



Université des Sciences et de la Technologie d'Oran  
Mohamed Boudiaf

Faculté de Génie Electrique  
Département d'Électronique

---

## THÈSE

---

Présentée pour l'obtention du  
**DIPLOME DE DOCTORAT ES-SCIENCES**

Par

***BENMESSAOUD Mourad***

Spécialité : *Électronique*  
Option : *Micro -Electronique*

*Intitulée :*

**Conception et Modélisation des MEMS :  
Application aux Accéléromètres**

Devant le jury en date de la soutenance : 08/ 12 / 2014

Mr. KADRI Mohamed

Mr. MEKKAKIA MAAZA Nasr-Eddine

Mr. HAMDADOU Nasr-Eddine

Mr. CHALABi Djilali

Mr. DEROUICHE Ziane

Mr. SEKKAL Nadir

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Prof. (ENP-Oran)

MC. (USTO-MB)

Prof. (ENP-Oran)

Prof. (ENP-Oran)

Prof. (USTO-MB)

Prof. (ENP-Oran)



# *Dédicace :*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère la plus chère qui grâce à elle que j'arrive à réaliser ce travail (que Dieu lui accorde sa miséricorde).*

*Mon père qui a été toujours le symbole du courage et de soutien durant mon parcours universitaire.*

*Ma femme qui m'a appris le sens de la patience.*

*Mon frère unique Hamid*

*Mes sœurs*

*A toute la famille Benmessaoud*

*Mes amis et mes proches.*

# *Remerciements :*

*Je tiens à exprimer mes remerciements à :*

*Monsieur Kadri Mohamed, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.*

*Monsieur Mekkakia Maaza Nasr Eddine, pour m'avoir encadré et pour toute l'aide qu'il m'a fournie tout le long de ce travail.*

*Monsieur Hamdadou Nasr-Eddine, Monsieur Chalabi Djillali, Monsieur Derouiche Ziane et Monsieur Sekkal Nadir pour avoir accepté d'être examinateurs de cette thèse.*



# **Sommaire**

# Sommaire

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Introduction générale :</b> ..... | 1 |
|--------------------------------------|---|

## **Chapitre I : Description des différents types d'accéléromètres**

|   |    |
|---|----|
| I.1. Introduction.....  | 6  |
| I.2. Accéléromètres à base de détection piézoélectrique.....                          | 6  |
| I.2.1. Les générateurs piézoélectriques.....  | 6  |
| I.2.1.a. Approche analytique du modèle.....   | 8  |
| I.2.1.b. Analyse et conception d'un accéléromètre piézoélectrique.....                | 10 |
| I.2.1.c. La sensibilité de l'accéléromètre piézoélectrique.....                       | 11 |
| I.3. Accéléromètres à base de structure résonante.....                                | 13 |
| I.3.a. Principe de fonctionnement.....  | 14 |
| I.3.b. L'application de la structure résonante.....                                   | 14 |
| I.3.c. Théorie de détection à structure résonnante.....                               | 16 |
| I.4. Accéléromètres à base de détection piezorésistive.....                           | 18 |
| I.4.a. Le principe de fonctionnement.....   | 18 |
| I.5. Accéléromètres à base de détection thermique.....                                | 22 |
| I.5.a. La conversion électro –thermique.....  | 24 |
| I.5.b. Phénomènes physiques.....  | 25 |
| I.5.c. Principe de fonctionnement de l'actionneur électrothermique en forme de U..... | 27 |
| I.6. Accéléromètres à détection Optique.....  | 30 |
| I.6.a. Modèle d'accéléromètre Optique.....  | 31 |
| I.7. Conclusion .....   | 35 |

## **Chapitre II. Technologies et fabrication des microsystemes MEMS**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction.....   | 37 |
| II.2. Le micro-usinage en surface.....                                | 37 |
| II.2.1 La micromécanique.....   | 39 |
| II.2.2. La planarisation mécano chimique.....                         | 40 |
| II.2.3. Les problèmes de contact de surface.....                      | 41 |
| II.2.4. Le micro usinage de surface intégrée.....                     | 41 |
| II.2.4. a. Procédés microélectroniques et microsystemes intégrés..... | 42 |
| II.2.4. b Procédés microsystemes enterré.....                         | 42 |
| II.2.4. c. Processus du microsysteme.....                             | 43 |
| II.3. Le micro-usinage en volume.....                                 | 44 |
| II.3.1. La gravure anisotrope du silicium.....                        | 46 |
| II.3.1.a. Intérêt de la gravure anisotrope.....                       | 46 |
| II.3.1.b Les solutions de gravure anisotrope du silicium.....         | 47 |
| II.3.2. Les différents types de micro-usinage en volume.....          | 48 |
| II.3.2.a. Le micro-usinage en volume face avant.....                  | 48 |
| II.3.2.b. Le micro-usinage en volume face arrière.....                | 49 |
| II.3.2.c. Le micro-usinage en volume face avant et arrière.....       | 49 |
| II.3.2.d. Le micro-usinage en volume électrochimique.....             | 50 |
| II.4. D'autres technologies.....                                      | 51 |

|  |    |
|--|----|
| II.4.1. Les microsystèmes sur SOI..... | 51 |
| II.4.2. Le LIGA.....                   | 51 |
| II.5. Conclusion.....                  | 54 |

### **Chapitre III. Modélisation d'un accéléromètre capacitif en technologie MEMS**

|  |    |
|--|----|
| III.1. Présentation mécanique de l'accéléromètre.....                | 56 |
| III.1.1. Techniques de détection capacitive.....                     | 56 |
| III.1.2. Exemple d'un accéléromètre capacitif commercialisé.....     | 58 |
| III.2. Conception d'un accéléromètre MEMS.....                       | 59 |
| III.2.1. Introduction.....   | 59 |
| III.2.2. Processus de micro fabrication.....                         | 60 |
| III.2.3. Principe de l'opération.....                                | 62 |
| III.2.4. Conception du dispositif.....                               | 64 |
| III.2.5. Suspension mécanique.....                                   | 65 |
| III.2.6. Facteur d'atténuation et de qualité.....                    | 66 |
| III.2.7. Connaissance de base d'un dispositif de MEMS capacitif..... | 67 |
| III.2.8. Analyse de la performance du système.....                   | 69 |
| III.2.9. Analyse de la sensibilité.....                              | 72 |
| III.3. Conclusion.....   | 73 |

### **Chapitre IV. Simulation et discussion des résultats**

|  |    |
|--|----|
| IV.1. Introduction.....  | 76 |
| IV.2. Simulation, discussion des résultats et optimisation.....  | 76 |
| IV.2.1. Effet de l'accélération $a$ sur le déplacement de la masse mobile $x$ : .....  | 77 |
| IV.2.2. Effet de l'accélération sur la différence capacitive.....  | 78 |
| IV.2.3. Effet de déplacement de la masse mobile $x$ sur la différence capacitive:.....   | 79 |
| IV.2.4. Effet de variation de la largeur de la poutre $W_b$ sur le déplacement de la masse mobile $x$ en fonction de l'accélération $a$ .....            | 80 |
| IV.2.5. Effet de la variation de la largeur de la masse mobile $W_m$ sur le déplacement $x$ en fonction de la largeur de la poutre $W_b$ : .....         | 81 |
| IV.2.6. Effet de la variation de la largeur de la masse mobile $W_m$ sur la fréquence de résonance $f_0$ en fonction de la largeur de la poutre $W_b$ .. | 83 |
| IV.2.7. Effets de la variation de la longueur de la poutre du ressort $L_b$ sur la fréquence $f_0$ en fonction de la largeur de la poutre $W_b$ .....    | 84 |
| IV.2.8. Effet de l'accélération $a$ sur la tension de sortie $V_S$ .....   | 85 |
| IV.3. Conclusion.....  | 86 |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Conclusion générale.....</b> | <b>89</b> |
|---------------------------------|-----------|

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Références bibliographiques.....</b> | <b>92</b> |
|---|-----------|

# Liste des figures

**Liste des figures :**

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Une poutre mobile en or à une couche photorésistante.....   | 3  |
| Figure 1.1 : Principe de la piézoélectricité.....  | 7  |
| Figure 1.2 : Modes d'excitation d'un barreau piézoélectrique.....  | 8  |
| Figure 1.3 : Différentes structures de type bimorphe.....  | 8  |
| Figure 1.4 : Structure simple à modéliser.....   | 9  |
| Figure 1.5 : Structure du transducteur piézoélectrique.....  | 10 |
| Figure 1.6: Schéma du micro-accéléromètre proposé utilisant le mode 33 à effet<br>Piézoélectrique.....   | 11 |
| Figure 1.7 : Schéma d'élément micromécanique résonnant.....  | 15 |
| Figure 1.8 : Trois simples implémentations d'un capteur à résonance. (a) : une poutre<br>suspendu, (b) : poutre maintenu-maintenu, (c) : double diapason fini..... | 16 |
| Figure 1.9 : Schéma d'une poutre maintenu-maintenu.....  | 16 |
| Figure 1.10: Structure à détection piezorésistive.....   | 18 |
| Figure 1.11: Détection piezorésistive combinant un capteur interdigital du (IDT) et un<br>polymère semi-conducteur.....  | 20 |
| Figure 1.12 : Exemple d'une poutre piezorésistif de l'accéléromètre.....   | 22 |
| Figure 1.13 : Exemple de transducteur piezorésistif (Accéléromètre).....   | 22 |
| Figure 1.14 : Accéléromètre à détection thermique.....   | 24 |
| Figure 1.15 : Distribution de température selon le plan horizontal de l'accéléromètre<br>thermique.....  | 24 |
| Figure 1.16: (a) Schéma, (b) image MEB d'un convertisseur électrothermique à poutre<br>suspendue.....  | 25 |
| Figure 1.17: Schéma de principe (vue transversale) d'un bilame thermique.....  | 26 |
| Figure 1.18 : Schéma de principe (vue de dessus) d'un actionneur thermique bimorphe.....   | 26 |
| Figure 1.19 : Vue de dessus schématique de l'actionneur électrothermique en forme de<br>U.....   | 28 |
| Figure 1.20 : Schéma du système simplifié en une dimension.....  | 29 |
| Figure 1.21 : Flux de chaleur transmis par conduction.....   | 29 |
| Figure 1.22 : Flux de chaleur échangé par convection.....  | 30 |
| Figure 1.23 : Flux de chaleur échangé par rayonnement.....   | 31 |
| Figure 1.24 : La géométrie et détection de dispositif.....   | 32 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.25 : La réponse en fréquence d'un accéléromètre à une accélération de $170\mu\text{g}$ à 650 Hz.....  | 33 |
| Figure. 1.26. Sensibilité d'accéléromètre interdigital à 80 Hz.....  | 35 |
| Figure 2.1 : Micro-usinage en surface.....   | 39 |
| Figure 2.2 : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface. (a) avant et (b) après gravure des oxydes sacrificiels.....  | 40 |
| Figure 2.3 : Photos MEB d'éléments micromécaniques fabriqués par micro-usinage de surface (technologie MUMPS). (a) charnière, (b) dents d'engrenage, (c) ressort pivotant..... | 40 |
| Figure 2.4 : Photos MEB de structures micro-usinées en surface. (a) avec planarisation, (b) sans planarisation.....  | 41 |
| Figure 2.5 : Photo MEB d'un dimple sous une couche de polysilicium suspendue.....  | 42 |
| Figure 2.6 : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface intégrée..  | 43 |
| Figure 2.7 : Schéma en coupe d'une technologie MEMS intégrée avec parties micro systèmes enterrées.....  | 44 |
| Figure 2.8 : schéma en coupe d'un microsystème intégré avec parties micro systèmes déposées après l'électronique.....  | 45 |
| Figure 2.9 : Micro-usinage en volume.....  | 45 |
| Figure 2.10 : Capteur magnétique réalisé par micro-usinage en volume.....  | 46 |
| Figure 2.11 : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en volume face avant compatible CMOS.....   | 46 |
| Figure 2.12 : Schéma représentant l'avancée de la gravure anisotrope à partir d'ouvertures triangulaires.....  | 47 |
| Figure 2.13 : Photo MEB d'une microstructure en pont obtenu par micro-usinage en volume par gravure anisotrope du silicium du substrat.....                                    | 48 |
| Figure 2.14 : Schéma des différentes microstructures que l'on peut obtenir par micro-usinage en volume face avant.....   | 49 |
| Figure 2.15 : Schéma des différentes structures résultantes d'un micro-usinage en volume face arrière.....   | 50 |
| Figure 2.16 : Schéma en coupe d'une structure à masse suspendue obtenue en micro-usinage en face avant et en face arrière.....   | 51 |
| Figure 2.17 : Schéma en coupe de structures suspendues par micro-usinage électro-chimique en volume, face arrière (a) et face avant (b).....                                   | 51 |
| Figure 2.18 : Schéma en coupe de la technologie de micro-usinage sur SOI.....  | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 2.19 : Procédé LIGA pour la fabrication de pièces métalliques ou de moules<br>métalliques pour injection de plastiques.....   | 54 |
| Figure 3.1 : Présentation mécanique du système.....  | 57 |
| Figure 3.2 : Exemples de détection par déplacement capacitif: (a) plat mobile, (b) à<br>section variable, et (c) diélectrique mobile.....  | 58 |
| Figure 3.3 : Un capteur capacitif différentielle.....  | 59 |
| Figure 3.4: Schéma fonctionnel de l'accéléromètre ADXL50.....  | 60 |
| Figure 3.5 : Accéléromètre à détection capacitive type ADXL.....   | 60 |
| Figure 3.6: Processus de microfabrication d'un CMOS – MEMS.....  | 62 |
| Figure 3.7: Schéma de l'accéléromètre.....   | 63 |
| Figure 3.8: Schéma équivalent de l'accéléromètre.....  | 63 |
| Figure 3.9: Différents schémas d'interfaces capacitives.....   | 64 |
| Figure 3.10: Schéma d'un micro accéléromètre capacitif.....  | 64 |
| Figure 3.11: Conceptions générale d'un accéléromètre à peigne de MEMS.....   | 66 |
| Figure 3.12: Structure détaillé du ressort de l'accéléromètre.....   | 67 |
| Figure 3.13: Diagramme schématique d'un dispositif capacitif de MEMS.....  | 69 |
| Figure 3.14: Capacité différentielle d'un MEMS accéléromètre à poutres.....  | 72 |
| Figure 4.1: Déplacement de masse mobile en fonction de l'accélération.....   | 80 |
| Figure 4.2.: La sensibilité capacitive vs l'accélération.....  | 81 |
| Figure 4.3: Sensibilité de capacité vs le déplacement de la masse mobile.....  | 82 |
| Figure 4.4: Déplacement de la masse mobile vs l'accélération avec de différente $W_b$ ....   | 83 |
| Figure 4.5 : Tracé de la sensibilité du déplacement $S_d$ en fonction de la largeur $W_b$ pour<br>de différentes largeurs de la poutre $W_m=80\mu\text{m}$ , $150\mu\text{m}$ , $200\mu\text{m}$ ..... | 84 |
| Figure 4.6 : Tracé de la fréquence $f_0$ en fonction de la largeur $W_b$ pour de différentes<br>largeurs de la masse mobile.....   | 85 |
| Figure 4.7: Tracé de la fréquence $f_0$ en fonction de la largeur $W_b$ pour de différentes<br>longueurs de la poutre du ressort.....  | 86 |
| Figure 4.8 : Variation de la tension $V_s$ en fonction de l'accélération $a$ .....   | 87 |

# Liste des tableaux

**Liste des tableaux:**

Tableau 4.1: Paramètres physiques et géométriques du modèle.....79

# Abréviation

**MEB** : Microscope Electronique à Balayage.

**KOH** : HydrOxyde de Potassium.

**TMAH** : Hydroxyde de Tétra-Méthyle Ammonium.

**SOI** : Silicon On Insulator, silicium sur isolant.

**RIE** : Reactive Ion Etching, gravure par plasma.

**FSBM** : Front Side Bulk Micromachining.

**CMP** : Circuits Multi-Projets.

**CIC** : Chip Implémentation Center.

**RGT** : Resonant Gate Transistor.

**CAO** : Conception Assisté par Ordinateur.

**CVD** : Chemical Vapor Deposition.

**EDP** : Ethylène Dyamine Pyrocathécol.

**IDT**: Inter Digital Transducer.



# **Introduction générale**

## **Introduction aux 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 (Micro-Electro-Mechanical-Systems).

Un capteur est un organe de recueil d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du temps électrique). Vu de l'extérieur, le capteur peut se modéliser comme un générateur (capteur actif) ou comme une impédance (capteur passif). Certains capteurs sont dits « composites » c'est à dire composés de deux parties ayant un rôle bien défini :

- 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.

