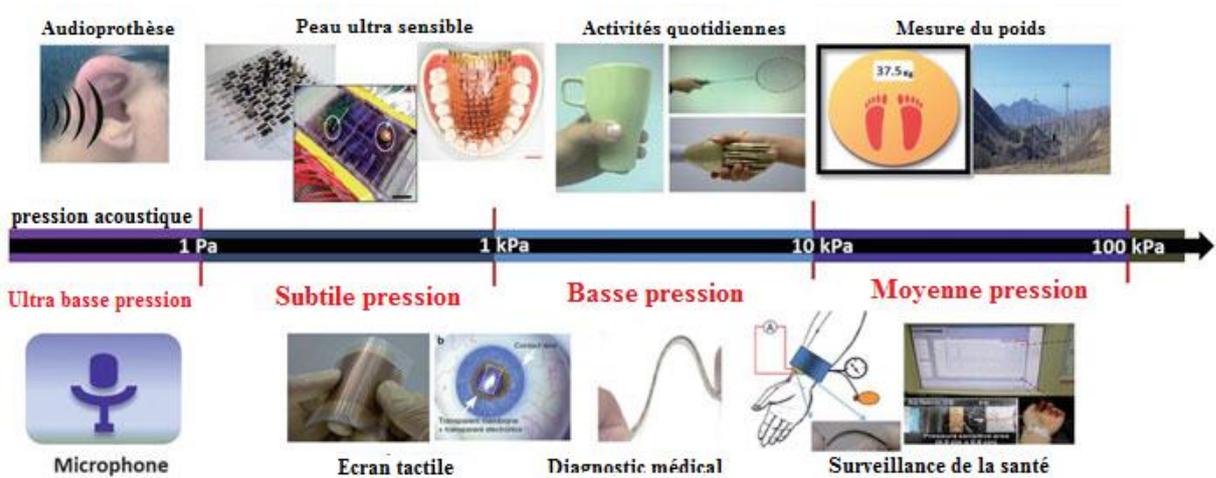


Figure IV.47 : Diagramme du régime de pression [173].

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle décrivant le comportement du capteur de pression PSFET à détection capacitive de différentes formes de la membrane et pour diverses structures de diélectrique de la grille suspendue du MOSFET. Ce modèle a été adapté pour décrire les différentes architectures du capteur. Ce qui permet d'éliminer les limites des modèles précédents décrivant son comportement (capteur de forme carrée seulement et négligence de l'effet de l'oxyde dans le capteur).. Nous avons introduit ce modèle dans une interface graphique (GUI) sous environnement Matlab. Cette interface permet de tracer les courbes de caractérisation de capteur ainsi le capteur de pression capacitif. Ainsi qu'une visualisation qualitative de l'état de la membrane de forme carrée et circulaire dans l'espace lorsqu'elle est soumise à une pression uniforme et constante, la pression maximale, et la réponse du capteur. Nous avons effectué une étude paramétrique en fonction de la pression appliquée pour deux

capteurs. Cette dernière permet de déterminer leur réponse analytique ainsi que leurs caractéristiques telles que la pression maximale, la sensibilité et la non linéarité.

Dans le but de la simulation et de l'optimisation des performances de ce type de capteurs de pression. Nous avons développé un modèle de simulation sous environnement COMSOL Multiphysics, tenant en compte de l'impact des dimensions de dispositif et la technologie de fabrication. Afin de valider les modèles établis (GUI et FEM), nous avons simulé modèle du capteur sous SILVACO ATLAS. En considérant que SILVACO est le logiciel décrivant le comportement de dispositifs à semi-conducteur.

L'étude des performances de capteur de forme carrée en technologie CMOS 2 μm montrent que le capteur possède une réponse non linéaire, une grande sensibilité à la pression, l'effet électrostatique peut être négligeable, coefficient de température de sensibilité (TCS) presque stable, mais ils sont très sensibles à la température (offset), et qu'il faudra prévoir des circuits de compensation thermique pour obtenir des dispositifs à hautes performances

Dans le but d'optimisation des performances de ce type des capteurs de pression, nous avons déterminé l'effet des paramètres géométriques de la membrane, le type, géométrie et matériau de MOSFET sur la réponse et la sensibilité du capteur

Les résultats obtenus peuvent ainsi contribuer à l'optimisation des performances du capteur et peuvent également fournir au concepteur plusieurs critères de choix.

Ces capteurs ont une application prometteuse dans la conception et le développement de capteurs intelligents intégrés pour les applications de l'automobile, de l'électronique grand public, de la santé et du biomédical.

Chapitre V.

Simulation d'un PSFET piézoélectrique

V.1. Introduction

Même si la piézoélectricité fut découverte par les frères Curie en 1880, les applications industrielles ne furent possibles qu'après la mise au point en 1950. La première exploitation commerciale des matériaux piézoélectriques est japonaise après la présentation en 1951 d'un appareil de détection de bancs de poissons. Depuis lors, un développement rapide des applications à base de transducteurs piézoélectriques dans divers domaines surtout dans le domaine électronique grand public [53, 174].

Le domaine d'application des matériaux piézoélectriques est très vaste car il est possible d'exploiter soit l'effet direct, soit l'effet inverse, soit les deux alternativement, on peut distinguer :

Royer et son équipe fabriquaient, en 1983, le premier microphone piézoélectrique en utilisant des techniques de micro-usinage du silicium. ce dernier est constitué d'un diaphragme de faible épaisseur lié mécaniquement à un matériau piézoélectrique, le mouvement du diaphragme sous l'action de l'onde de pression incidente génère alors une tension électrique [9].

Les actionneurs microsystèmes piézoélectriques se distinguent principalement par leur rapidité et leurs faibles tensions d'actionnement requises. Ainsi, les matériaux piézoélectriques font l'objet de nombreux travaux de recherche pour réaliser des micro-miroirs pour des imprimantes laser, des lecteurs de code-barre ou des vidéoprojecteurs et de l'interruptrice radiofréquence ou encore des actionneurs de positionnement de précision, notamment pour les têtes de lecture de disque dur Etc. [175].

Parmi ces applications on peut citer par exemple le sonar (Figure V.1), qui utilise principalement l'effet piézoélectrique inverse : l'application d'un champ électrique alternatif sur le cristal déforme ce dernier permettant la création des ondes ultrasonores. L'effet direct est utilisé en retour pour analyser le signal reçu [59].

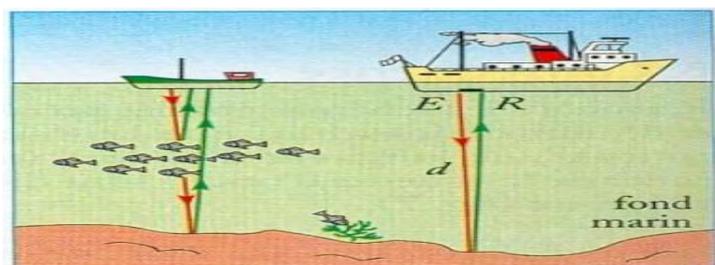


Figure V.1 : Utilisation des phénomènes piézoélectriques dans le sonar [59].

On rappelle que les matériaux piézoélectriques sont plutôt utilisés dans des capteurs de pression (§ II.3.2). Un capteur de pression en PZT présenté par MORTEN et al [176] est illustré sur la figure V.2. Ce type de capteur de pression fonctionne le plus souvent en mode de flexion. Ce mode est très sensible à la pression acoustique qui est capable de le déformer.

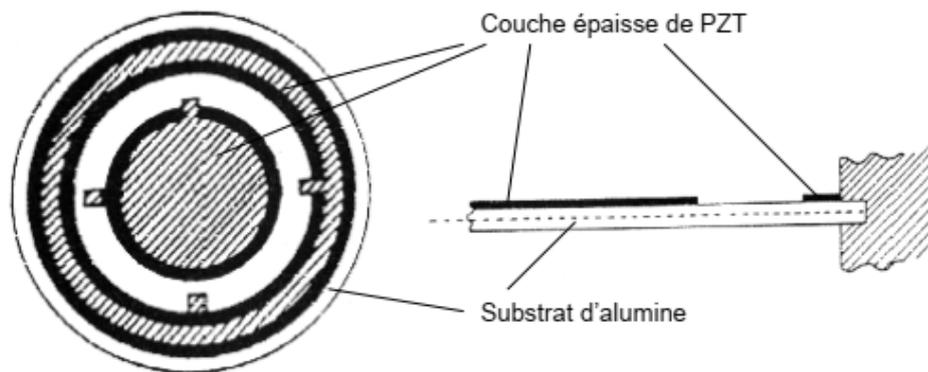


Figure V.2 : Capteur de pression en PZT [176].

Dans ce qui suit nous présentons quelques applications des matériaux piézoélectriques utilisés pour la conception de dispositifs piézoélectriques en précisant l'effet utilisé.

Applications basées sur l'effet direct	Applications basées sur l'effet inverse	Applications basées sur les deux effets
Microphone	Pompe piézoélectrique	Transducteur d'ultrasons pour diagnostic médical (échographie)
Hydrophone	Imprimante à jet d'encre	CND par ultrasons
Capteur de choc	Moteurs ultrasonores	Filtre fréquentiel (ondes volumiques SAW)
Accéléromètres	Relais	Transformateur piézoélectrique
Bouton poussoir	Bistouri piézoélectrique	Gyroscope
Allumage	Transducteur sonar	Détecteur de proximité ou de présence
Capteur de pression ou de contraintes	Haut-parleur	Mesure de distances ou de débits

Tableau V.1 : Applications des matériaux piézoélectriques [177, 178].

De nombreux chercheurs ont tenté d'utiliser les effets piézoélectriques de films poly cristallins orientés déposés sur des dispositifs MOS pour la conception et réalisation des capteurs de force, de contrainte et des pressions [123-129]

Ce chapitre a pour objectif de poser les bases du modèle comportemental du capteur de pression PSFET piézoélectrique. Ce dernier est développé pour déterminer le module du courant de sortie du dispositif en fonction de la pression appliquée.

V.2. Piézoélectricité

L'effet piézoélectrique repose sur la polarisabilité des matériaux diélectriques. Il existe deux effets piézoélectriques (direct et inverse). L'effet direct apparaît sous l'action d'une contrainte mécanique, les faces du matériau se chargent, générant un champ électrique. Dans l'effet inverse, un potentiel électrique est appliqué aux extrémités du matériau qui se déforme. Ces effets piézoélectriques ne peuvent être observés que sur des corps isolants et sont schématisés sur la Figure V.3. L'effet piézoélectrique n'est rien d'autre que la capacité qu'ont certains matériaux diélectriques à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa [179].

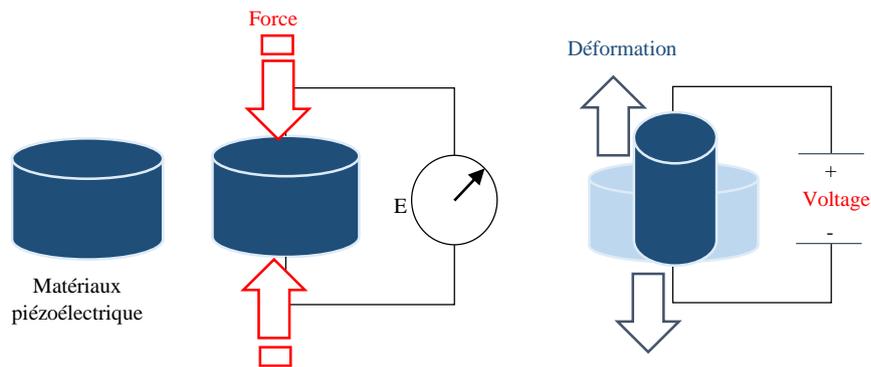


Figure V.3 : Illustration des effets piézoélectriques direct et inverse.

L'équation (V.1) permet de modéliser les effets piézoélectriques en corrélant les déplacements électriques et les déformations mécaniques avec les tensions électriques et les contraintes mécaniques [180]

$$\begin{pmatrix} \text{Déplacements} \\ \text{électriques} \\ \text{Déformations} \\ \text{mécaniques} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Contraintes} \\ \text{électriques} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \text{Couplage} \\ \text{électro - mécanique} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \text{Couplage} \\ \text{mécano - électrique} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \text{Couplage} \\ \text{mécaniques} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \text{Tension} \\ \text{électriques} \\ \text{Contraintes} \\ \text{mécaniques} \end{pmatrix} \quad (\text{V.1})$$

V.2.1 Matériaux piézoélectriques

Dans les solides cristallins, la piézoélectricité est directement liée à la symétrie des cristaux et se manifeste par une polarisation de la maille. Ce moment dipolaire est créé par la séparation du barycentre des charges positives de celui des charges négatives au niveau de chaque maille du réseau cristallin sous l'action d'une contrainte externe. Pour être piézoélectrique, la structure cristalline doit être nécessairement non centro-symétrique (absence de centre de symétrie)[177].