Lorsque le corps d'épreuve et/ou l'élément sensible est en silicium, il peut être regroupé avec une électronique de prétraitement. Il s'agit alors de capteurs intégrés.

Les avantages d'une telle structure sont nombreux : fiabilité, coût, dimensions réduites, meilleur conditionnement du signal.

Un capteur est dit intelligent quand il intègre une chaîne de mesure incluant un système intelligent (microcontrôleur) et une interface de communication bidirectionnelle. La chaîne de mesure est ainsi constituée du capteur principal sensible à la grandeur physique à mesurer, d'un ou plusieurs capteurs secondaires sensibles aux grandeurs physiques pouvant influencer sur le résultat de la mesure, de l'électronique de conditionnement et d'un système programmable à microcontrôleur.

## **La technologie MEMS:**

La micro technologie est un ensemble de techniques de fabrication permettant de réaliser des structures et des systèmes de petites dimensions de l'ordre du micromètre et qui accomplissent des fonctions de précision [1]. C'est typiquement le cas des MEMS (Micro-electro-mechanical-système) qui se rapporte à la technologie de microfabrication ainsi touchés par l'engouement des industriels pour la miniaturisation.

Les MEMS ont une particularité de pouvoir intégrer sur un même substrat des parties aussi différentes que des éléments mécaniques, des capteurs, des actionneurs ou une partie microélectronique de commande et de traitement de l'information.

La partie électronique se rapporte sur des procédés de fabrication des circuits intégrés (CMOS, Bipolaire, BICMOS), tandis que les parties mécaniques sont fabriquées à l'aide de procédés qui éliminent certaines parties du wafer ou ajoutent de nouvelles couches structurales pour former le dispositif mécanique [2].

Le principal avantage est la réduction de l'encombrement et de la masse du dispositif, ce qui est très important pour de nombreuses applications médicales ou spatiales ou autres.

L'utilisation de technologies proches de la microélectronique permet de plus d'envisager une production de masse à moindre frais assuré par des techniques de « post-processing » où des milliers de composants peuvent être fabriqués sur le même wafer de silicium.

Ces technologies de fabrication de microsystèmes sont dérivées de celles de fabrication de la micro électronique utilisant les mêmes techniques des générations de masque (la photolithographie, le micro-usinage en volume et le micro-usinage en surface, etc).

La première publication concernant un MEMS opérationnel date de 1967, c'est une poutre résonnante à base de transistor MOS (figure 1) [1]. Mêmes techniques de fabrication sont conservées 10 ans plus tard après l'invention du circuit intégré à base de transistors. Cependant, l'intérêt pour les MEMS sera plus long à la venir et concernera initialement les capteurs au début des années 80. Les produits MEMS les plus populaires sont aujourd'hui les têtes d'imprimante à jet d'encre et les

accéléromètres [1]. Des applications plus complexes comme la commande de l'ouverture des airbags des voitures, les projecteurs numériques où les bobines sont remplacés par des supports numériques, prennent le relais avec des retombées non négligeables. On le voit bien, les MEMS sont maintenant assez matures pour les applications industrielles.

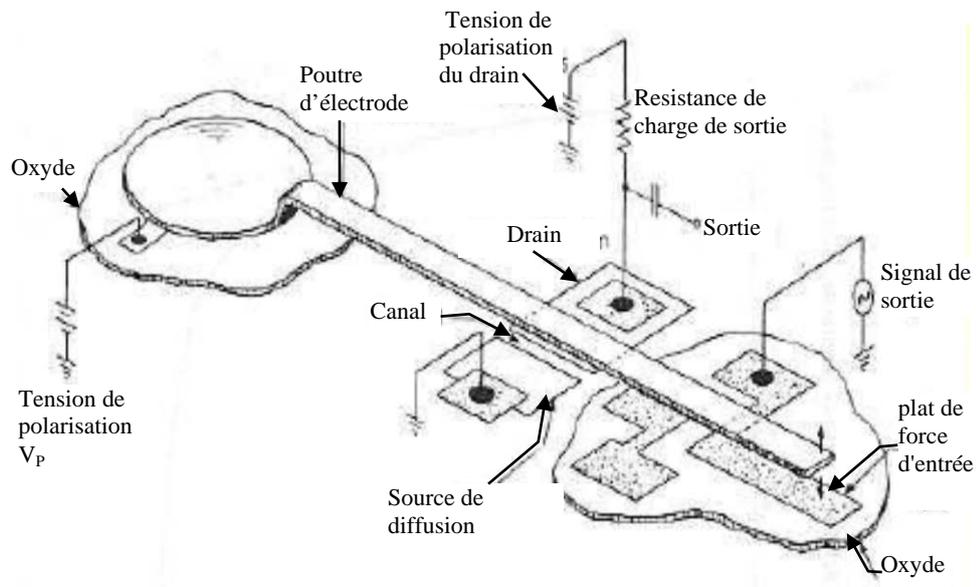


Figure 1 : Une poutre mobile en or à une couche photorésistante [1, 3].

Un des premiers microsystèmes à avoir été développé et industrialisé est le micro-accéléromètre. Ses domaines d'utilisation sont variés, il est utilisé :

- Pour déclencher le gonflage des airbags des véhicules en cas de choc brutal.
- Dans les systèmes de navigation. Il sert au calcul et au contrôle des trajectoires des avions, missiles et automobiles, car toute modification de direction se traduit par un changement d'accélération.
- Dans le domaine médical, il est intégré dans les pacemakers, qui servent à stimuler le cœur défaillant des patients par des impulsions électriques.

Quand le patient commence à courir, le pacemaker modifie les impulsions envoyées au cœur pour les adapter à l'intensité de l'effort physique.

L'accéléromètre détecte alors tout changement de rythme d'activité physique.

Dans le futur, on pense intégrer un accéléromètre dans les stylos pour sécuriser les signatures : enregistrement temps réel de la signature (tracé, vitesse, accélération).

## **Objectif de la thèse :**

Ce travail de thèse consiste à étudier et améliorer les performances de différents types d'accéléromètres à base de MEMS par l'optimisation et la modélisation des paramètres qui s'intègrent dans leurs conceptions en essayant d'améliorer un modèle de précision et de qualité.

La thèse est structurée en quatre chapitres :

- Le premier décrit les différents types d'accéléromètres à base de MEMS ainsi que les principaux types d'applications, puis nous traiterons les différentes approches employées pour améliorer le rendement.
- Dans le deuxième chapitre, on expose la technologie de fabrication des capteurs MEMS basée sur des procédés microélectroniques.
- Un modèle d'accéléromètre capacitif sera présenté au troisième chapitre.
- Une simulation comportementale de l'accéléromètre capacitif en fonction des paramètres technologiques seront présentés au chapitre quatre suivie d'une traduction des résultats obtenus.
- Enfin nous terminerons par une conclusion générale où nous citerons les différents paramètres technologiques obtenus pour l'optimisation du modèle de l'accéléromètre étudié.

# **Chapitre I**

## **Description des différents types d'accéléromètres**

## **I. Description des différents types d'accéléromètres:**

### **I.1. Introduction :**

Un accéléromètre mesure l'accélération subie par un objet, exprimée en  $m/s^2$  ou en nombre de "g" qui correspond à l'accélération de la pesanteur moyenne terrestre. 1g est l'accélération subie par un objet lorsqu'il est soumis à la seule force gravitationnelle terrestre ; 0-2g correspond à l'accélération d'une personne se mettant en mouvement ; 5-30g est l'accélération subie par un conducteur lors d'un accident de voiture; 10 000g est l'ordre de grandeur de l'accélération subie par une balle au départ d'un fusil ( $1g = 9.8m.s^{-2}$ ) [4].

Les accéléromètres fonctionnent par principe de mesure de l'accélération, mesurant la force exercée sur un corps d'épreuve, ou encore la déformation que cette dernière engendre sur une structure. Il existe de différentes techniques pour mesurer le déplacement du corps d'épreuve ou pour transformer l'action de l'accélération sur le capteur en signal électrique suivant son application (piézoélectricité, structure résonante, piézorésistivité, thermique, optique et capacitif).

### **I.2. Accéléromètres à base de détection piézoélectrique :**

#### **I.2.1. Les générateurs piézoélectriques :**

Il a été découvert la première fois par Jacques et Pierre curie en 1880. L'origine physique de la piézoélectricité surgit en raison de l'asymétrie de charge dans la structure en cristal.

Il existe trois principaux types de générateurs. Les générateurs électromagnétiques permettent d'obtenir des puissances intéressantes, mais ce sont des dispositifs macroscopiques, puisque leur miniaturisation et leur intégration sont toujours des défis à relever [5]. Les générateurs électrostatiques sont des dispositifs microscopiques aussi qui nécessitent des techniques d'implémentations ardues. La dernière catégorie concerne les générateurs piézoélectriques qui constituent une alternative pour l'intégration microscopique pour ce type de dispositifs.

Les générateurs piézoélectriques peuvent produire des puissances relativement élevées pour des structures de grandes dimensions excitées avec des amplitudes d'accélération élevées.

Les microsystèmes à base de matériaux piézoélectriques en couches minces sont les plus utilisés. Cet engouement est dû principalement à l'amélioration des propriétés des couches minces piézoélectriques. Nous rappelons que le principe de l'effet piézoélectrique direct est la génération de charges électriques sous l'effet d'une contrainte mécanique. Inversement, la structure se déforme sous l'effet d'un champ électrique. Ce phénomène est dû à la formation d'un dipôle lors de la séparation des charges dans les structures cristallines (figure 1.1).

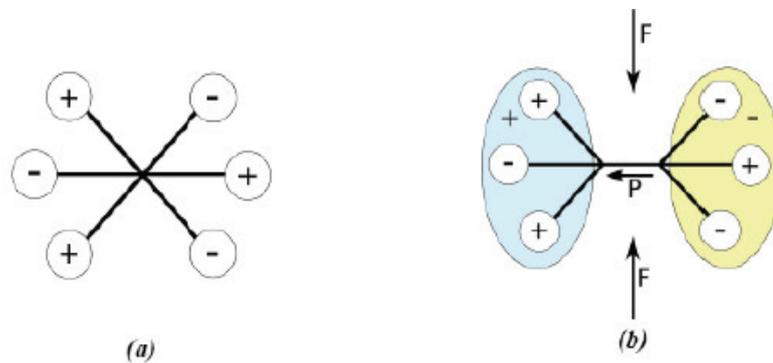


Figure 1.1 : Principe de la piézoélectricité [6].

L'intérêt se repose sur des structures simples, dites bimorphes, formées d'un substrat et de couches de matériau piézoélectrique. Dans ce modèle, il est nécessaire de s'intéresser aux propriétés des matériaux de type PZT32 qui présentent des propriétés électromécaniques très intéressantes (couplage et pertes) et qui peuvent être déposées en couche minces.

Pour ces structures bimorphes, deux modes de fonctionnement sont définis. Les deux modes dépendent des directions de la tension et de la force générées qui peuvent être perpendiculaires (mode 31) ou parallèles (mode 33) comme illustré sur la figure 1.2.

En général, le mode utilisé pour les structures en flexion est le mode 31 à cause de la faible épaisseur des couches PZT mise en œuvre.

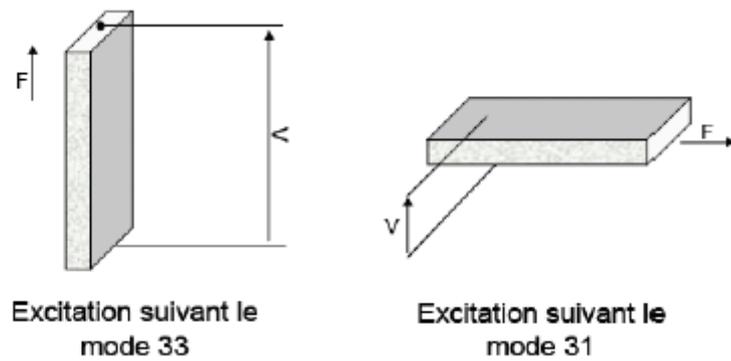


Figure 1.2 : Modes d'excitation d'un barreau piézoélectrique.

La figure 1.3 présente quatre exemples de structures de type bimorphe. La quatrième structure est constituée d'une cale entre deux couches de PZT avec une masse à l'extrémité de la poutre.

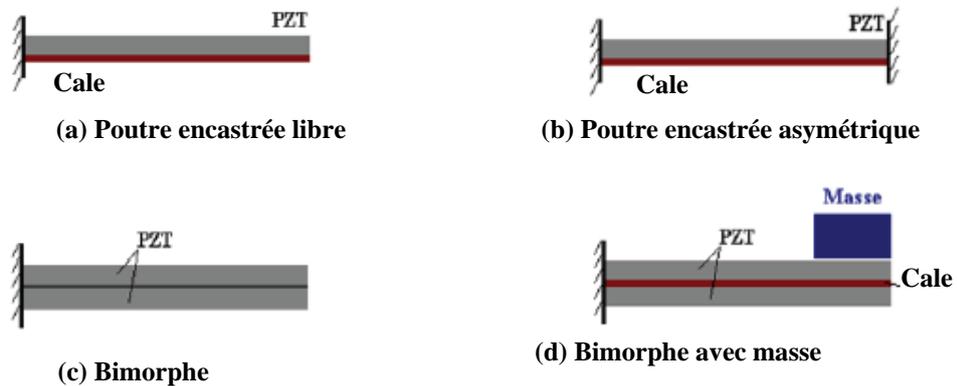


Figure 1.3 : Différentes structures de type bimorphe [5].

### I.2.1.a. Approche analytique du modèle:

Une approche raffinée du modèle électrique consiste à étendre l'étude à une description qui se rapproche de plus du modèle physique et à une plus large plage de fonctionnement. En raffinant le modèle, l'impact des caractéristiques physiques et géométriques sur le comportement du générateur sont prise en considération. La prise en compte de ces détails constitue un nouveau niveau d'abstraction.

Dans ce cas, la construction des modèles se fait par description analytique en utilisant les équations différentielles ordinaires, en développant les relations entre les variables du système à modéliser.

Les variables dépendent naturellement de leurs variations dans le temps en fonction des structures et des matériaux utilisés.

Pour construire le modèle analytique, les équations différentielles du système sont développées pour la structure unidimensionnelle de la figure 1.4 à partir des équations (1.1) et (1.2) constitutives de la piézoélectricité qui sont données ci-dessous :

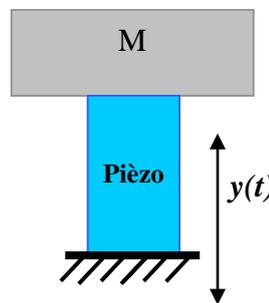


Figure 1.4 : Structure simple d'un système piézoélectrique.

$$\delta = \frac{\sigma}{Y} + dE \quad (1.1)$$

$$D = d\sigma + \varepsilon E \quad (1.2)$$

$\delta$  : La déformation dans la direction de l'application de la force.

$\sigma$  : La contrainte mécanique appliquée ( $\text{N.m}^{-2}$ ).

$E$  : Le champ électrique ( $\text{V.m}^{-1}$ ).

$D$  : Le déplacement électrique ( $\text{C.m}^{-2}$ ).

$Y$  : Le module d'élasticité ( $\text{N.m}^{-2}$ ).

$d$  : Le coefficient de couplage piézoélectrique ( $\text{C.N}^{-1}$ ).

$\varepsilon$  : La constante diélectrique du matériau piézoélectrique ( $\text{F.m}^{-1}$ ).

Un modèle d'un transducteur piézoélectrique détaillé est présenté par la figure 1.5. La structure est composée de deux couches de matériau de type PZT symétriques et d'une cale intermédiaire en laiton. L'extrémité libre de la poutre supporte une masse et l'autre extrémité est encastree [5].