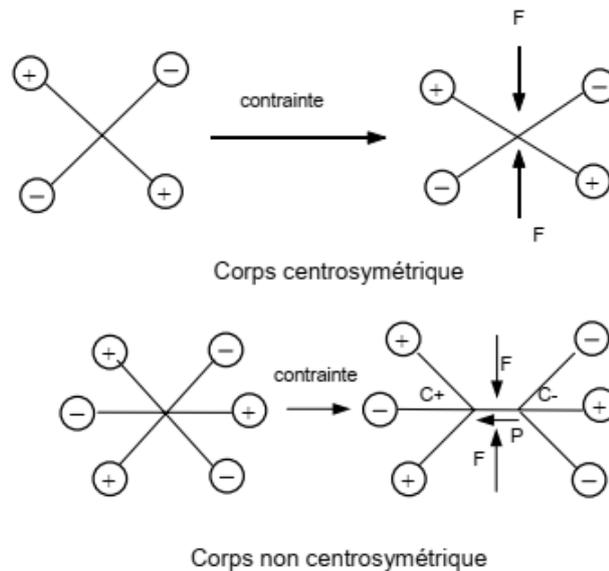


Figure V.4 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité [176].

Sur les 32 classes cristallines, 21 sont dépourvues de centre de symétrie. Parmi elles, 20 sont piézoélectriques (Figure V.5).

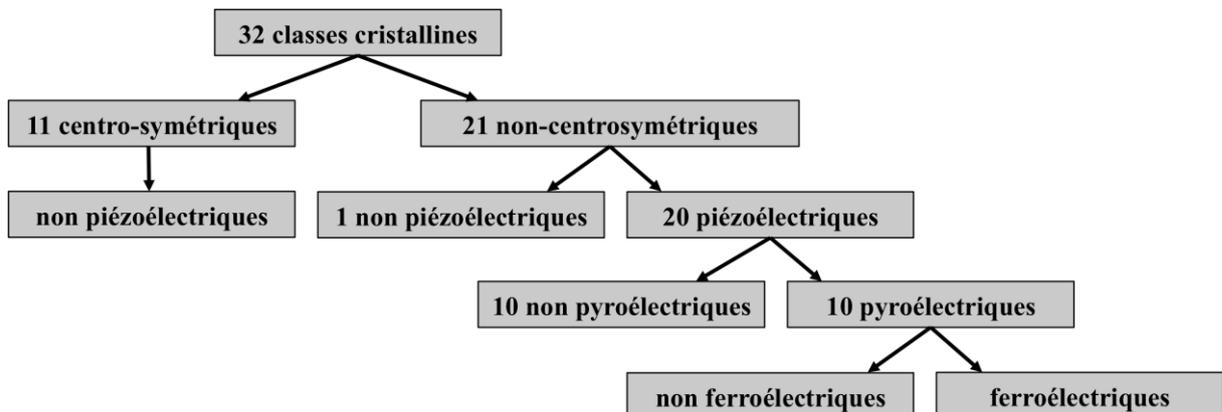


Figure V. 5 : Classification des structures cristallines.

Pyroélectricité : Certains matériaux piézoélectriques ont la propriété de présenter une polarisation spontanée non nulle, en l'absence de champ appliqué. Cette polarisation varie en fonction de la température, conférant à ces matériaux des propriétés pyroélectriques.

Ferroélectricité Certains matériaux pyroélectriques possèdent deux états de polarisation spontanée et peuvent passer de l'un à l'autre sous l'effet d'un champ électrique. Ces matériaux sont dits ferroélectriques. Ce double état de rémanence peut notamment être utilisé pour réaliser des mémoires ferroélectriques FeRAM, mais les matériaux ferroélectriques sont également très utilisés pour leurs coefficients piézoélectriques particulièrement élevés [175].

Si un champ extérieur suffisamment intense est appliqué au matériau, il se polarise : les domaines, orientés dans le sens du champ, grossissent au détriment des autres. Plus le champ élevé, plus le nombre de dipôles orientés est grand, ce qui contribue à l'augmentation progressive de la polarisation. Ce phénomène se manifeste par un cycle d'hystérésis Polarisation = f(E) (Figure V.6). La polarisation est saturée à $\pm P_s$ pour des valeurs de champ très importantes et la polarisation rémanente $\pm P_r$ correspond à la valeur de la polarisation à champ nul [176]

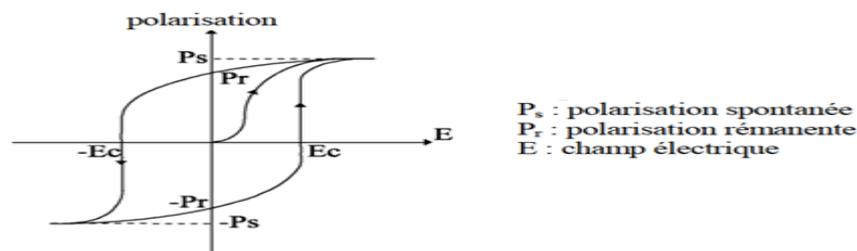


Figure V. 6 : Cycle d'hystérésis Polarisation = f(E) d'un matériau ferroélectrique [181].

Il existe différents types de matériaux piézoélectriques. Les premiers à être étudiés sont les cristaux, certains cristaux peuvent être utilisés dans des capteurs de pression (Quartz) ou des filtres à onde de surface (LiNbO₃). Une autre grande famille de matériaux piézoélectriques est celle des céramiques. Les plus couramment utilisées sont les PZT (oxyde de Plomb, de Zirconium et de Titanium) pour leurs excellentes propriétés piézoélectriques.

Les polymères, principalement le polyfluorure de vinylidène (PVDF), sont également utilisés par l'industrie pour leurs propriétés piézoélectriques. Ils s'adaptent facilement à l'application industrielle par leur souplesse. Cependant, le couplage piézoélectrique est plus faible que celui des matériaux cités précédemment. Ils sont ainsi utilisés en tant que capteur [182]. Une présentation non exhaustive des principaux matériaux piézoélectriques est présentée dans le Tableau V.2.

Matériau	AlN	ZnO	Quartz	BaTiO ₃	PZT-5A	LiNbO ₃	PVDF
Piézoélectrique	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pyroélectrique	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ferroélectrique	×	×	×	✓	✓	✓	✓
Constante de charge d33 (pC/N)	5	12.3	2	190	374	6	-30
Constante diélectrique	10	8.8	4.5	910		27.6	12
Densité (g/cm ³)	2.7	5.68	2.65	5.7	7.75	4.64	1.78

Tableau V.2 : Propriétés de différents matériaux piézoélectriques [89, 183, 184].

V.2.2. Équations fondamentales de la piézoélectricité

La piézoélectricité est le résultat d'un couplage entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique d'un matériau. Son étude repose sur l'analyse des propriétés élastiques et diélectriques du matériau. Les équations font intervenir à la fois des grandeurs électriques et des grandeurs mécaniques. Par exemple, la déformation totale est fonction de deux variables indépendantes que sont la contrainte mécanique et le champ électrique [174].

Les équations linéaires constitutives de la piézoélectricité normalisées peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivant :

$$\begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T & d \\ d & S^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix} \quad (\text{V.2})$$

Les noms, les symboles, les unités, ainsi que la taille des tenseurs correspondant à chacune des grandeurs physiques et des constantes mises en jeu sont résumés dans le tableau V.3.

Noms	Symboles	Unités	Tenseurs
Déplacement électrique	D	$[C/m^2]$	3×1
Champ électrique	E	$[V/m]$	3×1
Contrainte mécanique	T	$[N/m^2]$	6×1
Déformation mécanique	S	$[m/m]$	6×1
Permittivité diélectrique	ε	$[F/m]$	3×3
Charge et contrainte	d	$[m/V]$	3×6

Tableau V.3 : Noms, symboles, unités et tailles des grandeurs et des constantes utilisés dans l'équation de la piézoélectricité.

V.2.3. Différents modes de transduction

En première approximation, les propriétés élastiques et diélectriques du matériau peuvent être considérées isotropes et les propriétés piézoélectriques considérées transverses isotropes, l'équation constitutive (Éq. V.2) peuvent être développées de manière explicite en fonction de mode de transduction [185, 186] :

- Lors du choix du matériau comme capteurs :

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{Couplage électromécanique}} \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \varepsilon_1^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3^T \end{bmatrix}}_{\text{Permittivité}} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{V.3})$$

- Lors du choix du matériau comme actionneur :

$$\begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{21}^E & S_{22}^E & S_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{31}^E & S_{32}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}^E \end{bmatrix}}_{\text{Compliance}} \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{Couplage électromécanique}} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{V.4})$$

V.2.4. Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique

Le matériau piézoélectrique se déforme de différentes manières. Ces diverses déformations s'appellent les modes de déformation. Dans le cas d'un capteurs, il existe deux modes de direction de polarisation plus connus et les plus utilisés [89, 187]. La figure V.7 illustre ces modes dans le cas d'une membrane piézoélectrique soumise à une force (pression).

- **Mode longitudinale (mode d_{33})** correspond au cas où la tension est mesurée dans la même direction que la force appliquée.
- **Mode transversal (mode d_{31})**, la force est appliqué dans l'axe 1 du matériau et la tension générée est mesurée selon l'axe 3.

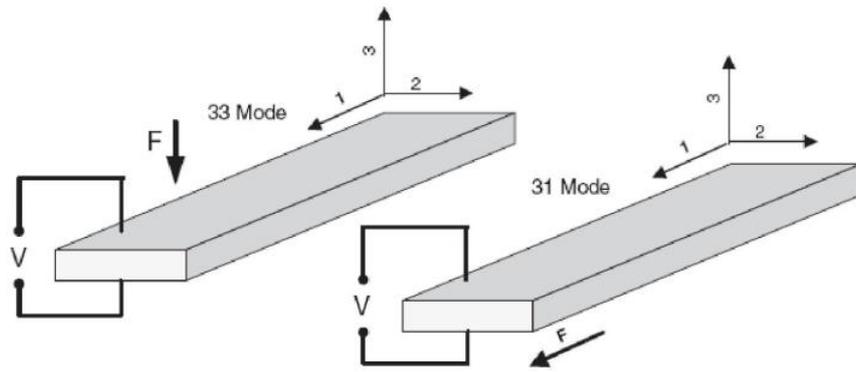


Figure V.7 : Illustration des modes piézoélectriques d_{33} et d_{31} utilisés pour la récupération d'énergie [89].

V.3. Modélisation du PSFET piézoélectrique.

La figure V.8 illustre la structure d'un capteur de pression PSFET piézoélectrique, qui est basé sur le dépôt d'une couche de matériau piézoélectrique directement sur la surface de la grille d'un MOSFET. Les régions de la source et de drain sont obtenues par diffusion silicium (N+)[187]. En d'autres termes, la structure du dispositif peut être définie comme un condensateur piézoélectrique couplé à une électrode de grille du MOSFET [189].

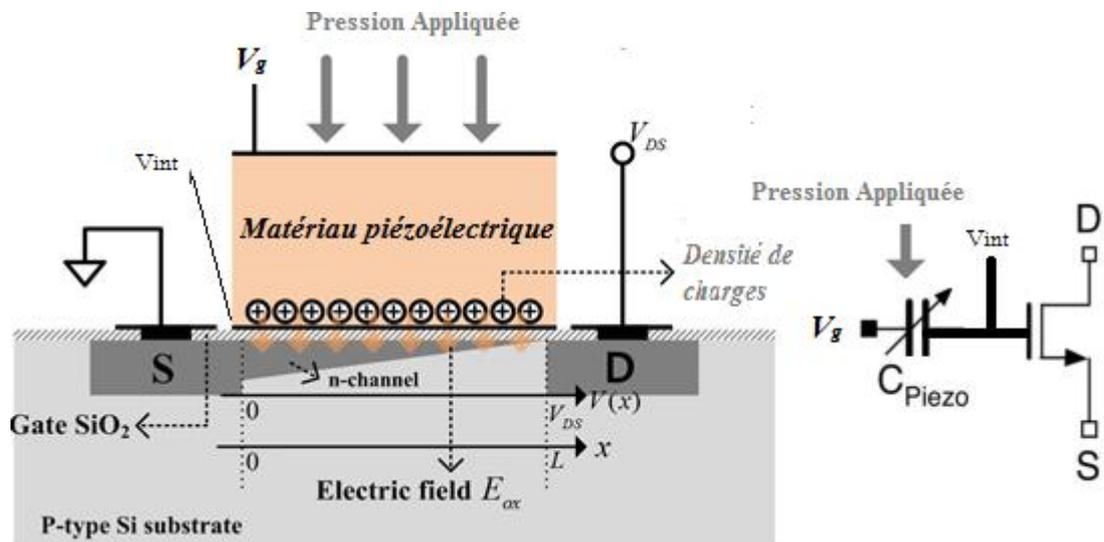


Figure V.8 : Structure et principe de fonctionnement d'un PSFET piézoélectrique et son symbole schématique [190, 191].