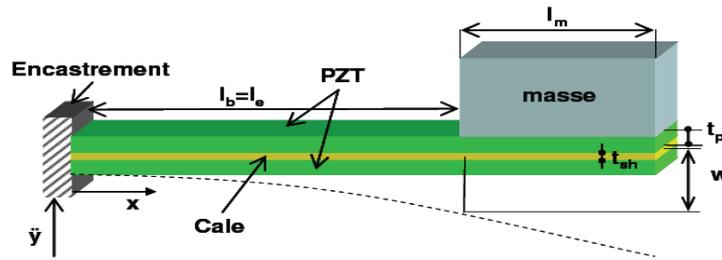


Figure 1.5 : Structure du transducteur piézoélectrique.

$t_p$  et  $t_{sh}$  sont respectivement les épaisseurs de la couche piézoélectrique et de la cale.

$(l_b + l_m)$  est la longueur de la poutre.

### I.2.1.b. Analyse et conception d'un accéléromètre piézoélectrique :

En raison de ses grands coefficients d'accouplement électromécaniques, la stabilité de la température et l'impédance électrique élevée, un accéléromètre piézocéramique a été proposé comme produit de remplacement pour le commutateur mécanique utilisé dans les airs bag. Les efforts actuels sur les accéléromètres piézoélectriques de type MEMS sont motivés par la tendance de la miniaturisation qui peut potentiellement offrir une performance élevée.

Dans un accéléromètre piézoélectrique, la structure mécanique se déforme une fois qu'elle est soumise à l'accélération; une force est alors induite dans le matériel piézoélectrique et résulte une charge électrique.

Pour une structure multicouche avec une géométrie donnée, la sensibilité mécanique d'une porte à faux est plus élevée que celle de la membrane et du pont.

Pour une application d'une pression unidimensionnelle dans les PZT, il existe deux modes de direction de polarisation :

- Mode 33 ou mode transversal,
- Mode 31 ou mode vertical.

Ces deux modes sont les plus connus et les plus utilisés.

Le coefficient d'accouplement électromécanique  $d_{33}$  du PZT est 2 à 3 fois plus élevé que  $d_{31}$ . Une structure en poutre dans le mode 33 avec des électrodes interdigitées est utilisée afin d'obtenir un rendement électrique plus élevé pour la fonction de

sensibilité, de plus, la capacité équivalente de la structure de PZT qui affecte la tension de sortie améliore la conception de circuit du stockage d'énergie.

Pour construire le PZT à base de microstructure, une couche mince  $\text{PbTiO}_3$  (PT) est utilisée comme une couche d'amortisseur pour obtenir une meilleure adhérence avec le substrat.

Le PZT à base de microsystème est ainsi concentré sur des poutres de PZT/PT/ $\text{SiO}_2$ /Si avec des électrodes inter-digitées où le silicium est conçu comme la masse sismique (figure 1.6).

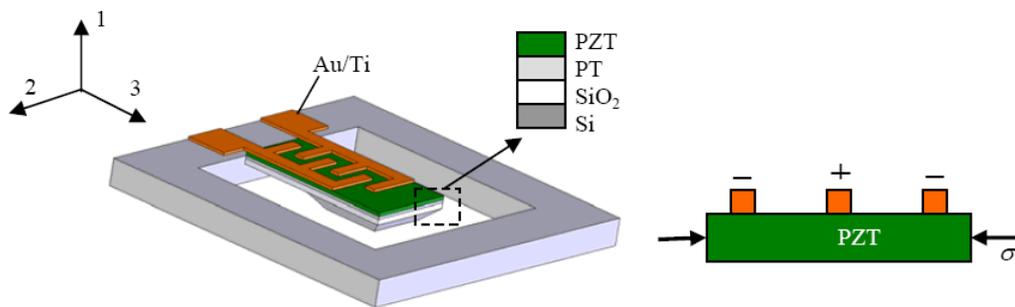


Figure 1.6: Schéma du micro-accéléromètre proposé utilisant le mode 33 à effet piézoélectrique [7].

### I.2.1.c. La sensibilité de l'accéléromètre piézoélectrique :

Les propriétés principales d'un accéléromètre sont la sensibilité et la gamme de fréquence de fonctionnement. La sensibilité est définie comme le rapport au rendement électrique (charge ou tension) de l'entrée mécanique (force ou accélération). La bande où la sensibilité concerne pratiquement la gamme de fréquence de fonctionnement. L'accéléromètre est limité par la première fréquence de résonance du dispositif.

Pour une structure piézoélectrique en poutres multicouche ( $w$ : largeur,  $l$ : longueur), une dérivée des équations qui fonctionnent en mode 31 du capteur et du déclencheur à été développée. L'analyse de ce travail est basée sur cette dérivation afin d'évaluer la sensibilité d'accélération, y compris le mode 33.

A une accélération d'entrée  $a$ , la charge produite entre les électrodes est donnée par:

$$Q = d_{33} E_3 C_M M(z_M - z_i) w l \quad (1.3)$$

Où :

$C_M$  est la courbure sous le moment de torsion appliqué à l'extrémité libre.

$z_M$  est l'axe neutre.

$z_i$  est la mesure à partir d'une référence au centre de chaque couche.

(Les indices inférieurs  $i=1, 2, \text{ et } 3$  se rapportent à  $\text{SiO}_2$ , PT, et PZT respectivement).

On définit :

$$Z_i = z_i - z_M \quad (1.4)$$

Quand la surface inférieure de la poutre est choisie comme référence,  $C_M$  peut être calculé par:

$$C_M = \frac{\sum E_i A_i}{\sum E_i A_i \sum E_i (I_i + A_i Z_i^2) - (\sum z_i E_i A_i)^2} \quad (1.5)$$

$A_i$  est la section de la poutre.

Le moment total  $M$  agit sur la poutre, peut être considéré comme la somme du moment  $M_1$  induit par la masse de la poutre et du moment  $M_2$  induit par la masse sismique. Pour simplifier :

$$M_1 = al^2 \sum \rho_i t_i w / 2 \quad (1.6)$$

$$M_2 = M_s al \quad (1.7)$$

Où  $M_s$  est la masse sismique.

$\rho_i$  et  $t_i$  sont la densité et l'épaisseur de masse de chaque couche respectivement.

La sensibilité de charge  $S_q$  (unité: C/g, g est l'accélération de la pesanteur) peut être écrite par:

$$S_q = d_{33} EC_M w l (z_M - z_i) [M_s l + l^2 \sum \rho_i t_i w / 2] \quad (1.8)$$

Où :  $d_{33}$  est le coefficient d'accouplement électromécanique.

En conséquence, la sensibilité de la tension  $S_v$  (la tension de sortie par l'accélération de la pesanteur (unité: V/g)) est donnée par [7]:

$$S_v = S_q / C \quad (1.9)$$

Où  $C$  est la capacité équivalente entre les électrodes, elle est donnée par la relation (1.10), en négligeant l'effet de contrainte :

$$C = \varepsilon \cdot b \cdot t_3 / d \quad (1.10)$$

$\varepsilon$ : Constante diélectrique du PZT.

$b$ : Distance transversal recouverte entre deux électrodes.

$d$ : Gap d'électrode.

On peut constater qu'un gap d'électrode large a comme conséquence une plus grande sensibilité de tension.

La première fréquence normale de résonance d'une structure en faisceau de poutre

$$\text{est: } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} \quad (1.11)$$

Où  $m$  est la masse équivalente et  $k$  est la constante équivalente d'élasticité.

$$\text{Où : } k = 3EI / l^3 \quad (1.12)$$

Le total  $EI$  des poutres multicouche peut être calculé par:

$$EI = \sum E_i (I_i + A_i Z_i^2), \quad (1.13)$$

Où  $E_i$  et  $I_i$  sont le module de Young et le secteur de l'inertie de chaque couche,  $A_i$  est la section.

### I.3. Accéléromètres à base de structure résonante :

La résonance est une propriété d'un système pour décrire une réponse à une certaine fréquence déterminée par les paramètres du système. La fréquence spécifique est obtenue quand un système maintient l'énergie d'entrée avec un minimum de perte.

On peut observer la résonance dans les systèmes mécaniques, chimiques, optiques, magnétiques et électroniques ainsi que dans des systèmes comportant des éléments multiples.

À une échelle microscopique, des logiciels d'exploitation à la résonance augmentent les effets des petites forces et du rapport signal/bruit de dispositif [8].

### **I.3.a. Principe de fonctionnement :**

Les premiers accéléromètres basés sur ce type de détection ont été présentés en 1990, fabriqués avec du quartz, le principe est de mesurer la variation de la fréquence de résonance due à l'accélération d'une structure en oscillation.

Généralement les accéléromètres micro-usinés dans le silicium transfèrent la force à inertie de la masse d'épreuve à une force axiale sur la structure résonante, modifiant ainsi sa fréquence de résonance [2].

Les techniques d'actionnement pour faire osciller le corps d'épreuve sont nombreuses : piézoélectrique, thermique, opto-thermique..etc.

L'avantage de ce type de détection, c'est que la mesure est directement digitale. La fréquence de sortie est un signal digital qui est mesuré par un compteur, peut atteindre une sensibilité jusqu'à 700Hz/g. Cette mesure de résonance se permet aussi pour tester le fonctionnement de la structure mécanique. Selon le dispositif conçu il est possible de mesurer les accélérations verticales ou latérales. Une structure suspendue oscille au dessous d'une masse sismique servant d'électrode. On mesure la distance séparant la poutre résonnante et le corps d'épreuve. Lors de l'accélération, il résulte une intermodulation des fréquences de la structure résonante et de la masse sismique.

Le capteur est constitué d'un résonateur et d'une masse sismique mobile latéralement. Le résonateur est un pont suspendu mis en oscillation thermiquement.

Lors de l'accélération, la masse sismique contraint ou étire la structure oscillante changeant ainsi sa fréquence de résonance.

### **I.3.b. L'application de la structure résonante:**

L'opération à la résonance est non seulement avantageuse pour les déclencheurs micromécaniques mais également pour la détection [8].

La détection à structure résonnante a été mise en application dans de nombreux dispositifs pour la mesure de la pression, de l'humidité, de la température, de l'accélération, de l'écoulement de la masse, du gaz spécifique, de la détection biologique, de la force et du champ magnétique. L'élément de détection de résonance est souvent réalisé dans un grand dispositif qui transmet l'effet du paramètre à mesurer

à une variation de la masse ou de la constante du ressort ou un autre paramètre de l'élément détecteur de résonance. L'élément détecteur de résonance peut prendre un certain nombre de formes tel qu'une poutre, un double diapason fini.

Les caractéristiques résonnantes de ce système peuvent être changées de diverses manières. Cependant, la technique la plus courante est de moduler la constante du ressort ou la masse de l'élément résonnant. Le changement de l'une ou l'autre de ces paramètres peut être contrôlé par la variation de la fréquence de résonance du système donnée par la relation suivante :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.14)$$

Tandis que la variation du coefficient d'atténuation a comme conséquence un changement d'amplitude du déplacement. Le changement de la masse d'épreuve ou de la constante d'amortissement change la fréquence du système.

En résumé, les avantages techniques de la détection de résonance sont d'une haute sensibilité, une gamme dynamique étendue du potentiel, une bonne linéarité, un faible bruit et une basse puissance de potentialité. Les caractéristiques de l'élément résonnant sont contrôlés par de différentes techniques (capacitive, optique, piezorésistive) utilisés pour mesurer le déplacement du dispositif résonnant.

La figure 1.7 représente un schéma d'une poutre micromécanique qui fonctionne comme un détecteur de résonance.

Une théorie pour des mesures statiques et dynamiques a été développée pour la détection résonnante. Nous explorerons alors la résolution, la gamme dynamique et les limites de linéarités pour les sondes micromécaniques résonnantes ainsi l'étude de cas de l'application du principe de détection résonnante pour la mesure de l'accélération.

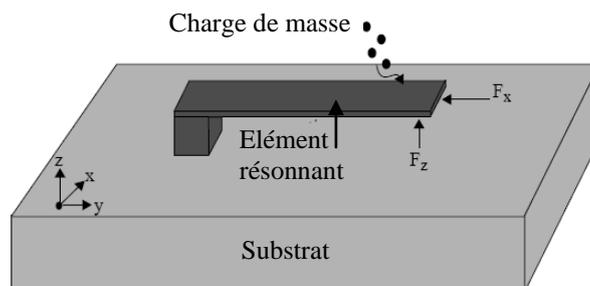


Figure 1.7 : Schéma d'un élément micromécanique résonnant [8].

**I.3.c. Théorie de détection à structure résonnante:**

Partant par une théorie générale de résonance mécanique, essentiellement l'analyse d'un élément résonnant où le paramètre à mesurer est couplée sous une certaine forme afin de changer les caractéristiques de résonance du système [8].



Figure 1.8 : Trois simples implémentations d'un capteur à résonance. (a) : une poutre suspendu, (b) : poutre maintenu-maintenu, (c) : double diapason fini.

Comme présenté sur la figure 1.8, l'élément résonnant prend une variété de différentes formes. La construction de l'élément de détection est généralement simple pour réduire l'encombrement des modes vibratoires voisins. Les caractéristiques de l'élément résonnant sont contrôlées en mesurant son déplacement par méthode optique ou électronique.

Le dispositif résonnant est plus utilisé dans les capteurs de force ou dans les capteurs de masse. L'effet de la mesure a typiquement comme conséquence une variation dans la fréquence de résonance de la structure.

La réponse d'un système résonnant d'une charge axiale statique externe ou d'un effet de masse statique de chargement a été analysée analytiquement par plusieurs sources.

La procédure d'analyse commence par l'équation unidimensionnelle d'Euler-Bernoulli et en suite par la méthode d'énergie de Rayleigh-Ritz.

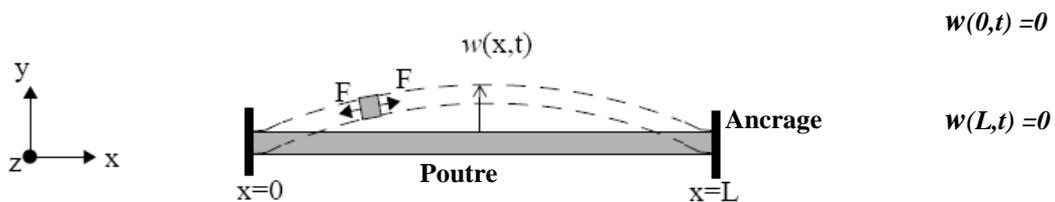


Figure 1.9 : Schéma d'une poutre maintenu-maintenu.

Le mouvement de la poutre est modélisé par l'équation d'Euler Bernoulli.

D'après la figure 1.9, on peut écrire une équation pour le recourbement mécanique d'une poutre soumise à une force de tension axiale  $F$  comme:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \xi \frac{\partial w}{\partial t} - F \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1.15)$$

Où  $A$  est la superficie de la poutre.

La solution  $w(x, t)$  peut être résolue par la méthode de séparation des variables où:

$$w(x, t) = \phi(x) \cdot q(t) \quad (1.16)$$

Des solutions aux différentes équations respectivement peuvent être résolues. L'équation pour la forme d'une poutre en fonction de coordonnée de position peut être écrite sous:

$$\phi(x) = C_1 \cos\left(\frac{\lambda x}{L}\right) + C_2 \sin\left(\frac{\lambda x}{L}\right) + C_3 \cosh\left(\frac{\lambda x}{L}\right) + C_4 \sinh\left(\frac{\lambda x}{L}\right) \quad (1.17)$$

Les constantes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$  peuvent être évaluées selon la forme d'intérêt.  $\lambda$  est un paramètre sans dimensions lié à la longueur d'onde. La dépendance de temps peut être exprimée sous forme d'équation de masse-ressort-amortisseur donnée par :

$$M_{eff} \ddot{q} + B_{eff} \dot{q} + K_{eff} q = 0 \quad (1.18)$$

Où des expressions pour  $M_{eff}$  et  $K_{eff}$  peuvent être écrites par:

$$M_{eff} = \int_0^L \rho A \phi^2(x) dx \quad (1.19)$$

$$M_{eff} = \frac{EI}{L^3} \int_0^L \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{F}{L} \int_0^L \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 dx \quad (1.20)$$

En utilisant la méthode de Rayleigh-Ritz et les expressions ci-dessus pour la constante effective du ressort et la masse de la poutre, on peut obtenir une évaluation pour la constante du ressort ainsi que la fréquence normale de la poutre mécanique:

$$\omega_n^2 = \frac{K_{eff}}{M_{eff}} \quad (1.21)$$

Pour la poutre maintenu-maintenu vibrante en mode fondamental, la fréquence normale pour une force axiale constante  $F$  sur la longueur de la poutre peut être écrite en terme de fréquence de résonance nominale en évaluant les intégrales dans les équations (1.19) et (1.20).

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 + \frac{0.293FL^2}{12EI}} \quad (1.22)$$

$L$  est la longueur de la poutre.

$E$  et  $I$  sont le module de Young et le secteur de l'inertie respectivement.

Tandis que l'analyse ci-dessus calcule la fréquence en fonction de la force, nous avons supposé dans la solution de l'équation que la force axiale varie lentement en fonction du temps.

#### I.4. Accéléromètres à base de détection piezorésistive :

##### I.4.a. Le principe de fonctionnement:

La détection piezorésistive utilise des matériaux résistants. Cette résistance varie suivant la pression externe appliquée. Les paramètres physiques appliqués peuvent être une pression, une force ou une accélération. [9].

Une structure typique pour des microcapteurs piezorésistifs est montrée sur la figure 1.10. Les résistances sont habituellement construites sur un diaphragme de silicium.

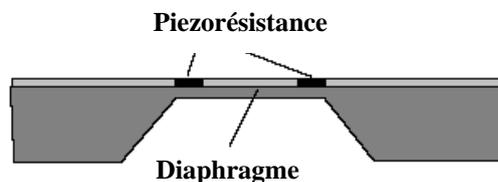


Figure 1.10: Structure à détection piezorésistive [9].

La déflexion du diaphragme mène au changement de dimension des résistances, ayant pour résultat, une variation de résistance en raison de l'effet piezorésistif en silicium:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \cdot \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1.25)$$

Où :

$\Delta R$  est la variation de la résistance,

$R$  est la résistance originale,

$\nu$  est le rapport de Poisson,

$\Delta l$  est la variation de longueur de la résistance,

$l$  est la longueur originale de la résistance,

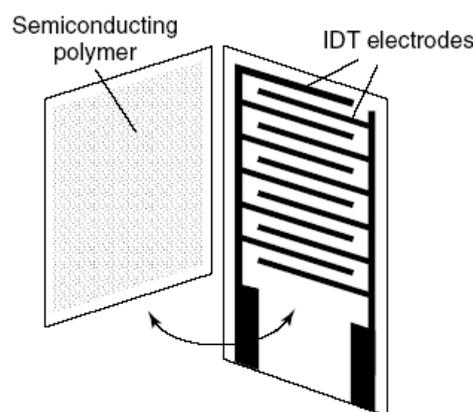
$\Delta\rho$  et  $\rho$  la variation de résistivité et la résistivité de la résistance, respectivement.

On le constate facilement que la résistance de la matière utilisée pour ce type de microcapteur piezorésistif est proportionnelle à la pression externe quand la variation de la résistivité est ignorée puisque le changement de dimension est proportionnel à la pression appliquée.

Un autre type de microcapteur piezorésistif est schématisé sur la figure 1.11, où une feuille de polymère de semi-conducteur est mise sur les électrodes interdigitales du capteur IDT (Inter Digital Transducer). Quand une tension est appliquée aux électrodes sans aucune pression appliquée, la résistance mesurée est de niveau des méga ohms.

Quand une force est appliquée, la résistance diminue en raison du courant qui circule à travers la feuille de polymère shunté [9]. La résistance de détection est inversement proportionnelle à la pression appliquée.

La performance des microcapteurs piezorésistif varie suivant la variation de la température et de la pression. La sensibilité des capteurs diminue on augmentant la température. N'importe quel effort résiduel durant la fabrication influencera aussi sur la sensibilité des capteurs. La déflexion non linéaire du diaphragme se produit quand la déflexion à haute pression induite est plus de 10% de l'épaisseur du diaphragme [9].



**Figure 1.11: Détecteur piezorésistif combinant un capteur interdigital du (IDT) et un polymère semi-conducteur.**

L'effet piezorésistif se produira quand une différence de pression est appliquée sur un détecteur de pression, le diaphragme du détecteur se déformera et induira des tensions de pliages. Il se produit un changement de résistance due à des pressions plats longitudinale ( $\sigma_l$ ) et transversale ( $\sigma_t$ ) respectivement suivant l'orientation de la circulation du courant dans les piezorésistances [10].

Si la piezorésistance est faible due à un faible effort mécanique, la résistance totale  $\Delta R$  change comme suit:

$$\frac{\Delta R}{R} = (\pi_t \sigma_t + \pi_l \sigma_l) \quad (1.26)$$

Où  $R$  est la résistance originale de la piezorésistance à une pression nulle.

$\pi_t$  et  $\pi_l$  sont les coefficients piezorésistifs transversal et longitudinal.

On utilise la configuration de pont de Wheatstone des piezorésistances pour convertir le changement de résistance directement en signal de tension de sortie.

Supposant que les quatre piezorésistances dans le pont de Wheatstone sont équilibrés avec une tension de polarisation  $V_b$ , la tension différentielle  $\Delta V$  est obtenue par l'équation suivante [10] :

$$\frac{\Delta V}{V_b} = \frac{\Delta R}{R} \quad (1.27)$$

Pour un diaphragme mince de forme carrée obéissant l'acceptation linéaire de la petite déformation, les pressions de pliages  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  peuvent être déduites en fonction du déflexion verticale qui est une fonction linéaire de la pression appliquée  $P$ . Par l'analyse sans dimensions, on obtient une relation linéaire entre  $P$  et  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ .

$$\sigma_x = \alpha \left( \frac{X}{L}, \frac{Y}{L}; \nu, E \right) \cdot \left( \frac{L}{h} \right)^2 \cdot P \quad (1.28)$$

$$\sigma_y = \beta \left( \frac{X}{L}, \frac{Y}{L}; \nu, E \right) \cdot \left( \frac{L}{h} \right)^2 \cdot P \quad (1.29)$$

Où les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  varient uniquement avec le rapport de Poisson  $\nu$  des propriétés mécaniques et le module de Young  $E$  après avoir déterminé la position des piezorésistances.

De l'équation (1.26) à (1.29), nous pouvons définir la sensibilité  $S$  du capteur de pression comme taux de changement de tension par unité de pression, cependant:

$$S = \frac{\left(\frac{\Delta V}{V_b}\right)}{P} = \left(\frac{L}{h}\right)^2 (\alpha\pi_t + \beta\pi_l) \quad (1.30)$$

De l'équation (1.30), on peut constater que la sensibilité  $S$  est exprimée en fonction de la géométrie du diaphragme et des propriétés de matériel. L'effet de la géométrie du diaphragme peut être extrait par le rapport de la largeur du diaphragme  $L$  et l'épaisseur  $h$ . D'autre part, le module de Young  $E$  et le rapport de Poisson  $\nu$  qui sont apparus avec  $\alpha$  et  $\beta$  sont suffisant pour définir les propriétés physiques du matériau élastique isotrope. Une telle expression peut nous montrer la façon dont la sensibilité varie avec de différentes conceptions du capteur. Dans le cas où les matériaux pour la structure de diaphragme et les piezorésistances sont donnés, l'équation (1.30) est considérée comme une relation quadratique du paramètre  $(L/h)$ . On déduit alors qu'une conception plus mince ou plus large du diaphragme convient au capteur de pression à sensibilité élevée avec un avantage de deux ordres de grandeur.

Afin d'obtenir le signal maximal du capteur de pression, les piezorésistances en poly-silicium sont prévues pour être situés au bord et d'être arrangés près de la surface du diaphragme.

Considérons la structure basique en forme de  $T$  présentée sur les figures 1.12 et 1.13. La masse d'épreuve est un plateau carré attaché au bout de la poutre. Le fléchissement de la structure est converti en signal électrique à l'aide de deux jauges en poly-silicium connectées à deux autres résistances de même valeur formant un pont de Wheatstone.

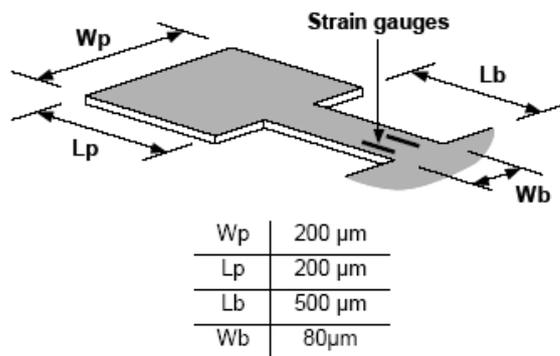


Figure 1.12 : Exemple d'une poutre piezorésistive de l'accéléromètre [11].

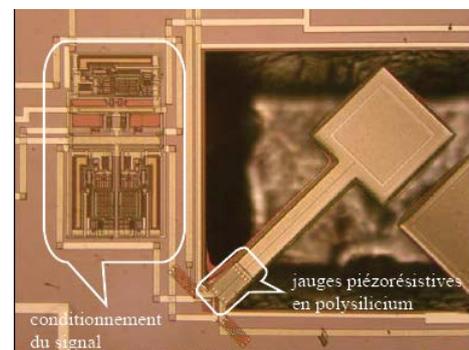


Figure 1.13 : Exemple d'un transducteur piezorésistif (Accéléromètre) [2].

Nous considérerons un modèle simple de premier ordre dans lequel la masse sismique sera considérée comme étant la masse du plateau et la raideur sera calculée comme étant la raideur d'une poutre de longueur  $L = L_b + L_p/2$  et de largeur  $W_b$ .

D'après les paramètres de conception du modèle, pour une masse sismique égale à  $0.56\mu\text{g}$  exercé à la structure et d'une force d'accélération de  $5,6 \cdot 10^{-9}$  N/g. La raideur considérée vaut  $K = \frac{3EI}{L^3} = 1.2$  N/m, on obtient alors un fléchissement d'environ  $4,6$  nm pour une accélération de 1g [11, 2].

Le coefficient électromécanique de la structure a été évalué à partir des mesures expérimentales effectuées sur une structure de test en forme de  $U$  présentée par [11].

Cette mesure consiste à appliquer des déplacements verticaux à la structure suspendue (grâce à une pointe microscopique) et à relever le coefficient liant le fléchissement à la tension de sortie. Avec un pont de Wheatstone constitué de deux jauges de  $1\text{k}\Omega$  et de deux résistances de  $1\text{k}\Omega$ , la variation de tension en fonction du fléchissement est de  $450\text{V/m}$ . Ainsi, la sensibilité intrinsèque obtenue du capteur proposé est de  $2\mu\text{V/g}$  environ.

### 1.5. Accéléromètres à base de détection thermique :

Il existe deux types d'accéléromètres à détection thermique. Dans le premier cas, une masse sismique est suspendue au-dessus d'une source de chaleur (une simple résistance chauffante). L'accélération change la distance qui sépare la source de chaleur et le corps d'épreuve qui joue ici le rôle de puits de chaleur. La différence de température entraîne un flux de température de l'élément chauffant vers la masse sismique. Ce flux est faible d'autant qu'il dépend de l'accélération, il est plus important que la distance à la masse. La température proche de la résistance chauffante peut être mesurée à l'aide de thermocouples (polysilicium-aluminium) ou de thermistance.

L'autre type d'accéléromètre à détection thermique est un capteur sans masse d'épreuve dont le principe est basé sur le transfert de chaleur par convection [2].

Une résistance chauffante intégrée dans un pont est suspendue au dessus d'une cavité. Deux détecteurs de température (thermistances ou thermocouples) sont également suspendus au dessus de la cavité à égale distance de l'élément chauffant, les

trois structures sont suspendues sur des ponts (ici pas de masse mobile contrairement au premier type de détection, donc plus de robustesse et de fiabilité).

La résistance chauffante crée un gradient de température qui est symétrique lorsqu'aucune accélération n'est appliquée. L'air chaud autour de la résistance chauffante est moins dense que l'air froid dans la cavité. Lors d'une accélération, l'air froid plus dense va dans le sens opposé de l'accélération, chassant ainsi l'air chaud dans la direction de l'accélération. Il apparaît ainsi une variation de température sur les détecteurs, cette variation étant symétrique.

En supposant que les thermistances ont une résistance avec un coefficient de température identique, ces différences de température se traduisent par des variations de résistances strictement opposées. Intégré à un pont de Wheatstone, les détecteurs transforment l'accélération en variation de tension (figure 1.14).

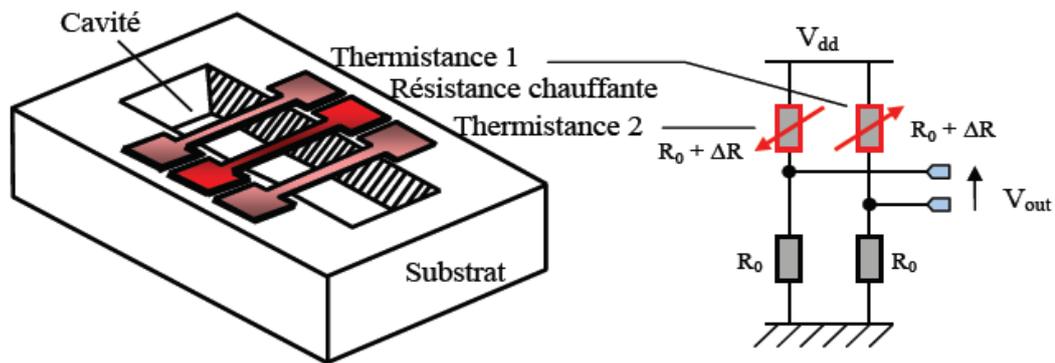


Figure 1.14 : Accéléromètre à détection thermique [2].

L'équation de transfert de chaleur dans le pont de Wheatstone est donnée par [2]:

$$V_{out} = V_{dd} \left[ \frac{R_0}{2R_0 - \Delta R} - \frac{R_0}{2R_0 + \Delta R} \right] = \frac{V_{dd}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R_0}, \quad (\Delta R^2 \ll 4R_0^2) \quad (1.31)$$

La sensibilité de ces capteurs dépend de la conductivité thermique du gaz, de sa pression, et de son expansivité. Elle dépend aussi de la nature des matériaux des résistances suspendues, certains accéléromètres utilisent des matériaux performants pour les échanges thermiques (exemple : platine).

La figure 1.15 représente la distribution de la température dans l'accéléromètre dans le plan horizontal contenant les éléments suspendus. Sur cette figure, nous pouvons distinguer l'évacuation de la chaleur le long des détecteurs vers le substrat.

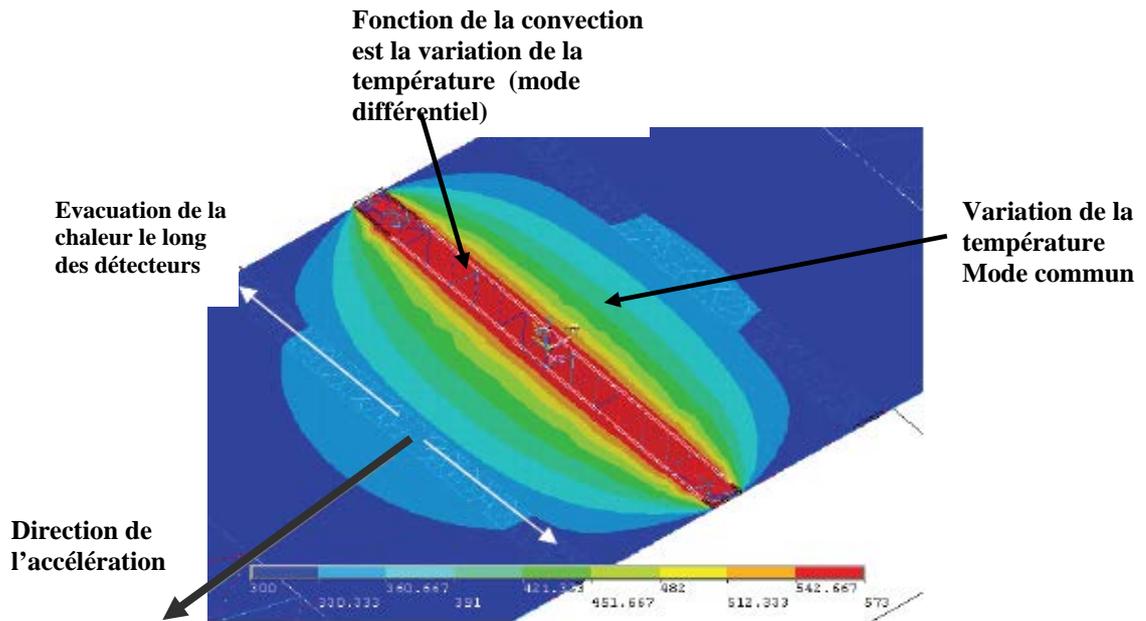


Figure 1.15 : Distribution de température selon le plan horizontal de l'accéléromètre thermique [2].