Le principe de fonctionnement de ce dispositif représenté sur la figure V.7, consiste en une variation de pression environnante entraînant la déformation du matériau piézoélectrique. Selon le mode d_{33} , le déplacement électrique créé par effet piézoélectrique est [192] :

$$D_3 = d_{33}P + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (\text{V.5})$$

Le champ électrique dans la couche piézoélectrique a pour expression [193] :

$$E_3 = -\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{V_g}{t_{piezo}} \quad (\text{V.6})$$

Où t_{piezo} est l'épaisseur initiale de l'élément piézoélectrique

Les charges électriques localisées sur les électrodes son alors données par une simple intégration sur la surface de ces dernières soit [192] :

$$Q = \int_0^{L_g} \int_0^{W_g} D_3 dx dy \quad (\text{V.7})$$

La capacité d'empilement du dispositif C_{stack} par unité de surface peut être considérée comme une association série de deux condensateurs donnée par [129] :

$$\frac{1}{C_{stack}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{Piezo}} \quad (\text{IV.8})$$

Où C_{ox} est les capacités par unité de surface de l'oxyde, C_{piezo} est la capacité par unité de surface de l'élément piézoélectrique. C_{piezo} au repos est donnée par :

$$C_{Piezo} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{t_{piezo}} \quad (\text{IV.9})$$

- Cas d'un matériau ferroélectrique

Dans ces cas le capteur de pression est similaire de la structure d'un mémoire ferroélectrique FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) [156, 194].

Les charges de la polarisation rémanente et spontanée s'accumulent comme charges de compensation dans la jonction du semi-conducteur / oxyde de grille. Ces charges de compensation décalent la tension de bande plate du transistor en fonction de la polarité des charges. Pour le NMOS où la polarisation est positive, les charges négatives s'accumulent et entraînent une réduction de la tension de la bande plate [129] :

$$V_{FB\text{eff}} = V_{FB} - \frac{(P_r + P_s)}{C_{ox}} \quad (\text{V.10})$$

L'expression de la tension de seuil effective $V_{T\text{eff}}$ du capteur est donnée par[129] :

$$V_{T\text{eff}} = V_T - \frac{(P_r + P_s)}{C_{ox}} \quad (\text{V.11})$$

En utilisant les deux paramètres C_{stack} et V_{Teff} dans l'équation des caractéristiques d'un MOSFET standard pour obtenir les caractéristiques électriques du POSFET :

$$\begin{cases} I_D = \mu_n C_{stack} \frac{W_g}{L_g} \left[(V_g - V_{Teff}) V_d - \frac{1}{2} V_d^2 \right] & \text{région linéaire} \\ I_{Dsat} = \frac{\mu_n W_g}{2L_g} C_{stack} (V_g - V_{Teff})^2 & \text{région de saturation} \end{cases} \quad (V.12)$$

V.4. Méthodologie de simulation

La conception d'un capteur de pression PSFET piézoélectrique nécessite une compréhension fine des physiques impliquées, en prenant en compte le couplage entre différents phénomènes.

Pour des raisons de simplicité, dans cette simulation notre transistor est basé sur le matériau Nitrure d'aluminium (AlN) qui est un matériau non ferroélectrique. La figure V.9 illustre la structure d'un capteur de pression PSFET piézoélectrique, qui est constitué d'un NMOS associée à une grille piézoélectrique de forme rectangulaire d'une longueur $L_g = 12 \mu\text{m}$, d'une largeur $W_g = 2000 \mu\text{m}$ et d'une épaisseur $d=500 \text{ nm}$.

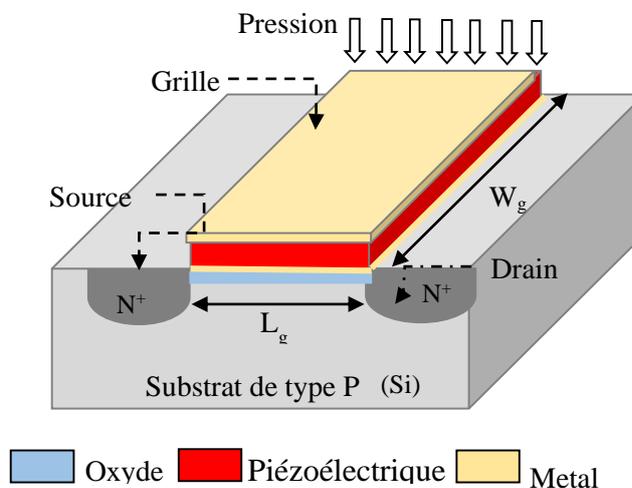


Figure V.9 : Structure de capteur de pression PSFET piézoélectrique.

Le modèle global est composé d'un couplage de deux sous modèles élémentaires :

- **Modèle dispositifs piézoélectriques** pour simuler la partie piézoélectrique du capteur notamment la capacité de l'élément piézoélectrique en fonction de la pression appliquée qui est la variable de couplage.
- **Modèle Spice** pour simuler la réponse du capteur en fonction de la pression appliquée Il est aisé de construire et faire tourner un modèle COMSOL comme partie intégrante d'un modèle SPICE de circuit, grâce à l'interface SPICE dédiée du Module dispositifs piézoélectrique.

La figure V. 10 résume les étapes effectuées pour pouvoir simuler le modèle sous environnement COMSOL multi physiques.

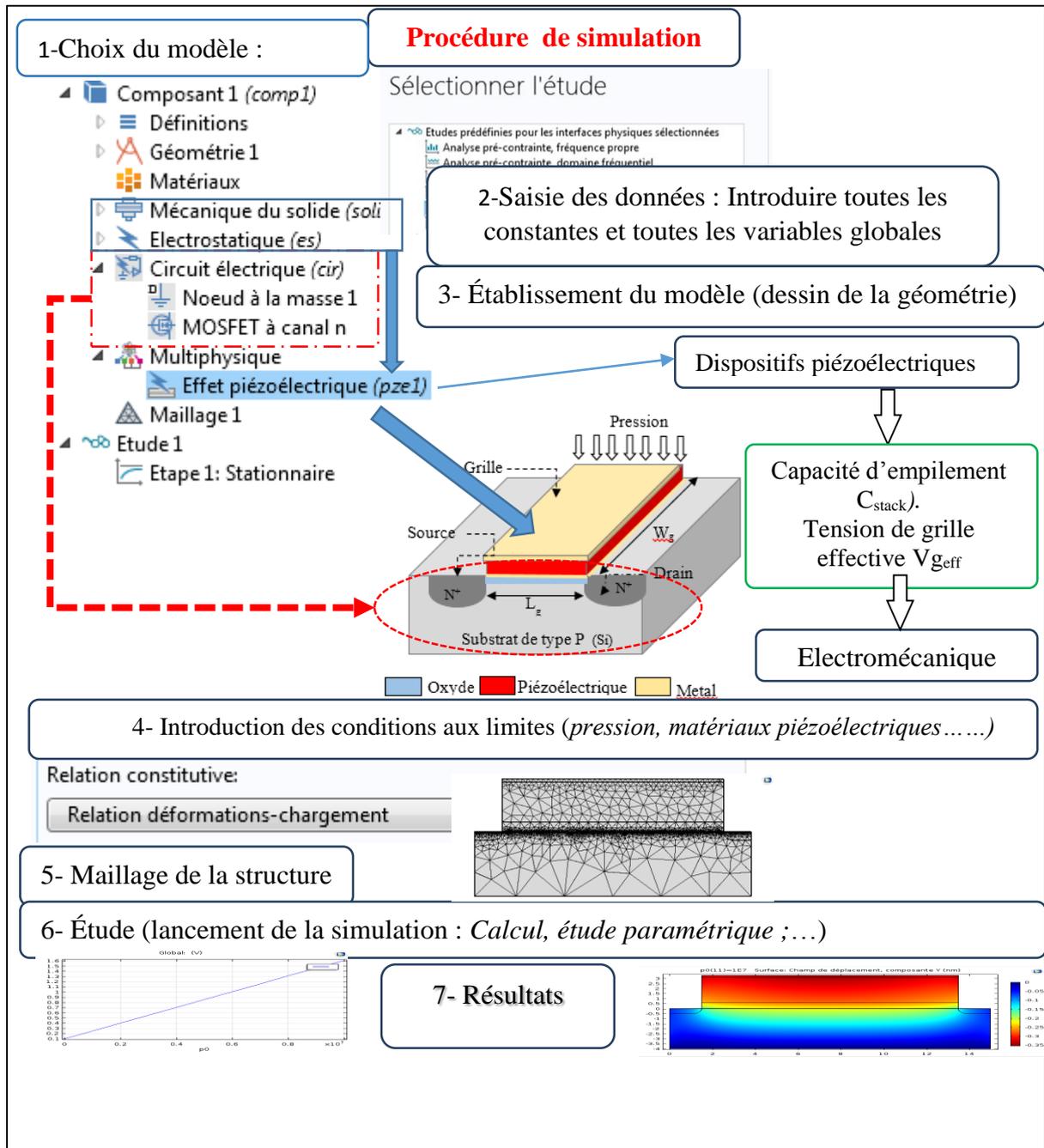


Figure V.10 : Étapes de simulation d'un capteur de pression à base de transistor piézoélectrique sous environnement COMSOL Multi physiques.

A-Dispositifs piézoélectriques

L'interface dispositifs piézoélectrique sous l'environnement COMSOL constituée de deux sous interfaces : « mécanique des solides » et « l'électrostatique » qui sont couplées ensemble par la fonction « Multi physique Effet piézoélectrique ». Les effets piézoélectriques directs et inverses peuvent être modélisés et le couplage piézoélectrique peut être formulé à l'aide des formes contrainte-charge ou déformation - charge.

Un élément piézoélectrique peut être défini par les propriétés suivantes [195] :

Propriétés mécaniques :

- Densité ρ (kg/m³).
- Matrice d'élasticité C_E (Pa) sous la forme contrainte-charge.
- Matrice de souplesse S_E (1/Pa) sous la forme déformation-charge.

Propriétés électrostatiques :

- Permittivité relative ϵ_{rS} (1) sous la forme contrainte-charge.
- Permittivité relative ϵ_{rT} (1) sous la forme déformation-charge.

Propriétés de couplage piézoélectrique :

- Matrice de couplage piézoélectrique e_{ES} (C/m²) sous la forme contrainte-charge.
- Matrice de couplage piézoélectrique d_{ET} (C/N) sous la forme déformation-charge.

Dans notre étude, la formulation « déformation - charge » est utilisée pour la modélisation par éléments finis. COMSOL Multiphysics dispose d'une vaste bibliothèque de matériaux allant des métaux aux plastiques. Les paramètres des matériaux (masse volumique, propriétés élastiques et d'amortissement) peuvent être modifiés. En fonction du type de physique utilisée, des lois de comportement diverses sont disponibles. La figure V.11 résume les différents matériaux piézoélectriques sous environnement COMSOL Multiphysics.

L'élément piézoélectrique dans la simulation (AIN) est défini par les propriétés suivantes :

Densité $\rho = 3300$ (kg/m³)

La matrice de couplage piézoélectrique d_{ET} :

$$d_{ET} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -3.84 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3.84 & 0 & 0 \\ -1.729 & -2.781 & 5.49 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ (pN/C)}$$

The screenshot shows the COMSOL material library for piezoelectric materials. On the left, a list of materials is shown, with 'Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)' selected. On the right, three tables are displayed, each representing a different material property model:

Propriété	Variable	Expression	Unité
Permittivité relative	{epsilon...}	{919.1, 919.1, 826.6}	1
Masse volumique	rho	7750[kg/m^3]	kg/m^3

Relation déformations-chargement (StrainCharge)			
Propriété	Variable	Expression	Unité
Matrice de complia...	{sE11, sE...	{1.64e-011[1/Pa], -5.7...	1/Pa
Matrice de couplag...	{dET11,...}	{0[C/N], 0[C/N], -1.71...	C/N
Permittivité relative	{epsilon...}	{1730, 1730, 1700}	1

Forme contraintes-chargement (StressCharge)			
Propriété	Variable	Expression	Unité
Matrice d'élasticité (a...	{cE11, c...	{1.20346e+011[Pa], 7....	Pa
Matrice de couplage	{eES11,...}	{0[C/m^2], 0[C/m^2]...	C/m^2
Permittivité relative	{epsilon...}	{919.1, 919.1, 826.6}	1

Figure V. 11 : Bibliothèque des matériaux piézoélectriques sous environnement COMSOL.

La matrice de souplesse :

$$S_E = \begin{bmatrix} 2.585 & -0.8996 & 0.3828 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.116 & 0.9647 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.037 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} 10^{-12} Pa^{-1}$$

Permittivité relative ϵ_{rT} :

$$\epsilon_{rT} = \begin{bmatrix} 9.2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.2 & 0 \\ 0 & 0 & 10.25 \end{bmatrix}$$

Les principales caractéristiques des matériaux élastiques linéaires utilisés dans les capteurs étudiés sont précisées dans le tableau V.4 [3, 4].

Matériau	Module d'Young E (10 ⁹ Pa)	Coeff de Poisson v	Coeff de dilatation thermique α (10 ⁻⁶ / °C)	Masse volumique rho (kg/m)
Silicium	190	0.22	2.33	2320
Oxyde	70	0.17	0.5	2200
Al	70	0.35	23.1	2700
Au	70	0.44	14.2	19300

Tableau V.4 : Principales caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés dans la simulation.

□ Les conditions aux limites

Dans le but de gain de temps et d'espace mémoire, nous utilisons la symétrie du modèle pour faire une étude 2D de notre structure, pour ne simuler que son quart. Le capteur a été mis en place depuis le modèle de la piézoélectrique en utilisant l'interface des dispositifs piézoélectriques. Les conditions aux limites sont représentées sur la figure V.12

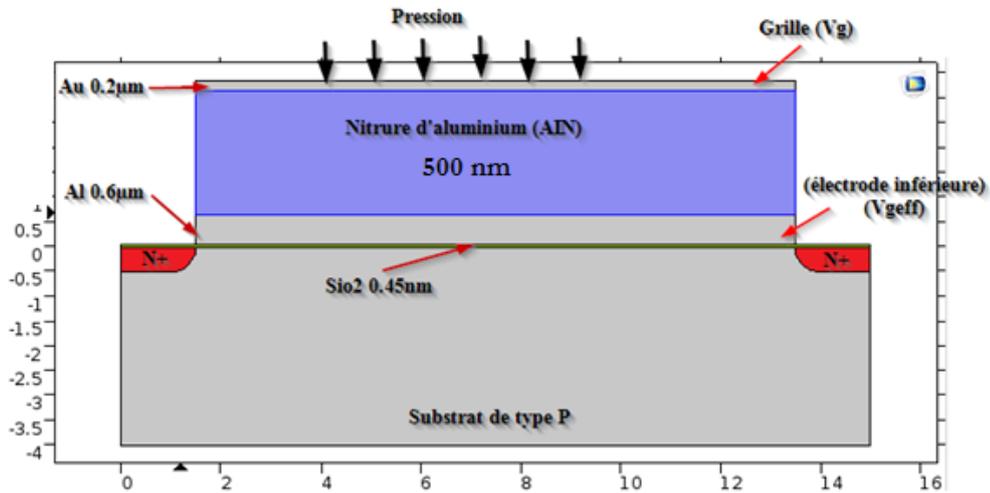


Figure V.12 : Conditions aux limites pour le modèle dispositifs piézoélectriques.

B- L'interface Circuit électrique

L'interface Circuit électrique contient les équations permettant de modéliser des circuits électriques avec ou sans connexions à un modèle FEM réparties, résolvant les tensions, les courants et les charges associées aux éléments du circuit. Les modèles de circuit peuvent contenir des éléments passifs tels que des résistances, des condensateurs et des inductances, ainsi que des éléments actifs tels que des diodes et des transistors.

V.5. Résultats & Discussions

La figure V.13 représente la courbe de variation de la déformation de capteur sous l'application d'une haute pression de 200 bar. Ces résultats montrent que la déflexion est maximale dans la partie piézoélectrique du capteur.

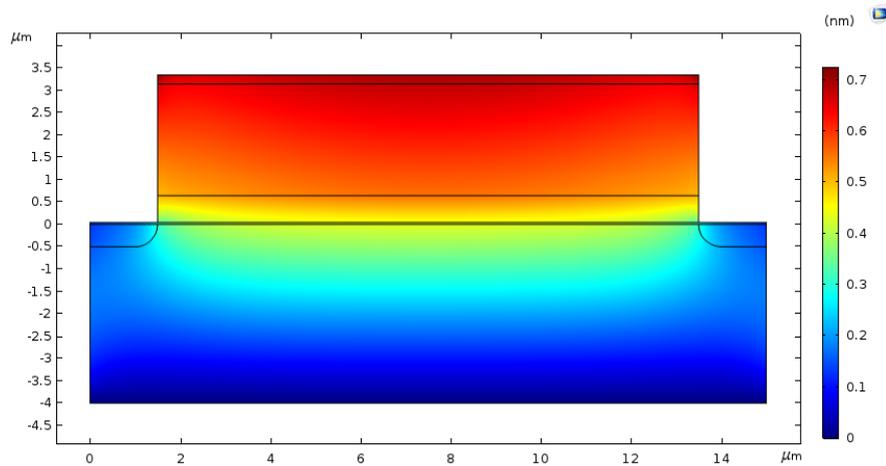


Figure V.13 : Déformation du capteur sous l'application d'une haute pression de 200 bar.

La figure V.14 montre les variations de la charge électrique créée par effet piézoélectrique sous l'application de la pression. On peut diviser cette variation en deux parties :

1^{er} partie dans la gamme [0-100 bar], on déduit que les résultats obtenus sont en bon accord avec la théorie.

2^{eme} partie dans la gamme [100-200 bar], les deux courbes de même allure avec une légère différence des valeurs qui est probablement due l'effet des coefficients d_{31} et d_{32} sous simulation FEM car ce modèle tient en compte la matrice complète de couplage piézoélectrique. Alors que dans le calcul théorique en mode d_{33} ces coefficients sont négligeables. D'autre part, le signe négatif de ces coefficients explique la réduction des valeurs de ces résultats de simulation (FEM).

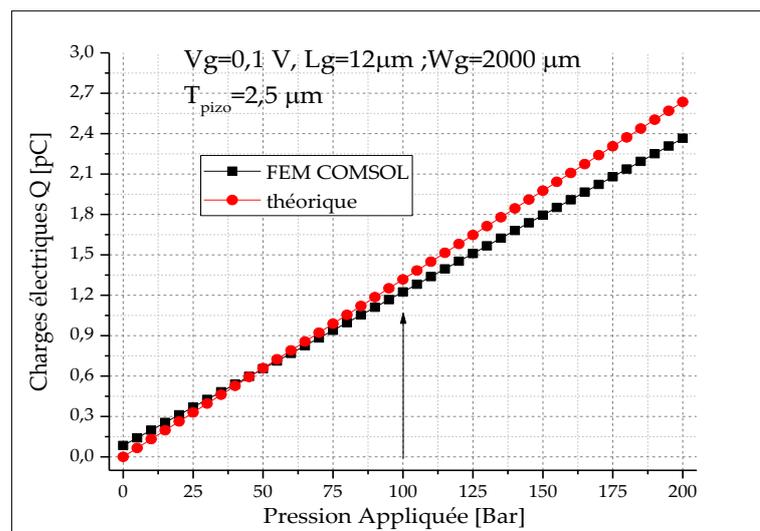


Figure V.14 : Charge électrique créée en fonction de la pression appliquée.

La figure V.15 représente la variation de la capacité piézoélectrique $C_{\text{piézo}}$ en fonction de la pression appliquée. Nous observons que cette variation de capacité est proportionnelle à la pression appliquée. Nous relevons une étendue de mesure de la capacité de 0,84 pF à 23,65 pF pour une variation de la pression augmente de 0 à 200 bar. Ce qui nous donne une réponse linéaire sur toute l'étendue de mesure avec une grande sensibilité à la pression de 0,11 pF/bar.

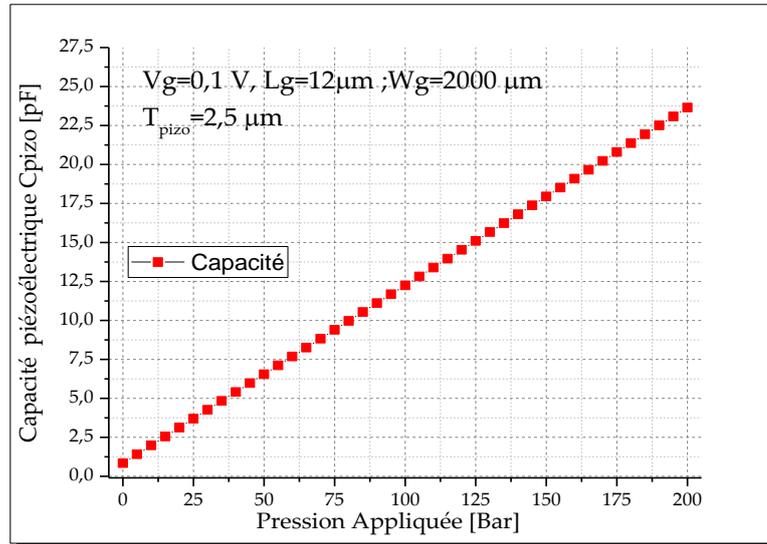


Figure V.15 : Variation de la capacité piézoélectrique en fonction de la pression appliquée

La figure V.16 montre que le courant de sortie du capteur est proportionnel à la pression appliquée. Avec une variation de 0,79 à 1,61 mA quand la pression varie de 0 à 200 bar. Nous enregistrons une sensibilité de 4,1 $\mu\text{A} / \text{kPa}$.

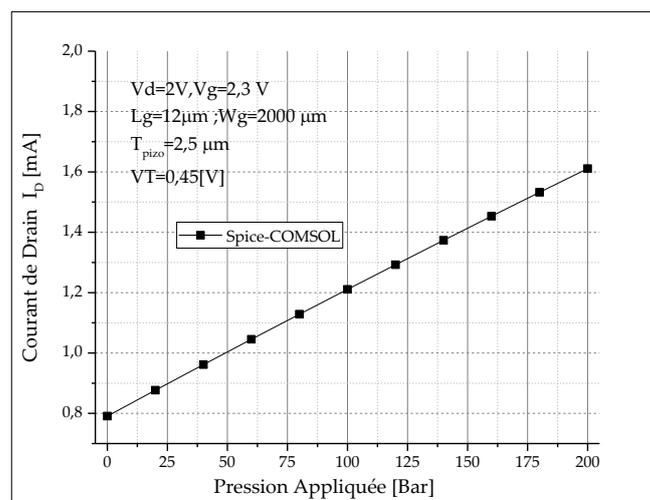


Figure V.16 : Variation de courant de sortie en fonction de la pression appliquée.

Les résultats de simulation montrent que le capteur étudié a une réponse quasi linéaire pour une gamme de pression allant de $[0 \div 200 \text{ bar}]$. Ce qui lui permet d'être un bon candidat pour une application de mesure à distance et sans fil de la surpression aérienne.

V.6. Application : mesure à distance de la surpression aérienne.

Dans le cadre d'applications de la défense et de la sécurité, il est nécessaire de caractériser la surpression aérienne pour valider les équations d'état des produits de détonation. La libération des gaz lors d'une explosion, à des vitesses supérieures à celle du son dans l'air, génère une discontinuité de pression. La solution de mesurer cette surpression sans fil proposée apporte de nombreux avantages en termes de simplicité, compacité et robustesse de mesure par rapport à la solution filaire classiquement utilisée [196].

La surpression dans l'air est l'élément principal conditionnant les effets externes de l'explosion. On y observe une augmentation très rapide de la pression au niveau du front de choc, suivie d'une décroissance quasiment exponentielle jusqu'à la pression ambiante et une phase de dépression. De nombreux capteurs de pression absolue ou différentielle existent sur le marché pour couvrir les gammes de pression souhaitée $[1.7-700] \text{ bar}$. [197].

Les capteurs sans fils actifs nécessitent une source d'énergie embarquée. Ils sont munis d'un circuit électronique de traitement de signal (filtrage, amplification et conversion) ainsi qu'un module d'émission qui leur permet de communiquer avec le lecteur. Dans ce type de capteurs, les mesures sont transmises en temps réel dans un format compatible et exploitable [3].