### I.5.a. La conversion électro -thermique :

Il est possible de simuler un microsysteme avec un simulateur électrique en utilisant les équivalences électrique-thermique [6]. Le convertisseur électrothermique est un système contenant une résistance chauffante suspendue au bout d'une poutre qui contient une thermopile, reliant l'extrémité de la poutre au substrat. La figure 1.16 montre une image MEB de convertisseur électrothermique fabriqué en technologie de micro-usinage de volume à partir du procédé CMOS 0,6 $\mu\text{m}$  d'AMS. La poutre fait environ 250  $\mu\text{m}$  de long sur 100  $\mu\text{m}$  de large et comporte un ensemble de 16 thermocouples Poly/Alu mesurant la différence de température entre la résistance chauffante et le substrat.

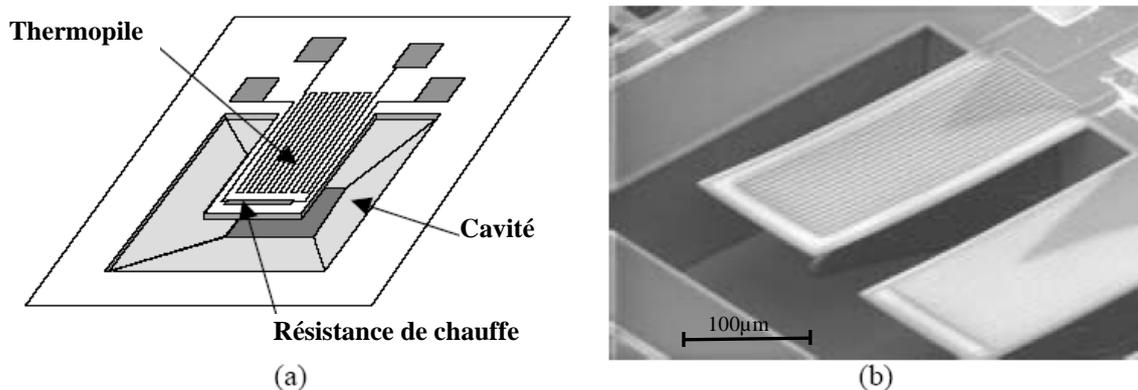


Figure 1.16: (a) Schéma, (b) image MEB d'un convertisseur électrothermique à poutre suspendue [6].

Au point de vue comportemental, le système est un quadripôle électrique ayant le comportement d'un système du premier ordre avec une constante de temps définie par le produit de la résistance thermique de la poutre et de sa capacité thermique. Les applications d'un tel système vont de la conversion AC/DC à l'isolation galvanique vers des systèmes disjoncteurs thermiques.

### I.5.b. Phénomènes physiques :

L'actionnement électrothermique a attiré l'attention des concepteurs des microsystèmes au fur et à mesure que les limitations des actionneurs électrostatiques.

En effet, les actionneurs électrothermiques présentent un intérêt important et remarquable du déplacement et de la force en prenant moins de place sur les wafers, de plus, les actionneurs électrothermiques en poly-silicium peuvent fonctionner grâce à des régimes de courant ou tension compatibles avec les circuits électroniques CMOS intégrés classiques.

Pour mettre en œuvre l'actionnement électrothermique dans les microsystèmes, deux principes ont été utilisés, le premier peut se schématiser ainsi (figure 1.17) [12]:

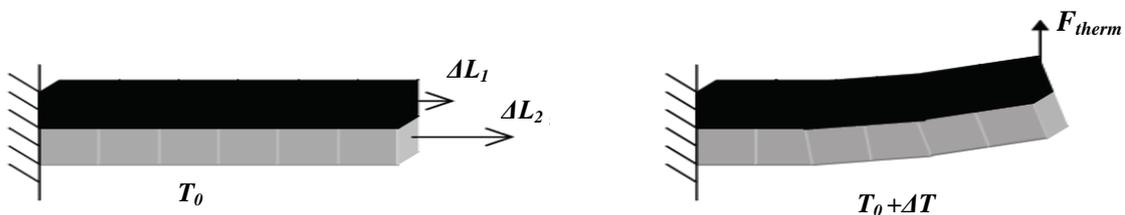


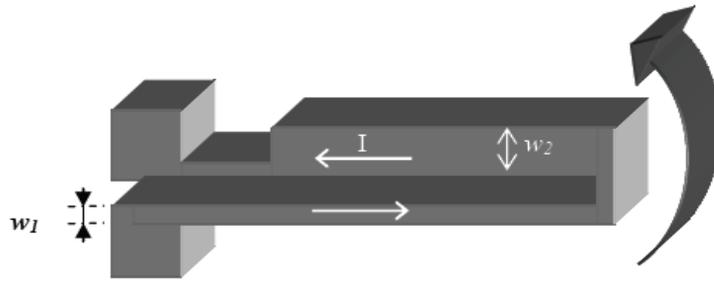
Figure 1.17: Schéma de principe (vue transversale) d'un bilame thermique.

Le bilame est composé de deux matériaux différents accolés, ayant des coefficients d'expansion thermique différents, les deux niveaux ne se dilatent pas de la même longueur ce qui entraîne une courbure de la structure.

Le fait de superposer deux matériaux différents permet d'augmenter le déplacement vertical obtenu par rapport à l'élongation obtenue pour un seul de ces matériaux.

Alors que le premier principe prend appui sur des coefficients d'expansion thermique différents, le second utilise des différences de géométrie dans un même

niveau structurel pour générer un mouvement comme cela est illustré dans la figure 1.18 [13].



**Figure 1.18 : Schéma de principe (vue de dessus) d'un actionneur thermique bimorphe [13].**

Avec ce second type de structure, on obtient un déplacement parallèle au substrat. La différence de largeur entre les deux bras de l'actionneur entraîne une différence de densité de courant à l'intérieur des deux bras lorsqu'une polarisation en courant est appliquée. Cette différence se traduit par une élongation différente pour les deux bras entraînant une courbure de la structure (selon le sens indiqué par la flèche dans la figure 1.18).

Après avoir présenté les deux principes utilisés dans l'actionnement électrothermique, nous allons-nous attarder sur le phénomène qui leur est commun, à savoir la dilatation thermique d'un matériau. Lorsque l'on soumet un matériau à un échauffement, il subit une dilatation thermique non-contrainte caractérisée par le coefficient d'expansion thermique défini par :

$$\Delta l = l k \cdot \Delta T \quad (1.32)$$

Où  $l$  et  $\Delta l$  sont la longueur initiale et la variation de longueur d'un barreau de matériau,  $k$  est le coefficient d'expansion thermique et  $\Delta T$  est la variation de température imposée au barreau, dans ce cas, l'expansion thermique est élastique.

Par contre, lorsque l'expansion thermique est contrainte, toute expansion de la poutre est bloquée soit par des ancrages soit par des liaisons avec d'autres pièces volumineuses. L'expansion thermique contrainte peut alors être assimilée à une force de compression liée à l'expansion  $\Delta l$  que la barre subirait en non-contraint. La force exercée est alors:

$$F = l \cdot k \cdot \Delta T \cdot A \cdot E = A \cdot E \cdot \Delta l \quad (1.33)$$

Où :

$F$  est la force thermique due à l'expansion du matériau,

$A$  est la surface du barreau de matériau,

$E$  est le module d'élasticité (module de Young) du matériau considéré.

En réalité, nous obtenons une combinaison entre ces expansions contrainte et non contrainte. L'énergie thermique créée par l'élévation de température permet de générer un travail utile se traduisant à la fois par un déplacement (cas de l'expansion thermique non contrainte) et une force (cas de l'expansion thermique contrainte).

### I.5.c. Principe de fonctionnement de l'actionneur électrothermique en forme de U :

Un diagramme de l'actionneur thermique est donné dans la figure 1.19. Cette structure, en forme de U, contient un bras fin, dit « bras chaud », et un bras large, dit « bras froid ». Une déflexion est générée grâce à un chauffage asymétrique du bras chaud et du bras froid. Le courant passe à travers les ancrages et la densité de courant la plus élevée dans le bras chaud y crée un échauffement et une expansion thermique plus importants que dans le bras froid. Les bras étant joints à leur extrémité libre, l'actionneur est contraint à un mouvement de rotation autour du bras froid (dans la figure 1.19, le mouvement est vers le bas).

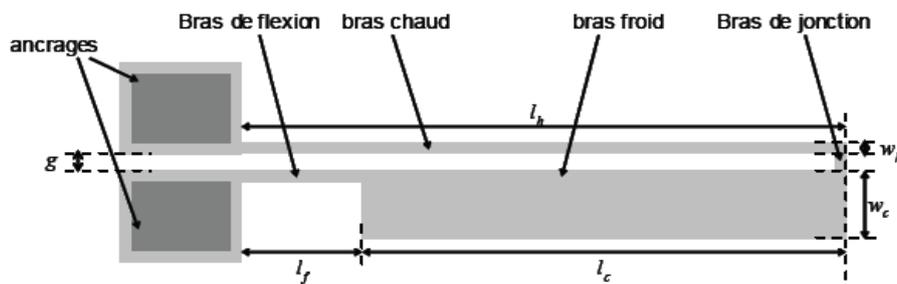


Figure 1.19 : Vue de dessus schématique de l'actionneur électrothermique en forme de U [13].

La portion où les deux bras ont la même largeur permet d'obtenir un effet ressort qui permet un retour de la structure à sa position initiale en fin d'actionnement.

Les paramètres caractéristiques de la structure sont :

- La longueur des bras :  $l_h$ ,  $l_j$ ,  $l_c$  et  $l_f$  qui sont respectivement les longueurs du bras chaud, de jonction, froid et de flexion.

- La largeur des bras :  $w_h$ ,  $w_j$ ,  $w_c$  et  $w_f$  qui sont respectivement les largeurs des bras : chaud, de jonction, froid et de flexion.
- L'espace entre les deux bras :  $g$ , correspondant à  $l_j$ .
- L'épaisseur de l'actionneur,  $h$ , qui est l'épaisseur du niveau structural dans lequel est fabriqué l'actionneur. Ce paramètre n'est donc pas représenté dans la figure 1.19 puisqu'il est perpendiculaire à la feuille !

La réponse électrothermique des bras de l'actionneur qui sont fabriqués dans une couche de poly-silicium est simplifiée par un problème monodimensionnel puisque la longueur des ponts est grande devant leur section. Le système est donc considéré comme une succession de trois ponts (le couple bras chaud + bras de jonction car ils ont les mêmes caractéristiques, le bras froid et le bras de flexion) comme cela peut être vu dans la figure 1.20.

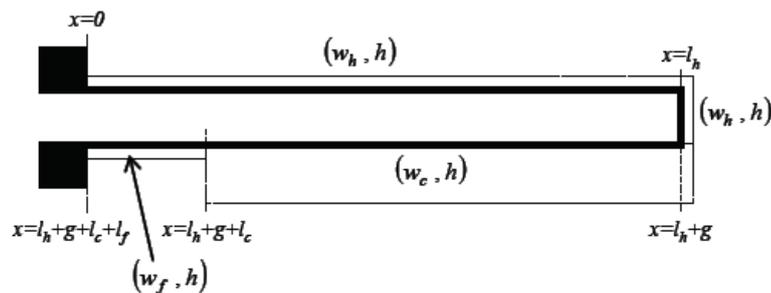


Figure 1.20 : Schéma du système simplifié en une dimension [13].

Il existe 3 mécanismes d'échange de chaleur :

- i) La conduction : transfert d'énergie sous l'influence d'une différence de température, d'un point chaud vers un point froid, figure 1.21.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier selon laquelle la densité du flux thermique est proportionnelle au gradient de température. Ainsi, le flux de chaleur transmis par conduction s'exprime comme :

$$\varphi_{conduction} = -kS \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.34)$$

Avec :

$K$  la conductivité thermique du milieu (en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ),

$S$  l'aire de la surface de passage du flux (en  $\text{m}^2$ ),

$T$  la température (en  $^{\circ}\text{C}$ ),

$x$  la variable d'espace dans la direction du flux (en m).

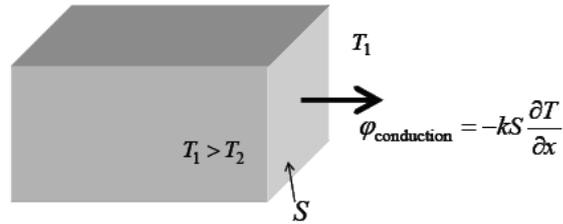


Figure 1.21 : Flux de chaleur transmis par conduction.

-ii) La convection : transfert de chaleur dans un solide, figure 1.22.

L'énergie est transmise par déplacement du substrat. Ce mécanisme est régi par la loi de Newton ce qui permet d'exprimer le flux de chaleur transmis par convection comme:

$$\varphi_{convection} = h_c S (T_p - T_\infty) \quad (1.35)$$

avec :

$h_c$  le coefficient de transfert de chaleur par convection (en  $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ ),

$T_p$  la température à la surface du solide (en  $\text{°C}$ )

$T_\infty$  la température à travers le substrat (en  $\text{°C}$ ).

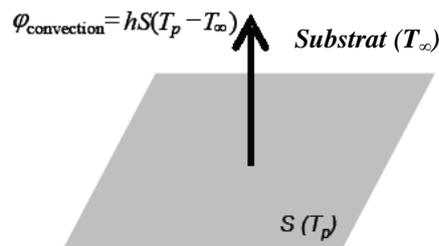


Figure 1.22 : Flux de chaleur échangé par convection.

Dans ce cas, la convection a lieu vers le substrat à travers une couche d'air et une couche de nitrure mais aussi vers le milieu ambiant dans lequel est plongée la structure. Du fait que l'échange thermique reste en régime laminaire, les pertes de chaleur par convection vers le substrat et vers le milieu ambiant seront assimilées à des pertes par conduction à travers une résistance thermique  $R_T$  selon l'expression [13]:

$$\varphi_{convection} = S \frac{\Delta T}{R_T} \quad (1.36)$$

Où :

$\Delta T$  est la différence de température entre le solide et le milieu ambiant.

- iii) La radiation : transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces, figure 1.23. Le flux de chaleur échangé par rayonnement s'exprime comme :

$$\varphi_{\text{radiation}} = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (1.37)$$

Avec :

$\sigma$  : la constante de Stephan ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ),

$\varepsilon_p$  : le facteur d'émission de la surface,

$T_p$  : la température à la surface du solide (en K)

$T_\infty$  : la température du fluide (en K).

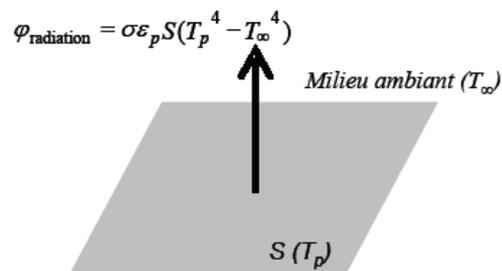


Figure 1.23 : Flux de chaleur échangé par rayonnement.

En accord avec une comparaison réalisée entre l'énergie perdue par radiation et l'énergie créée par effet Joule dans les actionneurs électrothermiques en forme de U, la dissipation de chaleur vers le milieu ambiant par radiation sera négligée.