Le schéma synoptique du système de mesure sans fil de pression est illustré sur la figure V.17. Le capteur doit être associé avec un oscillateur produisant un signal alternatif et un amplificateur pour amplifier le signal de détection du capteur de pression. L'antenne est utilisée pour transmettre la tension de sortie du capteur de pression à un récepteur.

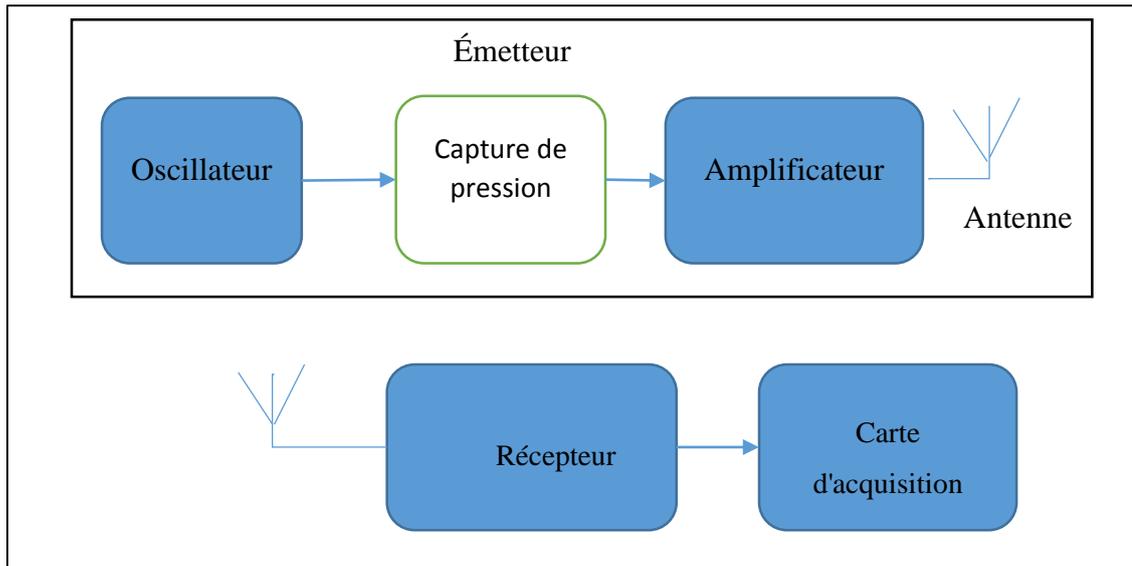


Figure IV.17 : Schéma synoptique de la mesure sans-fil de la pression.

V.7. Conclusion

Dans ce chapitre, les performances d'un capteur de pression PSFET piézoélectrique ont été étudiées. Un modèle de simulation sous environnement COMSOL Multi physiques a été établi. Les résultats de simulation montrent qu'il y a une bonne concordance avec ceux établis dans la littérature.

Enfin, étant donné que la réponse capacitive est linéaire dans la gamme de haute pression [0 ÷ 200 bar]. Nous avons proposé ce capteur pour une application militaire d'un système de mesure en haute pression. Ce système permet la mesure sans fil de la surpression aérienne.

Conclusion générale

Le développement de nouvelles techniques d'instrumentation dédiées à la caractérisation physique à l'échelle de nanomètre et à la fabrication de microstructures est actuellement un enjeu important qui suscite des recherches intenses. L'évolution de la technologie CMOS-MEMS a permis de réaliser des capteurs de pression miniatures, à faible coût et de haute performance et simple d'intégration.

Ce travail de thèse a été consacré à la modélisation et la simulation des capteurs de pression avec électronique associée PSFET.

Après avoir introduit les notions fondamentales et les fondements théoriques nécessaires à la compréhension du sujet. Nous avons présenté de façon générale le principe de détection d'un capteur de pression, les différentes méthodes de fabrication des capteurs de pression de la technologie MEMS vers l'intégration CMOS-MEMS. Un état de l'art de capteur de pression a été représenté dans le deuxième chapitre. Puis nous avons explicité les trois structures de capteurs de pression à effet de champ PSFET et leur les principes de fonctionnement ainsi que leurs méthodes de fabrication dans la technologie CMOS-MEMS. Par la suite, nous avons présenté un nouveau modèle décrivant le comportement du capteur de pression PSFET à détection capacitive de différentes formes de la membrane et pour différentes structures de diélectrique de la grille suspendue du MOSFET, qui constitue le cœur de cette étude. Une interface graphique a été mise en œuvre sous environnement Matlab à l'aide de l'interface GUI (Graphical User Interface) utilisant le modèle analytique. Cette interface permet de tracer les courbes de caractéristique $I(P)$ et $C(P)$ d'un PSFET et du capteur de pression capacitive respectivement.

Dans le but d'optimisation des performances de ce type des capteurs de pression. Nous avons établi un modèle de ce dispositif sous environnement COMSOL Multiphysics. Ce modèle, tient en compte de l'impact des dimensions de dispositif et de la technologie de fabrication. En outre, il permet aussi d'examiner l'influence de certains effets sur la réponse, sur la sensibilité du capteur, et sur les performances du capteur. Parmi lesquels on peut citer : l'effet de l'électrostatique appliqué, l'effet de la température, l'effet du type de MOSFET, l'effet des matériaux utilisés et l'effet des grandeurs d'influence.

Le modèle du capteur établi par SILVACO ATLAS est utilisé pour valider le comportement électrique du modèle (GUI) ainsi que le modèle de simulation FEM.

Les résultats montrent que ce type de capteurs de pression possède une réponse non linéaire, une grande sensibilité à la pression avec de très petites dimensions, l'effet électrostatique peut être négligeable, coefficient de température de sensibilité (TCS) presque stable, mais ils sont très sensibles à la température (offset), et qu'il faudra prévoir des circuits de compensation thermique pour obtenir des dispositifs à hautes performances. Nous avons déduit que les résultats de simulation sont conformes avec ceux de la théorie.

Les résultats obtenus montrent aussi que, pour une réponse optimale en pression, la surface de la membrane de forme circulaire doit être grande, par contre son épaisseur doit être faible avec une faible épaisseur de la cavité d'air. Il est clair que le capteur de pression à base SG-MOSFET avec un NMOS est très sensible à la pression en comparaison à celui avec un PMOS, quel que soit le matériau utilisé. Nous avons relevé une largeur optimale du canal W_g égale la demi-longueur de la membrane.

Les résultats obtenus peuvent ainsi contribuer à l'optimisation des performances du capteur et peuvent également fournir au concepteur plusieurs critères de choix.

La dernière partie de ce travail de thèse a été consacrée à l'étude des performances de pression PSFET piézoélectrique, pour cela un modèle de simulation par la méthode des éléments finis sous logiciel COMSOL Multiphysics a été établi. Le couplage entre les solveurs FEM et les simulateurs de circuits SPICE permet de déterminer les caractéristiques du capteur. Les résultats de simulation montrent que le capteur étudié a une réponse linéaire pour une gamme de pression allant de $[0 \div 200 \text{ bar}]$.

Enfin, nous avons proposé une utilisation du capteur de pression PSFET piézoélectrique pour mesure à distance et sans fil de la surpression aérienne.

Comme perspectives, il serait important, de compléter cette étude, en effectuant une analyse du capteur de pression PSFET piézorésistif. Cette étude permettra la caractérisation et l'optimisation des différentes structures de ce type des capteurs de pression. Ainsi l'utilisation d'un circuit comme le miroir de courant ou circuit à pont de Wheatstone pour la conception et le développement des capteurs de pression miniaturisés intégré basé sur l'effet piézoresistif dans un MOSFET pour une application biomédicale.

Références bibliographiques

- [1] M. M. Jatlaoui, "Capteurs passifs à transduction électromagnétique pour la mesure sans fil de la pression," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse 2009.
- [2] A. Georges and Coll, Les capteurs en instrumentation industrielle -7ème édition- Dunod, 2010.
- [3] S. Bouaziz, "Capteurs de température passifs sans fil micro-fluidique à interrogation radar," Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013.
- [4] M. Grout and P. Salaun, Instrumentation industrielle: Spécification et installation des capteurs et vannes de régulation -4ème édition-: Dunod, 2015.
- [5] F. Kerrour, "Etude et modelisation de capteurs de pression piezoresistifs et capacitif au silicium," Thèse de doctorat Université de constantine, 2008.
- [6] R. Martin, "Conception d'une architecture robuste pour l'acquisition de grandeurs physiques dans un système aéronautique critique," Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2015.
- [7] S. Chakkor, "E-diagnostic de processus physiques à base des méthodes de haute résolution Application : machines éoliennes," Thèse de doctorat, Université Abdelmalek Essaâdi, 2015.
- [8] G. T. Ciame See, B. Mireille, C. Blaise, C. André, and R. Michel, "Capteurs et actionneurs intelligents," Techniques de l'ingénieur Systèmes d'information et de communication, vol. base documentaire : TIB397DUO, 2005.
- [9] J. Esteves, "La technologie CMOS-MEMS pour des applications acoustiques," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- [10] J. J. Ruan, "Analyse et modélisation de l'impact des décharges électrostatiques et des agressions électromagnétiques sur les microcommutateurs microondes (MEMS RF)," Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [11] B. Mourad, "Conception et modélisation des MEMS : Application aux accéléromètres," Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014.
- [12] F. Randy Understanding Smart Sensors: Artech House, 2000.
- [13] P.-J. Chen, "Implantable wireless intraocular pressure sensors," PhD thesis, California Institute of Technology, 2009.
- [14] G. Q. Zhang and A. van Roosmalen, More than Moore: Creating High Value Micro/Nanoelectronics Systems: Springer US, 2009.
- [15] R. Ghodssi and P. Lin, MEMS Materials and Processes Handbook: Springer, 2011.

- [16] V. Cimalla, J. Pezoldt, and O. Ambacher, "Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, pp. 6386–6434, 2007.
- [17] B. Stephen, E. Graham, K. Michael, and W. Neil, *MEMS mechanical sensors*: Artech House, 2004.
- [18] V. K. Varadan, K. J. Vinoy, and S. Gopalakrishnan, *Smart material systems and MEMS: design and development methodologies*: John Wiley & Sons, 2006.
- [19] H. Fanet, *Micro et nano-électronique Bases - Composants - Circuits*: Dunod, 2006.
- [20] N. Jouvét, "Intégration hybride de transistors à un électron sur un noeud technologique CMOS," *Thèse de Doctorat, INSA de Lyon*, 2012.
- [21] H. Baltes, O. Brand, A. Hierlemann, D. Lange, and C. Hagleitner, "CMOS MEMS-present and future," in *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2002*, pp. 459-466.
- [22] J. Ruellan, "Conception, fabrication et caractérisation d'un capteur de conductivité thermique à base de nanofils de silicium," *Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes*, 2015.
- [23] A. Beddiaf, K. Fouad, and S. Kemouche, "Thermo mechanical modeling of Piezoresistive pressure sensor," *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.MO.S.)*, vol. 7, pp. 517-522, 2014.
- [24] A. Beddiaf, F. Kerrou, and S. Kemouche, "Thermal drift characteristics of capacitive pressure sensors," *Journal of Engineering Science & Technology*, vol. 11, pp. 346 - 361, 2016.
- [25] C.-L. Cheng, H.-C. Chang, C.-I. Chang, and W. Fang, "Development of a CMOS MEMS pressure sensor with a mechanical force-displacement transduction structure," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 25, p. 125024 (12pp), 2015.
- [26] H.-Y. Yu, M. Qin, J.-Q. Huang, and Q.-A. Huang, "A MEMS capacitive pressure sensor compatible with CMOS process," in *Sensors, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-4.
- [27] M. H. M. Khir, P. Qu, and H. Qu, "A Low-Cost CMOS-MEMS Piezoresistive Accelerometer with Large Proof Mass," *Sensors*, vol. 11, pp. 7892-7907, 2011.
- [28] C.-M. Sun, C. Wang, M.-H. Tsai, H.-S. Hsieh, and W. Fang, "Monolithic integration of capacitive sensors using a double-side CMOS MEMS post process," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, pp. 1-9, 2009.
- [29] N. A. M. Yunus, I. A. Halin, N. Sulaiman, N. F. Ismail, and O. K. Sheng, "Valuation on MEMS pressure sensors and device applications," *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 9, pp. 741-749, 2015.
- [30] A. Boukabache, P. Menini, and P. Pons, "Microcapteurs de pression," *Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle*, vol. base documentaire : DOC.R2 070, 2001.

- [31] B. Abdelaziz, "Etude, modélisation et simulation thermomécanique de capteur de pression au silicium " Thèse de doctorat Université des Frères Mentouri Constantine, 2017.
- [32] X. Chauffleur, "Modélisation par la méthode des éléments finis du comportement thermomécanique de capteurs de pression capacitifs et piezoresistifs en silicium " Thèse de doctorat, Université Paul Sabatie, 1998.
- [33] J. G. Webster, *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*: CRC Press, 1999.
- [34] F. Urban, J. Kadlec, R. Vlach, and R. Kuchta, "Design of a pressure sensor based on optical fiber bragg grating lateral deformation," *Sensors*, vol. 10, pp. 11212-11225, 2010.
- [35] D. En, C. S. Zhou, H. H. Wei, N. N. Wei, and X. L. Shi, "Research of MOEMS pressure sensor," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 273, pp. 524-527, 2013.
- [36] S. Banerji, P. Michalik, D. Fernández, J. Madrenas, A. Mola, and J. Montanyà, "CMOS-MEMS resonant pressure sensors: optimization and validation through comparative analysis," *Microsystem Technologies*, vol. 23, pp. 3909-3925, 2017.
- [37] A. R. H. Goodwin, K. N. Marsh, and W. A. Wakeham, *Measurement of the thermodynamic properties of single phases experimental thermodynamics* Elsevier, 2003.
- [38] T. Hoang, "Design and realization of SAW pressure sensor using Aluminum Nitride," Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.
- [39] H. Oh, W. Wang, K. Lee, I. Park, and S. S. Yang, "Sensitivity improvement of wireless pressure sensor by incorporating a SAW reflective delay line," *International journal on smart sensing and intelligent systems*, vol. 1, pp. 940-954, 2008.
- [40] J. M. Lysko, R. S. Jachowicz, and M. A. Krzycki, "Semiconductor pressure sensor based on FET structure," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 44, pp. 787-790, 1995.
- [41] S. Alcantara, A. Cerdeira, and G. Romero-Paredes, "MOS transistor pressure sensor," in *Second IEEE International Caracas Conference on Devices Circuits and Systems*, 1998, pp. 381-385.
- [42] M. Gad-el-Hak, *The MEMS handbook*: CRC Press 2002.
- [43] M. Nie, H. Bao, and Q.-A. Huang, "Capacitive pressure sensors," in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, ed, 2015, pp. 1-13.
- [44] Y. B. Gianchandani, O. Tabata, and H. Zappe, *Comprehensive microsystems vol. 1*: Elsevier 2008.
- [45] A. D. Sundararajan, "Design of analogue CMOS VLSI MEMS sensor," PhD thesis, Massey University, 2015.
- [46] K. Bhat and M. Nayak, "MEMS pressure sensors-an overview of challenges in technology and packaging," *J. ISSS*, vol. 2, pp. 1-10, 2013.

- [47] H. Cao, "Intraocular pressure (IOP) passive sensor modeling, design, fabrication and measurement," PhD thesis, Iowa State University, 2008.
- [48] P. Ripka and A. Tipek, *Modern Sensors Handbook*: ISTE 2007.
- [49] M. Olszacki, "Modélisation et optimisation de capteurs de pression piézorésistifs," Thèse de doctorat, Universités INSA de Toulouse, 2009.
- [50] A. N. Sohi, "A multifunctional MEMS pressure and temperature sensor for harsh environment applications," PhD thesis, University of Waterloo, 2013.
- [51] S. Mohamed, "Etude et modélisation de capteurs piézoélectriques, piézorésistifs et capacitifs," Thèse de doctorat Université des Frères Mentouri Constantine, 2017.
- [52] K. Suja, S. Mathew, and R. Komaragiri, "Optimized design of a stacked diaphragm MEMS pressure sensor for Tsunami warning system," in *Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)*, 2013, pp. 346-351.
- [53] P. Wang and Q. Liu, *Biomedical sensors and measurement*: Zhejiang University Press and Springer-Verlag Berlin 2011.
- [54] F. Kerrou, S. Kemouche, and A. Beddiaf, "Performance optimization of a capacitive pressure sensor," in *4th International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers*, 2015, pp. 101-105.
- [55] L. Cornelius T, *MEMS/NEMS Handbook Techniques and Applications vol. 1*: Springer, 2006.
- [56] S. Vittoz, "Modélisation et caractérisation de capteurs mécaniques intégrés à base d'hétérostructures AlGaIn/GaN pour les environnements hostiles," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [57] Y. Hezarjaribi and M. Hamidon, "Theoretical formulaion to evaluate capacitance for before and after touch point mems capacitive pressure sensors," *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, vol. 2, pp. 278-286, 2013.
- [58] E. G. Bakhoun and M. H. Cheng, "Capacitive pressure sensor with very large dynamic range," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 33, pp. 79-83, 2010.
- [59] J. Yong, "Contribution à l'étude d'un capteur de force piézoélectrique résonant à forte raideur pour interfaces haptiques aéronautiques," Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2013.
- [60] M. S. Vijaya, *Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*: CRC Press 2013.
- [61] A. Permuy, É. Donzier, and F. Rezgui, "Capteurs microélectroniques," *Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle*, 2004.

- [62] A. Chaehoi, "Conception et Modélisation de MEMS monolithique CMOS en technologie FSBM : Application aux accéléromètres," Thèse de doctorat, Université Montpellier II 2005.
- [63] G. Asch and Coll, Acquisition de données du capteur à l'ordinateur -3ème édition- Dunod, 2013.
- [64] P. G. Ruiz, K. De Meyer, and A. Witvrouw, Poly-SiGe for MEMS-above-CMOS Sensors: Springer, 2014.
- [65] G. Cao, X. Wang, Y. Xu, and S. Liu, "A Micromachined Piezoresistive Pressure Sensor with a Shield Layer," Sensors, vol. 16, p. 1286 (pp13), 2016.
- [66] S. S. Kumar and B. Pant, "Design principles and considerations for the 'ideal' silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review," Microsystem technologies, vol. 20, pp. 1213-1247, 2014.
- [67] H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. G. Korvink, and O. Tabata, Advanced Micro and Nanosystems .Vol. 2. CMOS – MEMS: Wiley -Vch, 2005.
- [68] S. D. Senturia, Microsystem Design: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [69] Y. Rosen and N. Elman, Biomaterials Science: An Integrated Clinical and Engineering Approach: Taylor & Francis, 2012.
- [70] Y. D. Winncy, Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies, 2015.
- [71] Y. Développement, "MEMS Pressure Sensor 2018- Market & Technologies Report - Sample."
- [72] Y. Développement, "MEMS Pressure Sensors Report," April 2013.
- [73] S. Quintero, S. Figueiredo, V. Takahashi, R. Llerena, and A. Braga, "Passive downhole pressure sensor based on surface acoustic wave technology," Sensors, vol. 17, p. 1635 (pp8), 2017.
- [74] B. A. Ganji, "Design and analysis of a novel MEMS capacitive tire pressure sensor with high sensitivity and linearity," Majlesi Journal of Telecommunication Devices, vol. 5, pp. 69-75, 2016.
- [75] G. Evgeni, G. Eric, and D. Arthur, Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices, Sensors and Actuators: Springer, 2010.
- [76] Merit Sensor: Pressure Sensor For All Your Automotive Engineering Needs?(<https://meritsensor.com/pressure-sensor-for-all-your-automotive-engineering-needs>)
- [77] S. Poeggel, D. Tosi, D. Duraibabu, G. Leen, D. McGrath, and E. Lewis, "Optical fibre pressure sensors in medical applications," Sensors, vol. 15, pp. 17115-17148, 2015.

- [78] X. Meng and Y. Zhao, "The Design and Optimization of a Highly Sensitive and Overload-Resistant Piezoresistive Pressure Sensor," *Sensors*, vol. 16, p. 348 (pp 12), 2016.
- [79] J. T. Kung and H.-S. Lee, "An integrated air-gap-capacitor pressure sensor and digital readout with sub-100 attofarad resolution," *Journal of Microelectromechanical systems*, vol. 1, pp. 121-129, 1992.
- [80] Z. Yu, Y. Zhao, L. Li, C. Li, X. Meng, and B. Tian, "Design optimization of a high-sensitive absolute micro-pressure sensor," *Sensor Review*, vol. 34, pp. 312-318, 2014.
- [81] G.-S. Chung, "Fabrication and characterization of a polycrystalline 3C-SiC piezoresistive micro-pressure sensor," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 56, pp. 1759-1762, 2010.
- [82] O. De Sagazan, E. Jacques, and T. Mohammed-Brahim, "Realization of pressure Sensors using FET detection on a Thin Si Membrane," *Procedia Engineering*, vol. 5, pp. 637-640, 2010.
- [83] C. Fillit, "Développement d'un banc de thermographie infrarouge pour l'analyse de la fiabilité des microsystèmes," Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011.
- [84] J. Marek, H.-P. Trah, Y. Suzuki, and I. Yokomori, *Sensors Applications Volume 4 :Sensors for Automotive Applications*: Wiley, Weinheim, 2003.
- [85] R. Lefevre, "Conception, développement et optimisation d'une micropompe MEMS à membrane pour dispositif médical d'Injection," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- [86] H. Qu, "CMOS MEMS Fabrication Technologies and Devices," *Micromachines*, vol. 7, p. 14 (pp 21), 2016.
- [87] H. Saha and C. R. Chaudhuri, "Complementary Metal Oxide Semiconductors Microelectromechanical Systems Integration (Review Papers)," *Defence Science Journal*, vol. 59, pp. 557-567, 2009.
- [88] C.-L. Dai, P.-W. Lu, C. Chang, and C.-Y. Liu, "Capacitive micro pressure sensor integrated with a ring oscillator circuit on chip," *Sensors*, vol. 9, pp. 10158-10170, 2009.
- [89] F. Tounsi, "MEMS Electrodynamic Microphone in CMOS technology: design, modeling and realization," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.
- [90] D. Deshmukh and S. Bhargava, "Investigation on Characteristics of Zirconium for MOSFET Pressure Sensors," *International Journal of Engineering Science and Computing*, vol. 7, pp. 6212-6214, 2017.
- [91] R. S. Jachowicz and Z. M. Ażgin, "FET pressure sensor and iterative method for modelling of the device," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97, pp. 369-378, 2002.

- [92] A. Ajay, K. Bhat, N. Bhat, and S. Kulkarni, "Novel MOSFET Based Pressure Sensor That Uses Combined Channel Piezoresistance and Gate Capacitance Effects," *Recent Trends in Sensor Research & Technology*, vol. 2, pp. 30-39, 2015.
- [93] L. Svensson, J. Plaza, M. Benitez, J. Esteve, and E. Lora-Tamayo, "Surface micromachining technology applied to the fabrication of a FET pressure sensor," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, pp. 80-83, 1996.
- [94] S. Kemouche and F. Kerrou, "Geometry effect of suspended membrane on the sensitivity of pressure sensor field effect transistor (PSFET)," in *The International Conference on Recent Advances in Electrical Systems (ICRAES'17)*, 2017, pp. 69-152.
- [95] C.-L. Dai, Y.-W. Tai, and P.-H. Kao, "Modeling and Fabrication of Micro FET Pressure Sensor with Circuits," *Sensors*, vol. 7, pp. 3386-3398, 2007.
- [96] J. M. Lysko, R. S. Jachowicz, and M. A. Krzycki, "Semiconductor pressure sensor based on FET structure," in *10th Conference Anniversary. Advanced Technologies in Instrumentation and Measurement Technology , (IMTC/94)*, 1994, pp. 1233-1236.
- [97] E. Hynes, M. O'Neill, D. McAuliffe, H. Berney, W. Lane, G. Kelly, et al., "Development and characterisation of a surface micromachined FET pressure sensor on a CMOS process," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 76, pp. 283-292, 1999.
- [98] S. Kemouche and F. Kerrou, "Performance Optimization of Pressure Sensor Based on Suspended Gate MOSFET," *Advanced Engineering Forum*, vol. 30, pp. 43-53, 2018.
- [99] C.-L. Dai, P.-W. Lu, C.-C. Wu, and C. Chang, "Fabrication of wireless micro pressure sensor using the CMOS process," *Sensors*, vol. 9, pp. 8748-8760, 2009.
- [100] J. Voorthuyzen and P. Bergveld, "The PRESSFET: An integrated electret-MOSFET based pressure sensor," *Sensors and Actuators*, vol. 14, pp. 349-360, 1988.
- [101] H. Berney, M. Hill, D. Cotter, E. Hynes, M. O'Neill, and W. Lane, "Determination of the effect of processing steps on the CMOS compatibility of a surface micromachined pressure sensor," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 11, pp. 402-408, 2001.
- [102] E. Hynes, P. Elebert, M. O'Neill, H. Berney, W. Lane, G. Kelly, et al., "Development of an FET Pressure Sensor Model and use to Predict Sensor Behaviour as a Function of Electrode Geometry," in *3rd Int. Conf. MSM, San Diego, USA, 2000*, pp. 185-188.
- [103] M. Hill, C. O'Mahony, H. Berney, P. Hughes, E. Hynes, and W. Lane, "Verification of 2-D MEMS model using optical profiling techniques," *Optics and lasers in engineering*, vol. 36, pp. 169-183, 2001.
- [104] C.-L. Dai, P.-H. Kao, Y.-W. Tai, and C.-C. Wu, "Micro FET pressure sensor manufactured using CMOS-MEMS technique," *Microelectronics Journal*, vol. 39, pp. 744-749, 2008.
- [105] J.-M. Sallese, W. Grabinski, V. Meyer, C. Bassin, and P. Fazan, "Electrical modeling of a pressure sensor MOSFET," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 94, pp. 53-58, 2001.