## I.6. Accéléromètres à détection Optique :

Les techniques de détection optiques se fondent principalement sur la modulation des propriétés d'une onde électromagnétique à fréquence optique. Dans le cas des capteurs optiques, la mesurande module directement les propriétés de l'onde électromagnétique. Le microcapteur module alors une propriété du signal optique afin de fournir une indication de la mesurande (Intensité, Phase, Longueur d'onde, Position spatiale, Fréquence, Polarisation) [14].

### I.6.a. Modèle d'accéléromètre optique:

Nous rapportons ici un type d'accéléromètre micro-usiné qui combine une masse d'épreuve usiné en volume et un support de substrat à interféromètre optique.

L'interféromètre se compose des doigts intercalés qui sont attachés alternativement à la masse d'épreuve et le support de substrat. Le système interdigital forme un réseau de diffraction optique où le déplacement de la masse d'épreuve relative au support de substrat est mesuré avec une diode laser standard ou un photodétecteur.

Dans ce cas, le positionnement de la diode laser et le photodétecteur n'est pas critique puisque les deux surfaces réfléchissantes optiques de l'interféromètre sont intégrées sur le même dispositif.

La technique de détection interdigitale est développée pour les applications des microscopes de force atomique. Le schéma de l'accéléromètre interdigital est montré dans la figure 1.24. La masse d'épreuve qui contient un ensemble de doigts étendus est attachée au support de substrat par une poutre flexible [15].

Les doigts alternatifs étendus du support de substrat complètent la section de diffraction. Quand la section de l'ensemble des doigts est illuminée, la lumière est diffractée dans une série des doigts optiques. Dans un champ à grande distance, l'espacement entre les doigts est approximativement  $2h\lambda/d$ , où  $h$  est la séparation entre la section des doigts et la photodiode,  $d$  est la largeur de la section de lancement,  $l$  est la longueur d'onde de la lumière.

L'intensité de la lumière dans la position de zéro varie de  $\cos^2(2\pi z/\lambda)$ , où  $z$  est le déplacement entre la masse d'épreuve et le support de substrat.

Dans ce cas,  $\lambda = 635 \text{ nm}$ ,  $d = 6\mu\text{m}$ ,  $h$  est typiquement de quelques centimètres.

Ceci fournit l'espacement de quelques millimètres entre les spots diffractés.

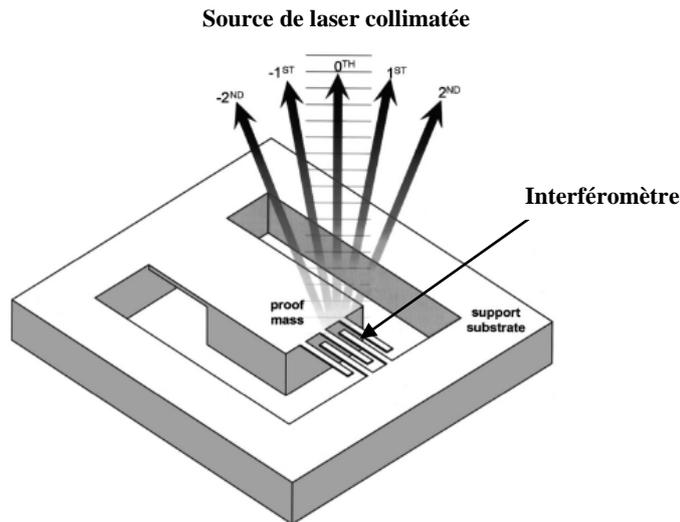


Figure 1.24 : Accéléromètre à détection optique [15].

Le classement par taille des doigts est considérablement exagéré dans ce schéma; par contre, les doigts sont définis dans ce processus pour avoir une même épaisseur que la poutre soutenant la masse d'épreuve.

La résolution d'accélération a été mesurée en oscillant le dispositif avec un déclencheur piézoélectrique. Le réseau de diffraction est éclairé avec une diode laser collimatée ( $\sim 1\text{mW}$  à une longueur d'onde de  $635\text{ nm}$ ) et l'intensité de diffraction est mesurée avec une photodiode en silicium. Le courant de photodiode est converti en tension à l'aide d'une résistance de  $10\text{k}\Omega$  amplifié et relié à un analyseur de spectre.

Puisque l'accéléromètre de vibration externe n'est pas isolé, le spectre de bruit indiquera des bruits du mécanisme et de l'environnement. Afin d'estimer la résolution du dispositif réel, la fréquence du déclencheur piézoélectrique est modulée de telle façon que le bruit de fond sera minimal, typiquement entre  $600$  et  $700$  hertz.

La figure 1.25 montre la réponse de la photodiode quand le déclencheur est conduit par une onde sinusoïdale de  $650$  hertz et d'une amplitude de  $10\text{mV}$  pique à pique. Ceci correspond à une amplitude du déplacement de  $1\text{Å}$  du dispositif, et une accélération de  $170\text{ }\mu\text{g}$ . À cette fréquence, le rapport signal/bruit est approximativement  $100:1$ , indiquant une résolution de niveau de bruit de  $1,7\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

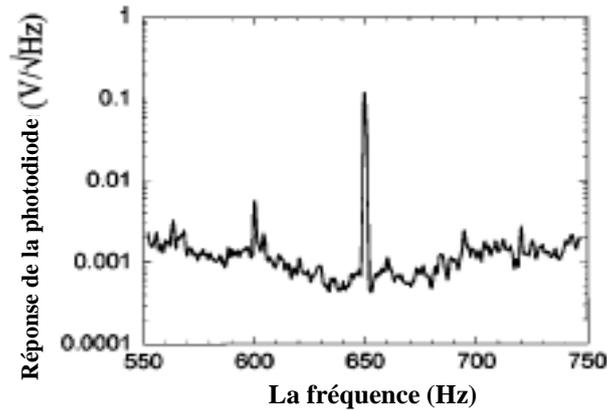


Figure 1.25 : La réponse en fréquence d'un accéléromètre à une accélération de  $170\mu\text{g}$  à 650 Hz [15].

La réponse en tension d'une photodiode illustre une intensité de diffraction du premier ordre. L'accélération est conduite par un piézo-actionneur excité par une entrée sinusoïdale de 10 mV pique à pique, correspondant à un déplacement approximatif de 1.

L'accélération équivalente du bruit mécanique thermique du dispositif est égale à :

$$a_{\text{équi}} = \sqrt{(4k_b T \dot{u}_0 / m Q)} \quad (1.38)$$

Où

$k_b$  est la constante de Boltzman,

$T$  est la température,

$m$  est la masse d'épreuve,

$\omega_0$  est la fréquence de résonance de la masse d'épreuve de la poutre,

$Q$  est le facteur de qualité mécanique.

Dans le cas d'une fréquence de résonance de 906 Hz, d'une masse d'épreuve de 1.2 mg,  $Q$  égale à 90, le bruit thermique soit de  $90 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  et les bruits environnementales détectés sont limités.

Quand la source laser diffuse les rayons de lumière sur les doigts interférés, les rayons dominants sont ceux reflétés par la barrière des doigts. L'intensité des modes diffractés dépend de la partie vide entre les deux doigts. Elle est donnée par [16,17]:

$$I(d) = I_0 \sin^2(2\pi d / \lambda) \quad (1.39)$$

La résolution d'un accéléromètre est finalement limitée par le bruit thermique de la masse d'épreuve [17]:

$$a_{TM} = \sqrt{\frac{8\pi k_b T f_0}{mQ}} = 3.21 \times 10^{-10} j^{1/2} \sqrt{\frac{f_0}{mQ}} \quad (1.40)$$

Où

$T$  est la température,

$m$  est la masse d'épreuve,

$f_0$  est la fréquence de résonance,

Pour le dispositif caractérisé dans la figure 1.26,  $f_0 = 80$  hertz,  $m = 30$  mg, et  $Q = 68$  donnent un bruit thermique de  $7 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

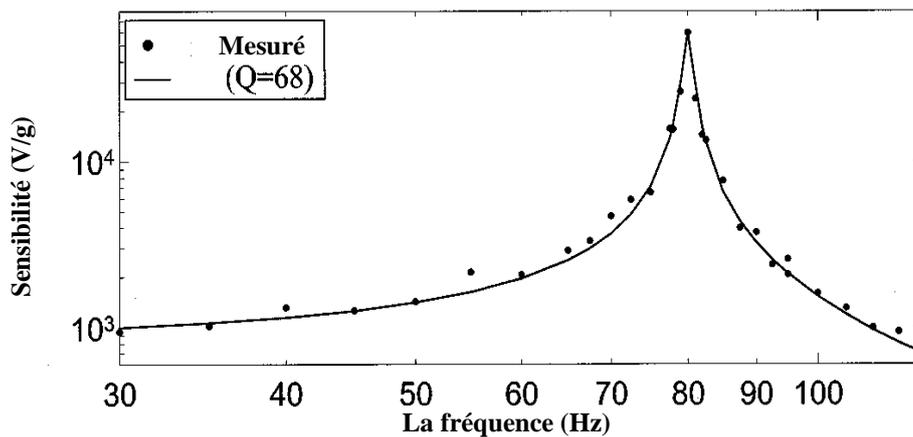


Figure. 1.26. Sensibilité d'accéléromètre interdigital à 80 Hz [17].

Afin de résoudre le bruit thermique, le déplacement de la masse d'épreuve résultant d'une accélération doit être plus grand que le bruit de détecteur de position interdigital. Étant donné que le déplacement d'une masse d'épreuve est le quotient de l'accélération et du carré de sa fréquence de résonance angulaire.

**I.7. Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré pour la présentation des différents types d'accéléromètres et leurs intérêts suivant leurs types de détection (piézoélectrique, structure résonante, piezorésistive, thermique, Optique).

Une simple étude a été nécessaire pour comprendre le principe de fonctionnement de chaque type de détection incluant une démonstration des théories de détection ainsi que leurs milieux d'application.

L'analyse et la conception des différents types de détections exploitées dans la fabrication des accéléromètres à base des MEMS, nous ont permis de mieux comprendre l'intérêt de leurs applications tout en donnant une vision plus étendue dans le domaine de la micro-mécanique appliquée à la conception des capteurs d'accélération.

# **Chapitre II**

## **Technologies et fabrication des microsystemes MEMS**

## **II. Technologies et fabrication des microsystèmes MEMS :**

### **II.1. Introduction :**

Dès les années 60, la gravure du silicium était un sujet d'étude à la fois pour la mise en évidence des défauts dans un cristal de silicium et pour la possibilité de graver un cristal de manière isotrope. Ce n'est que dans les années 75 que la mise en évidence du caractère anisotrope est apparue comme un élément permettant la réalisation de formes tridimensionnelles par l'usinage sélectif du substrat [4]. Il était dorénavant possible de créer des membranes, des trous, des cavités et bien d'autres formes, de bénéficier de la remarquable qualité mécanique du silicium et ceci en utilisant des procédés chimiques qui peuvent être compatibles avec les technologies du circuit intégré.

Créer une membrane donnait la possibilité de mesurer par différence de capacité la variation de pression, de réaliser une masse suspendue par des bras et de mesurer l'accélération. La voie était ouverte pour la fabrication des capteurs et des microsystèmes dès que l'électronique est associée, en bénéficiant de l'aspect collectif, du moindre coût, de la miniaturisation et de la simplicité du procédé de gravure chimique anisotrope.

Ce chapitre donne un aperçu détaillé des différentes technologies de fabrication des microsystèmes afin d'améliorer l'étude des outils CAO (Conception Assistée par Ordinateur) dédiés aux technologies des microsystèmes.

Il existe deux types de structure en silicium à actionnement électrostatique, celles obtenues par micro usinage de surface et celles obtenues par micro usinage de volume.

### **II.2. Le micro-usinage en surface :**

Ce type de procédé est en fait dédié à l'usinage des couches minces déposées sur un substrat de silicium (poly-silicium, oxyde de silicium, nitrures...). Il est clair que le déplacement mécanique de la structure est utile pour le fonctionnement de tout actionneur qui nécessite quelques degrés de liberté. Pour cela, des couches sacrificielles (oxyde de silicium, polymère...) sont déposées entre les différentes couches minces

puis dissoutes à la fin de la fabrication à l'aide d'un solvant sélectif. Des mouvements d'une couche par rapport à une autre deviennent alors possibles.

En utilisant cette technique, un transistor à porte à faux résonnante (Resonant Gate Transistor, RGT) a été réalisé en 1967 [4]. Ce sont les premiers dispositifs utilisant une couche sacrificielle pour suspendre leurs bras de levier.

Le micro-usinage de surface repose sur la présence de deux types de matériaux au-dessus du substrat : structurels et sacrificiels. Ces derniers sont dissous à la fin du procédé de fabrication libérant ainsi les couches structurales. Les couches sacrificielles sont souvent des oxydes ou des résines, des couches structurales du poly-silicium, des métaux ou des isolants non oxydés [1] tels que le nitrure de silicium figure 2.1.

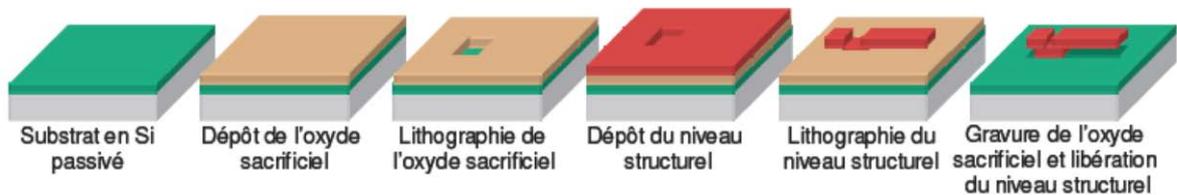


Figure 2.1 : Procédure de Micro-usinage en surface [1].

Le micro-usinage en surface est basé sur l'emploi de couches sacrificielles. Ces couches vont être gravées entièrement à la fin du processus par une étape de gravure sélective et isotrope. Le terme micro-usinage en surface vient par opposition à l'expression micro-usinage en volume car ici la gravure n'attaque pas le silicium du substrat (bulk). Pendant ce procédé les couches déposées vont être une succession de couches sacrificielles de dioxyde de silicium et de couches structurales de polysilicium.

Au cours du procédé les couches d'oxydes sacrificielles sont gravées de manière à définir les zones d'ancrage des structures en polysilicium sur le substrat ou sur le niveau inférieur. La figure 2.2 montre un schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface avant (a) et après (b) gravure des oxydes sacrificiels. On peut remarquer au passage la couche de nitrure sur tout le substrat, les trois couches structurales de polysilicium ainsi que les couches d'oxydes sacrificielles et les zones d'ancrage. La gravure des oxydes sacrificiels est généralement opérée par de l'acide fluorhydrique à 49%, suivie par une étape de séchage au CO<sub>2</sub> supercritique pour éviter les problèmes de collage [6].

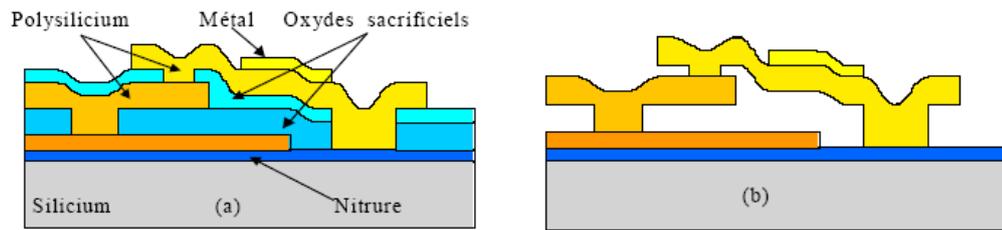


Figure 2.2 : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface.  
(a) avant et (b) après gravure des oxydes sacrificiels.

## II.2.1 La micromécanique :

Un des aspects intéressants des technologies de micro-usinage en surface est la possibilité de fabriquer des éléments mécaniques en 3 dimensions. On peut alors créer des systèmes mécaniques complexes comprenant des moteurs rotatifs ou linéaires, des chaînes de transmission du mouvement comme des engrenages, des bielles et des paliers [6].

La figure 2.3 montre les différents éléments permettant de construire des systèmes mécaniques complexes, la photo MEB (a) représente une charnière faite avec deux niveaux de polysilicium permettant de créer une liaison pivot, la photo MEB (b) montre les dents d'engrenage qui ne sont pas engrenées.

La photo MEB (c) représente le détail d'un ressort rotatif.

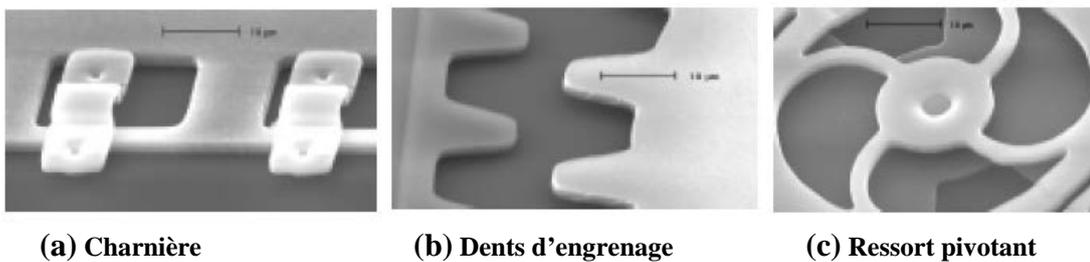


Figure 2.3 : Photos MEB d'éléments micromécaniques fabriqués par micro-usinage de surface (technologie MUMPS) [6].

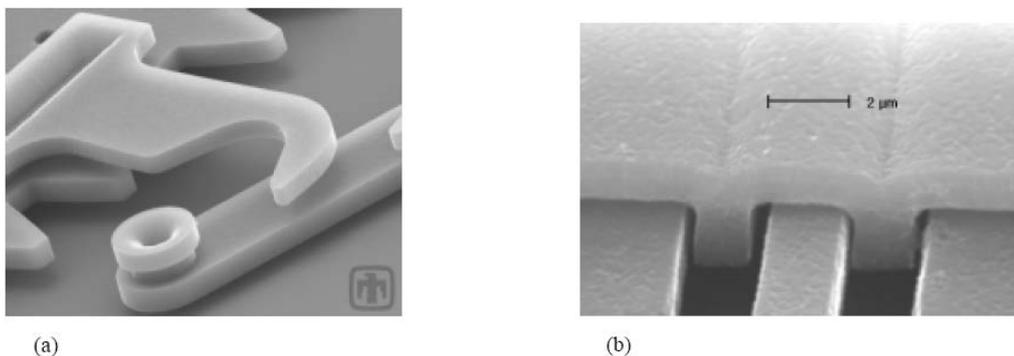
## II.2.2. La planarisation mécano chimique :

C'est une étape technologique qui permet d'aplanir des couches d'oxydes. Lorsqu'un procédé comprend un grand nombre de niveaux, les décalages vont s'additionner et former un relief important.

La planarisation mécano chimique va alors y remédier en polissant les couches d'oxydes déposées permettant alors de déposer les niveaux supérieurs à partir d'une surface plane. En microélectronique, ces reliefs posent des problèmes notamment au niveau de la lithographie par ce qu'on appelle le notching qui est un rétrécissement des bandes de résine causé par des réflexions sur la topologie du rayonnement ultra violet lors de l'insolation.

Pour les structures micromécaniques, la non-planéité des couches peut poser des problèmes quand des niveaux suspendus doivent glisser les uns par rapports aux autres.

On remarque sur la figure 2.4 (b) que le niveau supérieur de polysilicium suit les reliefs du niveau inférieur. Ces derniers vont empêcher le mouvement du niveau supérieur par rapport au niveau inférieur. Par contre sur la photo MEB de la figure 2.4 (a), les niveaux sont planarisés et l'on remarque la planéité parfaite des niveaux structurels [6].



**Figure 2.4 : Photos MEB de structures micro-usinées en surface.(a) avec planarisation, (b) sans planarisation [18, 6].**

### II.2.3. Les problèmes de contact de surface:

Le problème du contact entre surface est différent à l'échelle microscopique par rapport à l'échelle macroscopique. En effet à cette échelle les tensions de surfaces et les forces de contact sont prépondérantes par rapport aux forces gravitationnelles. C'est pour cette raison que lorsque deux microstructures entrent en contact sur une grande surface elles peuvent se coller. Pour éviter ce phénomène on trouve sur les procédés de micro-usinage en surface des niveaux de lithographie appelés "dimples". Les dimples sont des picots placés sous les structures suspendues qui évitent les contacts de surface pour minimiser les phénomènes de collage. Ces picots sont obtenus avec un niveau de lithographie supplémentaire qui va créer de petits trous dans une couche d'oxyde.

Le poly-silicium déposé par dessus va alors former des petites pointes qui entreront en contact les premiers avec le niveau inférieur figure 2.5.

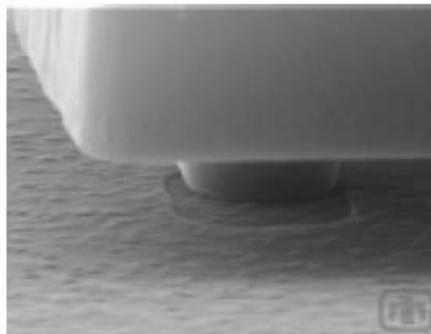


Figure 2.5 : Photo MEB d'un dimple sous une couche de polysilicium suspendue [18, 6].

### II.2.4. Le micro usinage de surface intégrée :

Les technologies de micro-usinage de surfaces ont été élaborées à partir des techniques de dépôt en couche mince de la microélectronique spécifiquement pour fabriquer des microstructures suspendues [6]. Or l'intérêt majeur des microsystèmes est l'intégration des fonctions de transduction et d'action avec les fonctions de traitement analogique et numérique du signal.

Contrairement aux technologies de micro-usinage en volume, les procédés de micro-usinage de surface ne sont pas directement compatibles avec les procédés standards de la microélectronique et ne peuvent pas être traités en post process.

En effet le dépôt des couches de poly-silicium se fait à haute température et aux niveaux métalliques des procédés microélectronique, le plus souvent en aluminium. De plus un post process en température peut modifier les profils de dopage ce qui rendrait l'électronique inopérante.

#### II.2.4. a. Procédés microélectroniques et microsystèmes intégrés :

La technologie microsystème est basée sur un procédé microélectronique CMOS modifié pour inclure des structures suspendues par micro-usinage de surface. Etant donné les contraintes de température imposées par les niveaux de métallisation, le dépôt des couches de poly-silicium structurelles doit intervenir avant le dépôt des couches de métal. Le procédé contient des niveaux de lithographies supplémentaires destinés à définir les zones microsystèmes de manière à ce que la gravure de l'oxyde sacrificiel n'attaque pas l'électronique. La figure 2.6 représente un schéma en coupe de cette technologie. On remarque au milieu, la couche de poly-silicium structurelle avant gravure de l'oxyde sacrificiel. L'avantage de cette technologie est évidemment l'intégration monolithique des deux technologies mais elle est limitée quant au nombre de niveaux structurels en poly-silicium [6].

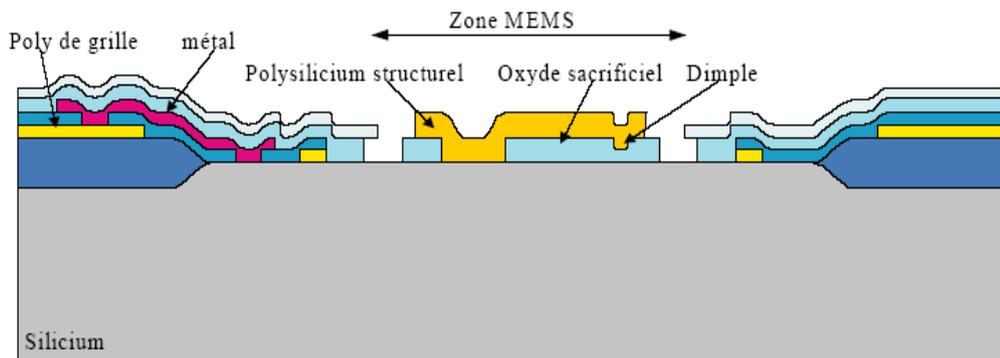


Figure 2.6 : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface intégrée.

#### II.2.4. b Procédés microsystèmes enterrés:

Pour intégrer les parties microsystèmes à un procédé CMOS standard, la solution est de fabriquer les structures microsystèmes en premier lieu dans des tranchées obtenues par gravure anisotrope du substrat, ensuite effectuer le procédé CMOS à coté

des tranchées et finalement la libération des structures microsystèmes enterrées par gravure des oxydes sacrificiels [18].

Cette solution est réalisable parce que les structures microsystèmes restent encapsulées dans les oxydes sacrificiels et qu'elles résistent aux températures élevées du procédé.

La figure 2.7 montre un schéma en coupe d'un tel procédé. On remarque sur la partie droite la cavité contenant les structures microsystèmes connectées électriquement à l'électronique CMOS fabriquée en surface. L'intérêt d'une telle solution est que le procédé microsystème est indépendant du procédé microélectronique et peut donc être opéré par n'importe quel fondeur et avec différents procédés.

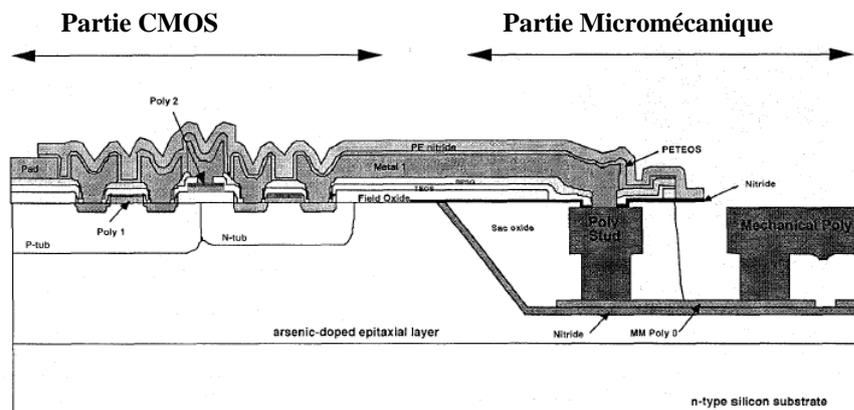


Figure 2.7 : Schéma en coupe d'une technologie MEMS intégrée avec parties microsystèmes enterrées [8].

### II.2.4. c. Processus du microsystème:

L'intégration monolithique de l'électronique et des microstructures en poly-silicium consiste à déposer le poly-silicium structurel en dernier sur une technologie CMOS. Quelques adaptations notamment au niveau du métal des interconnexions métalliques qui sont remplacées ici par du tungstène avec des barrières de diffusion en TiN pour supporter les hautes températures de dépôt et de recuit du poly-silicium des microstructures [19]. Une couche métallique en aluminium est déposée pour les contacts (figure 2.8). On remarque l'emploi de tungstène pour le premier niveau de métal et la couche de poly-silicium structurel après gravure de l'oxyde sacrificiel.

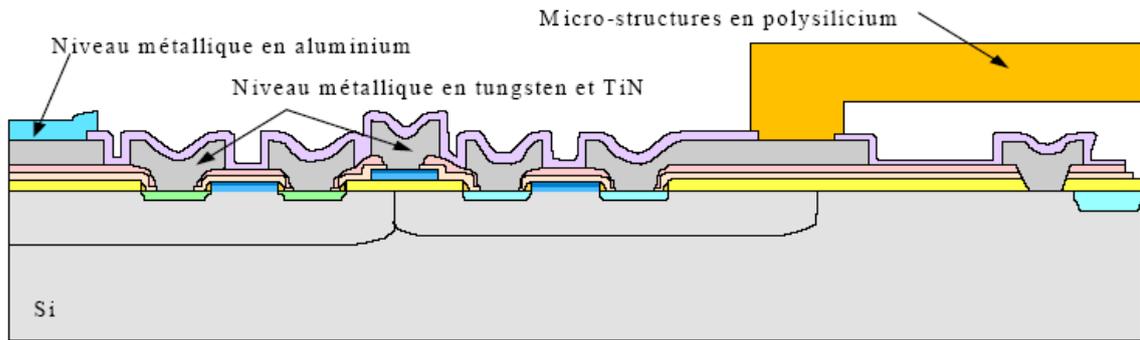


Figure 2.8 : Schéma en coupe d'un microsysteme integre avec parties microsystèmes deposées apres l'électronique.

### II.3. Le micro-usinage en volume :

Le micro usinage en volume permet d'obtenir les formes recherchées pour un MEMS en travaillant le substrat brut. Cela peut se faire avec de différentes manières (gravures sèches ou humides, etc.).

Dans le cas d'une gravure anisotrope fréquemment utilisée, la vitesse de gravure varie suivant l'orientation des plans attaqués et la sélectivité de la solution de gravure (KOH ; TMAH (hydroxyde de tétra-méthyle ammonium)...). Ces caractéristiques donnent sa forme finale à la topologie du substrat (figure 2.9) [1].

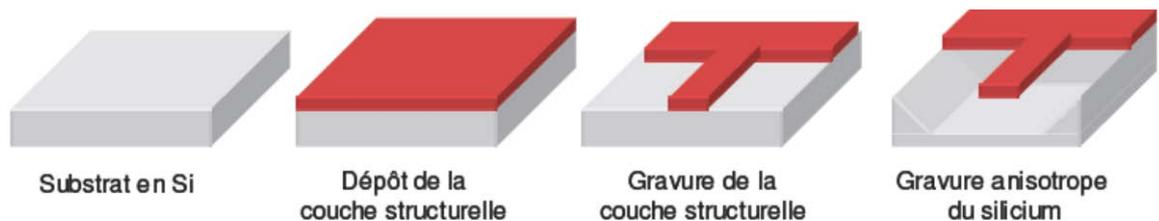


Figure 2.9 : Micro-usinage en volume [1].

La gravure sèche est compatible avec les technologies que l'on trouve en microélectronique.

Il est alors possible que les parties suspendues renferment des lignes de différents conducteurs, comme le montre la figure 2.10.

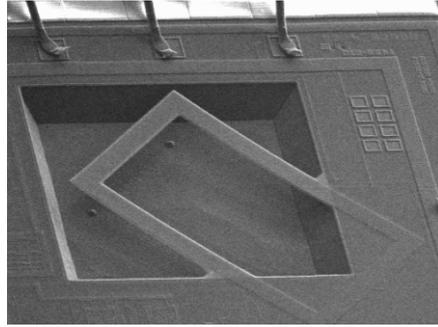


Figure 2.10 : Capteur magnétique réalisé par micro-usinage en volume [1].

Le micro-usinage en volume est une technique qui permet l'obtention de microstructures suspendues par gravure chimique du substrat d'un circuit intégré. Le terme en volume est utilisé ici puisque l'attaque chimique forme une cavité dans le volume du substrat sous les couches déposées. Les structures suspendues étant obtenues après le post processus spécifique.

Dans le cas du micro-usinage en volume face avant, le post processus ne nécessite qu'une étape de gravure anisotrope.

La définition des zones à graver se fait simplement en empilant les ouvertures dans les différents oxydes au niveau layout de manière à laisser une zone où le matériau du substrat à nu. La figure 2.11 montre un schéma représentant une coupe verticale d'un processus CMOS micro usiné en volume.

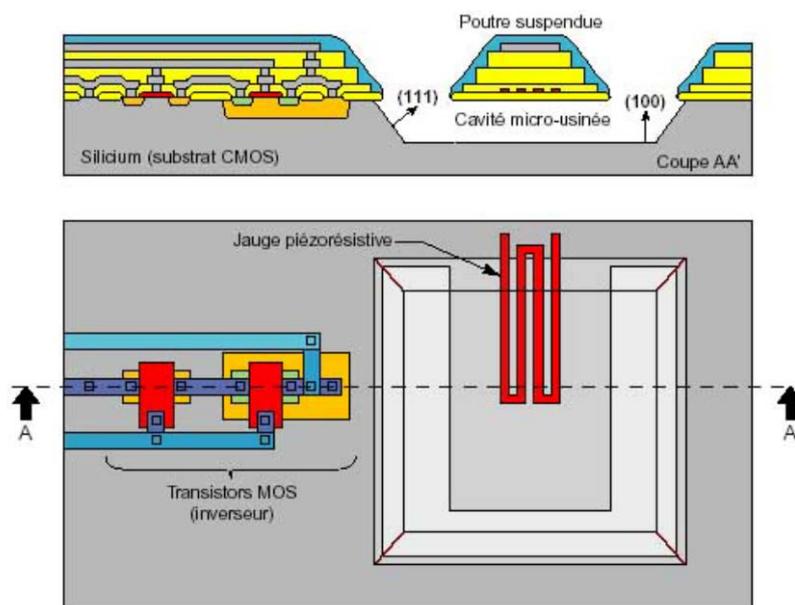


Figure 2.11 : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en volume face avant compatible CMOS [20].