- [106] S. Baishya and S. Deb, "Modeling and simulation study of AC characteristics of an NMOS based High Pressure Sensor," in International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014, pp. 1-6.
- [107] T. Yu, B. X. Peng, and F. Q. Yu, "Absolute Pressure Sensor Based on Standard CMOS Process," *Advanced Materials Research*, vol. 875, pp. 2238-2242, 2014.
- [108] M. Feraille, "Study of Transport Properties in Strained transistors MOSFETs: Multi-scale Approach," *Thèse de Doctorat, INSA de Lyon*, 2009.
- [109] A. T. Bradley, R. C. Jaeger, J. C. Suhling, and K. J. Connor, "Piezoresistive characteristics of short-channel MOSFETs on (100) silicon," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 2009-2015, 2001.
- [110] C. Gallon, G. Reibold, G. Ghibaudo, R. Bianchi, and R. Gwoziecki, "Electrical analysis of external mechanical stress effects in short channel MOSFETs on (001) silicon," *Solid-State Electronics*, vol. 48, pp. 561-566, 2004.
- [111] P. K. Rathore and B. S. Panwar, "Design and optimization of a CMOS-MEMS integrated current mirror sensing based MOSFET embedded pressure sensor," in *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, 2013, pp. 443-448.
- [112] J. C. Doll and B. L. Pruitt, *Piezoresistor Design and Applications: Springer Science & Business Media*, 2013.
- [113] Y.-H. Zhang, L.-T. Liu, Z.-H. Zhang, Z.-M. Tan, H.-W. Lin, and T.-L. Ren, "A novel MOSFET pressure microsensor," in *8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*. 2006, pp. 614-616.
- [114] Z.-H. Zhang, T.-L. Ren, Y.-H. Zhang, R.-R. Han, and L.-T. Liu, "Low Power and High Sensitivity MOSFET-Based Pressure Sensor," *Chinese Physics Letters*, vol. 29, p. 088501 (3pp), 2012.
- [115] P. K. Rathore and B. S. Panwar, "CMOS-MEMS based current mirror MOSFET embedded pressure sensor for healthcare and biomedical applications," *Advanced Materials Research*, vol. 647, pp. 315-320, 2013.
- [116] P. K. Rathore and B. S. Panwar, "CMOS-MEMS integrated MOSFET embedded bridge structure based pressure sensor," in *India Conference (INDICON), 2013 Annual IEEE*, 2013, pp. 1-6.
- [117] S. Kumar, P. K. Rathore, and J. Akhtar, "A comparative study on P-and N-channel MOSFET embedded pressure sensing structures integrated with current mirror readout circuitry," in *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, 2016, pp. 1-4.
- [118] P. Kumar Rathore, P. Varshney, S. Prasad, and B. Panwar, "Finite element method based absolute pressure sensitivity optimized membrane type double cavity vacuum sealed piezoresistive sensor," *Sensor Review*, vol. 33, pp. 352-362, 2013.

- [119] P. K. Rathore and B. S. Panwar, "High sensitivity CMOS pressure sensor using ring channel shaped MOSFET embedded sensing," in IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (IEEE CONECCT), 2014, pp. 1-5.
- [120] P. K. Rathore, B. S. Panwar, and H. J. Pandya, "High sensitivity square ring channel shaped MOSFET embedded pressure sensor integrated with a current mirror readout circuitry," in IEEE SENSORS, 2013, pp. 1-4.
- [121] P. K. Rathore, B. S. Panwar, and J. Akhtar, "A novel CMOS-MEMS integrated pressure sensing structure based on current mirror sensing technique," *Microelectronics International*, vol. 32, pp. 81-95, 2015.
- [122] Z. Zhang, Z. Yan-Hong, L. Liu, and R. Tian-Ling, "A novel MEMS pressure sensor with MOSFET on chip," in SENSORS, 2008 IEEE, 2008, pp. 1564-1567.
- [123] R. R. Reston and E. S. Kolesar, "Pressure-sensitive field-effect transistor sensor array fabricated from a piezoelectric polyvinylidene fluoride film," in 11TH Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1989, pp. 918-919.
- [124] C. Ravariu, F. Ravariu, A. Rusu, D. Dobrescu, L. Dobrescu, C. Popa, et al., "A new job for the pseudo-MOS transistor: working in the pressure sensors field," in 9th International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2002, pp. 215-218 vol.1.
- [125] A. K. Sinha and M. Valle, "An approach to realize high value resistance using PMOS device at weak inversion for POSFET sensor," in ICM 2011 Proceeding, 2011, pp. 1-4.
- [126] R. S. Dahiya, G. Metta, and M. Valle, "Piezoelectric polymer oxide semiconductor field effect transistor (POSFET) devices for touch sensing," in 2nd International Workshop on Electron Devices and Semiconductor Technology, 2009, pp. 1-5.
- [127] L. Barboni and M. Valle, "POSFET touch sensing transducers: Interface electronics design methodology based on the transconductance-to-drain-current efficiency gm/ID ," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 201, pp. 377-386, 2013.
- [128] S. Caviglia, L. Pinna, M. Valle, and C. Bartolozzi, "Spike-Based Readout of POSFET Tactile Sensors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 64, pp. 1421-1431, 2017.
- [129] S. Gupta, H. Heidari, L. Lorenzelli, and R. Dahiya, "Towards bendable piezoelectric oxide semiconductor field effect transistor based touch sensor," in 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2016, pp. 345-348.
- [130] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, A. Adami, and L. Lorenzelli, "Piezoelectric oxide semiconductor field effect transistor touch sensing devices," *Applied Physics Letters*, vol. 95, p. 034105, 2009.
- [131] R. S. Dahiya, M. Valle, G. Metta, and L. Lorenzelli, "POSFET Based Tactile Sensor Arrays," in 2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, pp. 1075-1078, 2007.

- [132] C. Ravariu, F. Ravariu, D. Dobrescu, L. Dobrescu, C. Codreanu, and M. Avram, "A designing route for a pressure sensor with PZT layer," in 2001 International Semiconductor Conference. CAS 2001 Proceedings (Cat. No.01TH8547), 2001, pp. 379-382 vol.2.
- [133] J. T. Suminto and W. H. Ko, "Pressure-sensitive insulated gate field-effect transistor (PSIGFET)," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 21, pp. 126-132, 1990.
- [134] S. Deb and S. Baishya, "Modeling and simulation of DC characteristics of a novel NMOS based high pressure sensor," in International Conference for Convergence of Technology (I2CT), 2014, pp. 1-6.
- [135] B.-M. Kim, B.-J. Kim, and J.-S. Kim, "Fabrication and characterisation of field-effect transistor-type pressure sensor with metal–oxide–semiconductor/microelectromechanical systems processes," *Micro & Nano Letters, IET*, vol. 10, pp. 483-486, 2015.
- [136] H. J. Hwang, S.-Y. Kim, S. C. Kang, B. Allouche, J. H. Yang, and B. H. Lee, "Piezoelectrically modulated touch pressure sensor using a graphene barristor," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 58, p. SBBH03, 2019/02/18 2019.
- [137] V. Luboz, "Dysthyroidian exophthalmia surgery: planning and gesture assistance," Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2003.
- [138] T. Mohammed, "Caractérisation Fine et Modélisation Non-Linéaire des Transistors MOSFET," Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2013.
- [139] M. Ras lain, "Contribution à l'identification des paramètres de non idéalité dans les capteurs de pression piézorésistifs au Silicium," Thèse de doctorat, université de Constantine, 2009.
- [140] F. Kerrou and F. Hobar, "Modélisation d'un capteur de pression capacitive au silicium de formes carrée et rectangulaire," *Sciences & Technologie B*, pp. 63-70., 2008.
- [141] F. Kerrou and F. Hobar, "A novel numerical approach for the modelling of the square shaped silicon membrane," *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 6, pp. 52-57, 2006.
- [142] G. Blasquez, Y. Naciri, P. Blondel, N. B. Moussa, and P. Pons, "Static response of miniature capacitive pressure sensors with square or rectangular silicon diaphragm," *Revue de physique appliquée*, vol. 22, pp. 505-510, 1987.
- [143] D. Maier-Schneider, J. Maibach, and E. Obermeier, "A new analytical solution for the load-deflection of square membranes," *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 4, pp. 238-241, 1995.
- [144] W. Olthuis, "Chemical and physical FET-based sensors or variations on an equation," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 105, pp. 96-103, 2005.
- [145] J. Williams, W. B. Forfang, B. H. You, and I. H. Song, "Modal Analysis and Design of a Vertically Movable Gate Field Effect Transistor (VMGFET) Proposed for Low-Frequency Sensing Applications," presented at the Applied Mechanics and Materials, 2013.

- [146] M. Olszacki, C. Maj, M. Al Bahri, D. Peyrou, F. Kerrou, P. Pons, et al., "A multi-domain piezoresistive pressure sensor design tool based on analytical models," in 9th. International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems (EuroSimE). , 2008, pp. 1-4.
- [147] Y. Arthaud, "Contribution à une plate forme d'aide à la conception de Microsystème," Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [148] K. B. Balavalad, B. Sheeparamatti, and V. B. Math, "Design and Simulation of MEMS Capacitive Pressure Sensor Array for Wide Range Pressure Measurement," International Journal of Computer Applications, vol. 163, pp. 39-46, 2017.
- [149] V. Rochus, B. Wang, H. Tilmans, A. R. Chaudhuri, P. Helin, S. Severi, et al., "Fast analytical design of MEMS capacitive pressure sensors with sealed cavities," Mechatronics, vol. 000, pp. 1-7, 2016.
- [150] M. Al Bahri, "Influence de la température sur le comportement statique et dynamique des capteurs de pression capacitifs au silicium," Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 2005.
- [151] A. Simha, S. Kulkarni, and S. Meenatchisundaram, "An analytical method to determine the response of a micro capacitive pressure sensor," Sensors & Transducers, vol. 130, pp. 118-126, 2011.
- [152] P. Menini, "Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium," Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1998.
- [153] R. Bensegueni, "Contribution à l'étude du transport électrique à travers des oxydes très minces (< 10nm) dans des structures MOS," Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine1, 2016.
- [154] G. A. Ardila Rodriguez, "Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique," Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008.
- [155] A. Porcher, "Silicium poreux pour capteurs et MEMS résonants intégrés," Thèse de doctorat, Universités INSA de Lyon, 2009.
- [156] H. Ishiwara, "Current status of ferroelectric-gate Si transistors and challenge to ferroelectric-gate CNT transistors," Current Applied Physics, vol. 9, pp. S2-S6, 2009/01/01/ 2009.
- [157] M. Bhattacharjee, N. Mandal, H. Nemade, and D. Bandyopadhyay, "Simulation of a Voltage Controlled Resistor Mimicking the Geometry of a MOSFET Device having Graphite Channel," in COMSOL Conference in Bangalore, Bangalore,India, 2014.
- [158] K. J. Reddy, C. K. Malhi, R. Pratap, and N. Bhat, "Coupled numerical analysis of suspended gate field effect transistor (sgfet)," in 1st International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS), 2012, pp. 141-144.

- [159] P. S. Roy, D. Chakraborty, and M. Chattopadhyay, "A Study of Silicon based MEMS Capacitive Sensor for Absolute Pressure Measurement of a Specific Range," presented at the International Conference on Microelectronics, Circuits and Systems (MICRO-2014), 2014.
- [160] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication*: John Wiley & Sons, 2004.
- [161] M. Bao, *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*: Elsevier B.V, 2005.
- [162] G. Blazquez, P. Pons, and A. Boukabache, "Capabilities and limits of silicon pressure sensors," *Sensors and Actuators*, vol. 17, pp. 387-403, 1989.
- [163] D. Tsamados, Y. S. Chauhan, C. Eggimann, K. Akarvardar, H.-S. P. Wong, and A. M. Ionescu, "Finite element analysis and analytical simulations of Suspended Gate-FET for ultra-low power inverters," *Solid-State Electronics*, vol. 52, pp. 1374-1381, 2008.
- [164] J. A. Segovia, M. Fernandez-Bolanos, and J. M. Quero, "A novel suspended gate MOSFET pressure sensor," presented at the *Microtechnologies for the New Millennium 2005*.
- [165] M. Fernández-Bolaños, N. Abelé, V. Pott, D. Bouvet, G. Racine, J. Quero, et al., "Polyimide sacrificial layer for SOI SG-MOSFET pressure sensor," *Microelectronic engineering*, vol. 83, pp. 1185-1188, 2006.
- [166] J. Segovia, M. Fernandez-Bolaños, and J. M. Quero, "Design of a programmable pressure switch suspended gate MOSFET," in *Spanish Conference on Electron Devices*, 2005, pp. 525-528.
- [167] Y. Wang and V. Chodavarapu, "Differential Wide Temperature Range CMOS Interface Circuit for Capacitive MEMS Pressure Sensors," *Sensors*, vol. 15, pp. 4253-4263, 2015.
- [168] J. s. -Martin, "Etude par simulation monte carlo d'architectures de mosfet ultracourts a grille multiple sur," *Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITÉ PARIS XI ORSAY*.
- [169] A. Schroth, T. Blochwitz, and G. Gerlach, "Simulation of a complex sensor system using coupled simulation programs," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 54, pp. 632-635, 1996/06/01/ 1996.
- [170] Z. Juneidi, "Outils CAO pour Microsystèmes," *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG*, 2003.
- [171] N. Setter, D. Damjanovic, L. Eng, G. Fox, S. Gevorgian, S. Hong, et al., "Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications," *J. Appl. Phys.*, vol. 100, p. 051606, 2006.
- [172] J.-D. Warren, J. Adams, and H. Molle, "Arduino for robotics," in *Arduino robotics*, ed: Springer, 2011, pp. 51-82.
- [173] R. M. N. Jorge, J. Tavares, M. P. Barbosa, and A. P. Slade, *Technologies for Medical Sciences*: Springer Netherlands, 2017.

- [174] F. Boukazouha, "Conception, Réalisation, Modélisation et Caractérisation Expérimentale d'un Transformateur de Tension de Type Rosen," Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB), 2016.
- [175] J. Abergel, "Matériaux piézoélectriques à forte déformation pour l'actionnement microsystème," Université de Grenoble, 2014.
- [176] S. Le Dren, "Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrats pour des applications microtechniques," Lyon, INSA, 2000.
- [177] E. Boucher, "Elaboration et caractérisation de céramiques PZT bi-substituées et modélisation non-linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique," Lyon, INSA, 2002.
- [178] D. Wang and J. S. Chen, "Progress on the Applications of Piezoelectric Materials in Sensors," Materials Science Forum, vol. 848, pp. 749-756, 2016.
- [179] N. Chaban, "Innovating in the engineering of the thin oxide film strains : piezoelectric substrates," Université de Grenoble, 2012.
- [180] D. Hermelin, "Modélisation de dispositifs à ondes élastiques de surfaces en milieu contraint mécaniquement et applications," Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2010.
- [181] V. Kempe, Inertial MEMS Principles and Practice: Cambridge university Press, 2011.
- [182] O. Thierry, "Réduction des vibrations de structures composites complexes par dispositifs piézoélectriques shuntés. Application aux aubes de turbomachines," Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2016.
- [183] B. Yang, H. Liu, J. Liu, and C. Lee, Micro and Nano Energy Harvesting Technologies: Artech House Publishers, 2014.
- [184] F. Jacob, Handbook of modern sensors physics, designs, and applications 3rd ed: AIP Press (Springer), 2004.
- [185] B. Zhou, "Etude de l'amortissement piézoélectrique shunté appliqué aux roues aubagées désaccordées ", Ecole Centrale de Lyon, 2012.
- [186] E. Babesse, "Contrôle vibratoire semi actif par éléments piézoélectriques et récupération d'énergie ambiante," 2018.
- [187] G. Feld, E. Labouré, E. Hoang, and B. Revol, "Mesure de la déformation d'un matériau piézoélectrique par interférométrie," J3eA, vol. 7, p. 1013, 2008.
- [188] H. Winterfeld, L. Thormählen, H. Lewitz, E. Yarar, T. Birkoben, N. Niethé, et al., "A stress sensor based on a silicon field effect transistor comprising a piezoelectric AlN gate dielectric," Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 30, pp. 11493-11498, June 01 2019.

- [189] S. Gupta, H. Heidari, A. Vilouras, L. Lorenzelli, and R. Dahiya, "Device Modelling for Bendable Piezoelectric FET-Based Touch Sensing System," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 63, pp. 2200-2208, 2016.
- [190] M. Sung, K. Shin, and W. Moon, "A micro-machined hydrophone using piezoelectricity on gate of a field-effect transistor," in *2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers)*, 2015, pp. 379-382.
- [191] S. Agarwal and E. Yablonovitch, "A Nanoscale Piezoelectric Transformer for Low-Voltage Transistors," *Nano Letters*, vol. 14, pp. 6263-6268, 2014/11/12 2014.
- [192] M. Brissaud, *Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration: Presses polytechniques et universitaires romandes*, 2007.
- [193] O. Mareschal, "Study of a piezoelectric bulk acoustic wave resonator in thin film technology," *Université Paris-Est*, 2011.
- [194] B.-E. Park, H. Ishiwara, M. Okuyama, S. Sakai, and S.-M. Yoon, *Ferroelectric-Gate Field Effect Transistor Memories: Springer*, 2016.
- [195] A. Mhenni, M. Hussien, and M. Karray, "Improvement of the Piezo-electric Ring Actuator technique (P-RAT) using 3D numerical simulations," in *68th Canadian Geotechnical conference ,Québec*, 2015.
- [196] J. Fourmann, H. Aubert, P. Pons, J. Luc, and A. Lefrançois, "Mesure ultra-rapide à distance et sans fil de la surpression aérienne en environnement extrême," presented at the *Journées Nationales Microondes (JNM)*, Bordeaux, France, 2015.
- [197] J. Fourmann, "Développement d'un système de mesure sans fil de surpression en environnement extrême," *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)*, 2017.

**Intitulé : Etude et simulation d'un micro capteur de pression avec électronique
associée : PFET**

Résumés

De nos jours, la plupart des capteurs sont «intelligents» où le capteur et leur électronique sont intégrés sur une même puce. L'évolution de la technologie CMOS- MEMS a permis de réaliser des capteurs de pression miniatures, à faible coût et de haute performance.

Les travaux effectués lors de cette thèse portaient sur l'étude et la simulation d'un micro capteur de pression avec électronique associée. Ce nouveau capteur de pression à effet de champ PSFET présente certains avantages importants, tels que le signal de sortie (tension ou courant) amplifiée simultanément. De plus, la compatibilité totale de l'intégration avec la technologie CMOS des fonctionnalités pour évoluer vers un capteur intelligent.

Nous avons débuté notre travail par une étude bibliographique sur l'état de l'art sur les capteurs de pression ainsi que ses différentes méthodes de fabrication.

Le cœur de cette étude est la modélisation et simulation du PSFET à base de grille suspendue SG-MOSFET, nous avons développé un modèle analytique qui décrit le comportement du capteur de différentes formes de la membrane et pour différentes structures de diélectrique de la grille suspendue du MOSFET. Une simulation par la méthode de l'élément fini du capteur est réalisée sous environnement COMSOL. Les résultats montrent que ce type des capteurs de pression possède une réponse non linéaire, une grande sensibilité à la pression avec de très petites dimensions. L'influence de la forme géométrique de la membrane, de dimensions et type de MOSFET sur le courant de drain et sur la sensibilité à la pression ont été analysées. Les résultats obtenus peuvent ainsi contribuer à l'optimisation des performances du capteur et peuvent également fournir au concepteur plusieurs critères de choix.

La réponse du capteur de pression PSFET à base de transistor piézoélectrique en fonction de la pression et a été déterminée dans le dernier chapitre. Ce capteur pourra être candidat pour la mesure à distance et sans fil de la surpression aérienne, car il présente une réponse linéaire dans une gamme de hautes pressions.

Mots clé : Capteur de pression à effet de champ, CMOS-MEMS, Modélisation, Optimisation, Sensibilité, COMSOL.

Title: Study and simulation of a micro pressure sensor with associated electronics: PSFET

Abstract

These days, most of the sensors are ‘smart’ in nature. In such sensors, the sensing elements and associated electronics are integrated on the same chip.

This work is focusing on the study and simulation of a micro pressure sensor with associated electronics. This new pressure Sensor Field Effect Transistor PSFET shows some significant advantages such as the output signal (voltage or current). Furthermore, the full compatibility with complementary metal oxide semiconductor (CMOS) technology features to evolve to an intelligent sensor.

We have begun our work with a bibliographic study on the state of the art of the pressure sensor device and the various methods of manufacturing of this sensor. The core of this study is the modeling and simulation of Pressure Sensor Based on suspended gate MOSFET; we have developed an analytical model describing the behavior of the sensor. We have investigated several membrane shapes and for different dielectric structures of the suspended gate. Finite element method based COMSOL is used to simulate the behavior of the PSFET pressure sensor. The results show that this type of pressure sensors has a non-linear response and high sensitivity with very small dimensions. We have investigated on the influence of the geometric shape of the membrane, dimensions and type of MOSET on the drain current and on the pressure sensitivity. This study allows us to optimize the sensor performance in function to the application for which it is dedicated.

The response of the PSFET pressure sensor based on piezoelectric transistor as a function of pressure was determined in the last chapter. This sensor can be used to measure the air overpressure, due to his linear response in a high-pressure range.

Keywords : FET pressure sensor, CMOS-MEMS, Modeling, Optimization , Sensibility, COMSOL software

العنوان: دراسة ومحاكاة جهاز استشعار الضغط والإلكترونيات المرتبطة به

الملخص

في هذه الأيام، تكون معظم المستشعرات "ذكية" بطبيعتها. في هذه المستشعرات، يتم دمج عناصر الاستشعار والإلكترونيات المرتبطة بها على الشريحة نفسها. إن تطور تكنولوجيا CMOS-MEMS قد جعل من الممكن صنع أجهزة استشعار الضغط مصغرة والمنخفضة التكلفة وعالية الأداء.

يركز العمل المنجز خلال هذه الأطروحة على دراسة ومحاكاة مستشعر الضغط والإلكترونيات المرتبطة به. يحتوي مستشعر ضغط الجديد ذو تأثير الحقل PSFET هذا على بعض المزايا المهمة، مثل إشارة الخرج (الجهود أو التيار) التي يتم تضخيمها في وقت واحد. بالإضافة إلى ذلك، فإن التوافق التام للتكامل مع ميزات تقنية موسفت متكامل CMOS يسهل عملية تطوره إلى مستشعر ذكي.

جوهر هذه الدراسة هو نمذجة ومحاكاة مستشعر الضغط المبني على موسفت ذات بوابة معلقة SG-MOSFET؛ لقد قمنا بتطوير نموذج تحليلي يصف سلوك المستشعر بحيث يأخذ بعين الاعتبار أشكال للأغشية وللإنشاءات العازلة المختلفة للبوابة المعلقة. يتم استخدام COMSOL القائم على طريقة العناصر المنتهية لمحاكاة سلوك مستشعر ضغط. أظهرت النتائج أن هذا النوع من أجهزة استشعار الضغط لديه استجابة غير خطية وحساسية عالية بأبعاد صغيرة جدًا. لقد بحثنا في تأثير الشكل الهندسي للغشاء، وأبعاد ونوع الموسفت على تيار التصريف وعلى حساسية الضغط. نتيج لنا هذه الدراسة تحسين أداء المستشعر في الوظيفة إلى التطبيق المخصص لها.

استجابة جهاز استشعار الضغط PSFET المبني على ترانزستور كهرو ضغطية بدالة للضغط تم تحديدها في الفصل الأخير. يمكن أن يكون هذا المستشعر مرشحًا للقياس عن بُعد ولاسلكيا للضغط الزائد نظرا لاستجابة الخطية في مجال الضغوط العالية.

كلمات البحث: جهاز استشعار الضغط , CMOS-MEMS ، النمذجة ، التحسين ، الحساسية ، برامج COMSOL