À coté du transistor, la cavité micro usinée laisse les couches déposées suspendues. A partir de là, la solution de gravure anisotrope va creuser dans le volume du substrat libérant des structures composées d'un sandwich des couches d'oxydes et des couches de poly-silicium de métal et de passivation.

### II.3.1. La gravure anisotrope du silicium :

La gravure anisotrope du silicium est une réaction chimique en phase liquide entre la solution de gravure et le silicium et dont la cinétique est commandée par l'orientation cristallographique des surfaces de contact. En effet, la vitesse de gravure est exprimée le plus souvent en  $\mu\text{m.mn}^{-1}$  dépend de l'orientation cristallographique de la surface en contact avec la solution.

#### II.3.1.a. Intérêt de la gravure anisotrope :

La fabrication des microstructures suspendues tient au fait par une simple ouverture vers le silicium du substrat. Il est possible d'obtenir une cavité sous structures suspendues (comme une gravure isotrope) mais également une cavité qui reste. La figure 2.12 montre la progression de la gravure anisotrope définie par un masque comportant deux ouvertures triangulaires.

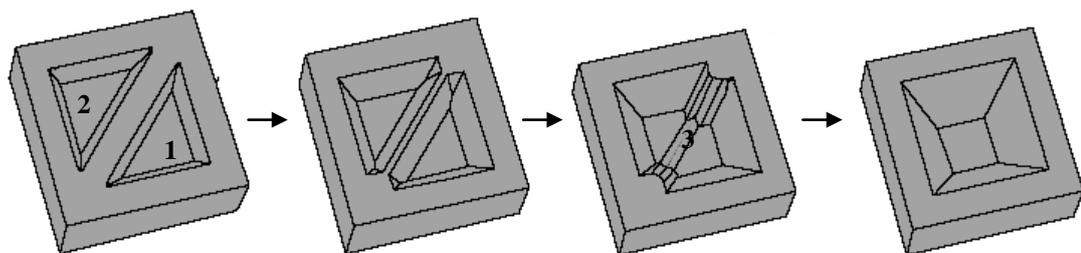


Figure 2.12 : Schéma représentant l'avancée de la gravure anisotrope à partir d'ouvertures triangulaires [14].

On peut noter que la solution commence par consommer la cavité 1 tout en formant la cavité 2. L'effet de bord sur les parties convexes vient créer le plan 3 "rapides" permettant de libérer complètement la structure et d'obtenir une cavité en forme de pyramide inverse. Le résultat d'une telle gravure peut alors être observé sur la

photo MEB de la figure 2.13 où l'on voit une structure en pont au-dessus d'une cavité pyramidale.

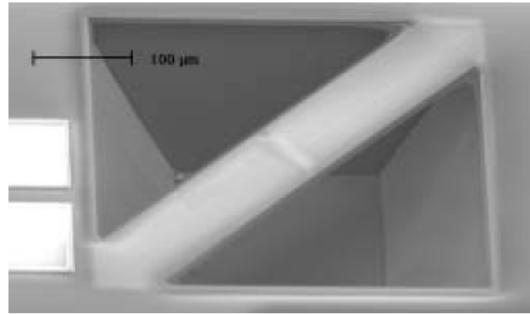
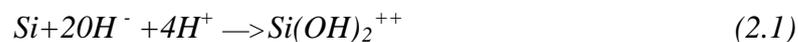


Figure 2.13 : Photo MEB d'une microstructure en pont obtenu par micro usinage en volume par gravure anisotrope du silicium [6].

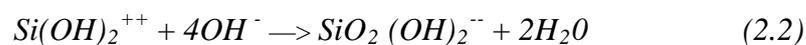
### II.3.1.b Les solutions de gravure anisotrope du silicium :

Les solutions de gravure du silicium présentant un caractère anisotrope sont des hydroxydes KOH, NaOH, CeOH, RbOH, NH<sub>4</sub>OH, TMAH.

Pour cette dernière, la réaction déroulante est alors l'oxydation du silicium par des hydroxydes pour former un silicate



Les silicates réagissent ensuite avec les hydroxydes pour former un complexe soluble dans l'eau:



Les solutions les plus souvent utilisées pour la gravure anisotrope du silicium sont l'hydroxyde de potassium (KOH) qui offre une très grande anisotropie mais a le défaut d'être peu sélectif envers l'aluminium ce qui pose des problèmes quand aux plots de connexions dans les technologies CMOS. De plus, la présence d'ions potassium qui sont des polluants des circuits CMOS est extrêmement gênante pour la compatibilité avec les procédés microélectronique.

Les vitesses de gravure typiques du silicium dans une solution de KOH à 80°C sont de 1µm.mn<sup>-1</sup> et de 20 Angstrom.mn<sup>-1</sup> pour l'oxyde de silicium.

La seconde solution de gravure anisotrope du silicium est l'éthylène dyamine pyrocathécol (EDP) qui offre de meilleures caractéristiques de sélectivité reste peu employée du fait de sa très haute toxicité et de son interdiction en salle blanche.

La dernière solution de gravure est l'hydroxyde de tétra-méthyle ammonium (TMAH) qui s'emploie délicatement du fait de sa nature organique faible, reste la solution offrant les meilleurs résultats en termes de vitesse de gravure, d'anisotropie et de sélectivité par rapport à l'aluminium. De plus elle est totalement compatible avec les procédés de fabrication de la microélectronique.

### II.3.2. Les différents types de micro-usinage en volume :

#### II.3.2.a. Le micro-usinage en volume face avant :

Le micro-usinage en volume face avant compatible CMOS permet d'obtenir facilement des structures suspendues sans étapes de lithographies supplémentaires. La figure 2.14 montre les différentes structures qu'il est possible d'obtenir, une structure suspendue en forme de pont (a), de poutre (b) ou de membrane suspendue par des bras de support (c).

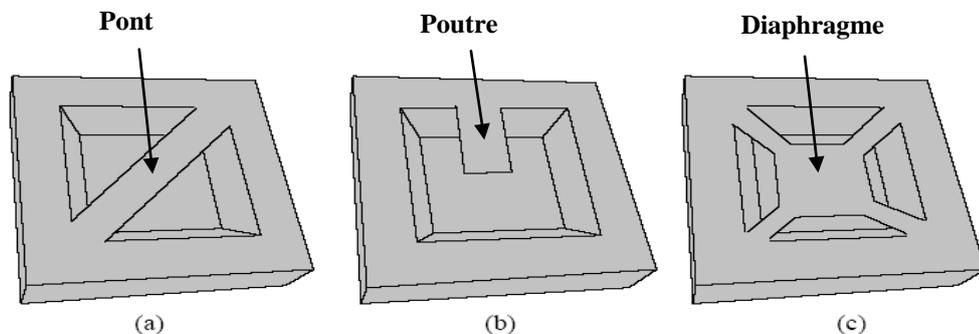


Figure 2.14 : Schéma des différentes microstructures que l'on peut obtenir par micro-usinage en volume face avant [14].

En opérant une gravure assez longue, il est possible aussi de traverser l'épaisseur du wafer de manière à transformer une masse suspendue à une membrane. La gravure s'opérant également par la face arrière du wafer (dans le cas d'une gravure au niveau puce). Néanmoins cette technique impose une taille assez grande de la structure suspendue (typiquement  $800\mu\text{m}$  de côté).

### II.3.2.b. Le micro-usinage en volume face arrière :

Le micro-usinage en volume face arrière nécessite une étape supplémentaire de lithographie de manière à créer un masque pour la gravure anisotrope. Cette étape de lithographie doit être alignée par rapport à la face avant, ce qui nécessite l'emploi d'un aligneur double face. De plus cette technique impose de travailler au niveau wafer et non pas au niveau puce comme c'était le cas pour le micro-usinage de surface en face avant. La figure 2.15 montre les structures qu'il est possible d'implémenter avec cette technique. La figure 2.15(a) montre une membrane close obtenue par gravure en face arrière, cette technique est employée dans les capteurs de pressions ou la déflexion de la membrane suite à une différence de pression entre ses deux faces est mesurée. Notons aussi que la cavité formée sous la membrane peut être fermée par collage du dispositif sur une surface de silicium (wafer bonding) et mettre ainsi une référence de pression dans la cavité, on obtient un capteur de pression absolue. La figure 2.15 (b) montre une membrane close laquelle est attachée une masse suspendue pour des applications thermiques ou de capteurs inertiels.

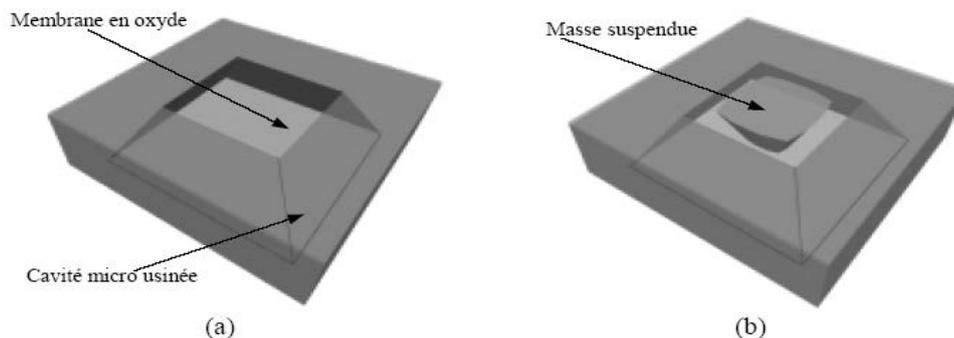


Figure 2.15 : Schéma des différentes structures résultantes d'un micro-usinage en volume face arrière

### II.3.2.c. Le micro-usinage en volume face avant et arrière :

En combinant le micro-usinage en volume face avant et face arrière, il est possible d'obtenir des structures suspendues avec masse attachée. L'intérêt de cette méthode est que la gravure va s'opérer des deux cotés en même temps ce qui va diminuer le temps de gravure nécessaire pour suspendre complètement une masse de silicium. De plus, la taille minimum des ouvertures à pratiquer est plus petite.

La figure 2.16 montre un schéma en coupe d'une structure à masse suspendue. On remarque la forme en diamant de la masse suspendue et la superposition dans le plan des masques de gravure avant et arrière.

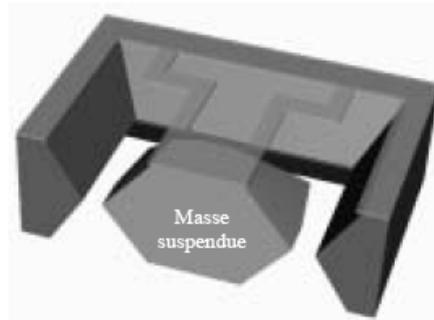


Figure 2.16 : Schéma en coupe d'une structure à masse suspendue obtenue par micro-usinage en face avant et en face arrière [14].

### II.3.2.d. Le micro-usinage en volume électrochimique :

Cette technique de gravure exploite l'effet de la polarisation électrique d'un matériau sur les vitesses de réaction de gravure. Dans le cas du micro-usinage en volume, la gravure électrochimique permet d'obtenir des couches d'arrêt de la gravure simplement en polarisant les caissons (n uniquement) implantés dans le silicium [21].

Concernant la gravure anisotrope qui s'opère en phase liquide, on doit prendre une référence de potentiel dans la solution. Il est possible alors d'obtenir des structures à membrane épaisse formées par les zones implantées n non gravées comme le montre la figure 2.17.

Une autre possibilité est de suspendre les zones de silicium isolées contenant de l'électronique (uniquement PMOS) qui serait isolée électriquement et thermiquement du substrat.

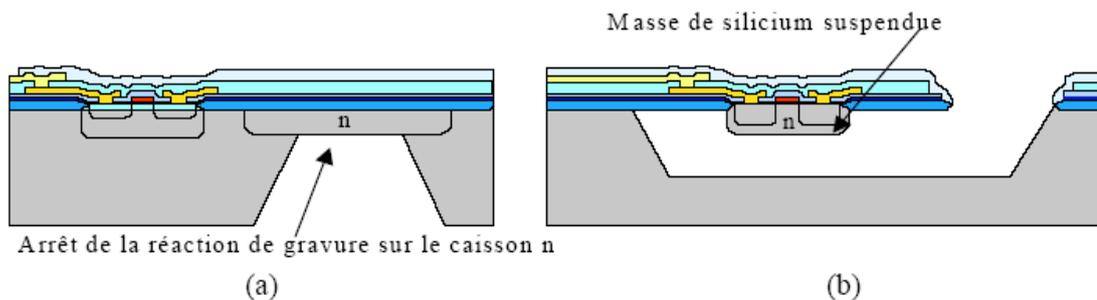


Figure 2.17 : Schéma en coupe de structures suspendues par micro-usinage électrochimique en volume, face arrière (a) et face avant (b) [6].

## II.4. D'autres technologies :

Il existe d'autres technologies de micro fabrication, nous les décrirons rapidement ici car très peu de ces technologies sont utilisées pour faire des systèmes intégrés.

### II.4.1. Les microsystèmes sur SOI :

Le SOI (Silicon On Insulator, silicium sur isolant) est une technologie microélectronique CMOS qui permet d'obtenir de meilleures performances en hautes fréquences, en tenue aux radiations, en température et une consommation réduite par rapport aux technologies CMOS classiques. Le principe est de réaliser un procédé CMOS sur un wafer contenant une couche d'oxyde enterrée sous le silicium. En ce qui concerne les microsystèmes, cette technologie permet d'obtenir des structures mobiles en silicium monocristallin après gravure en plasma RIE (reactive ion etching) du silicium monocristallin et gravure isotrope de la couche d'oxyde enterrée. Cette dernière agissant comme couche d'oxyde sacrificiel. La figure 2.18 montre un schéma en coupe de cette technologie [6].

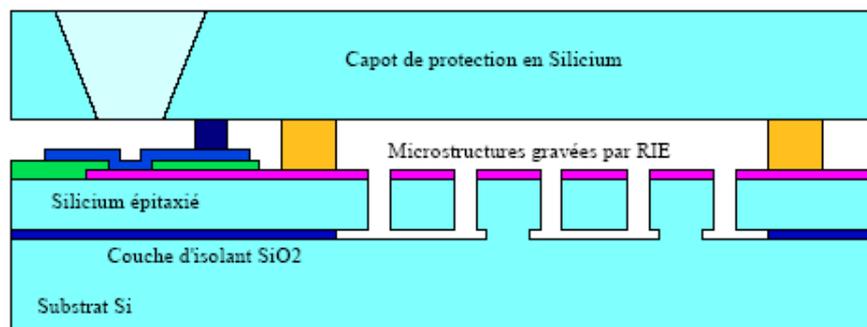


Figure 2.18 : Schéma en coupe de la technologie de micro-usinage sur SOI.

### II.4.2. Le LIGA :

Le processus de LIGA est un des méthodes de microfabrications. C'est un acronyme allemand (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) « lithographie, galvanof ormation, moulage » qui utilise la croissance électrolytique des métaux [22].

Il a été développé par le centre de recherches de Karlsruhe au début des années 80 en Allemagne en utilisant la lithographie de rayon X pour l'exposition de masque,

galvano-formation pour former les parties métalliques et le moulage pour produire les micro-parties avec du plastique, le métal, la céramique et leurs combinaisons.

La technologie LIGA permet de réaliser des structures de plusieurs centaines de micromètres d'épaisseur, ainsi que des micro-outils ou des moules en métal.

Ces derniers permettent de dupliquer des formes diverses sur des matériaux en plastiques.

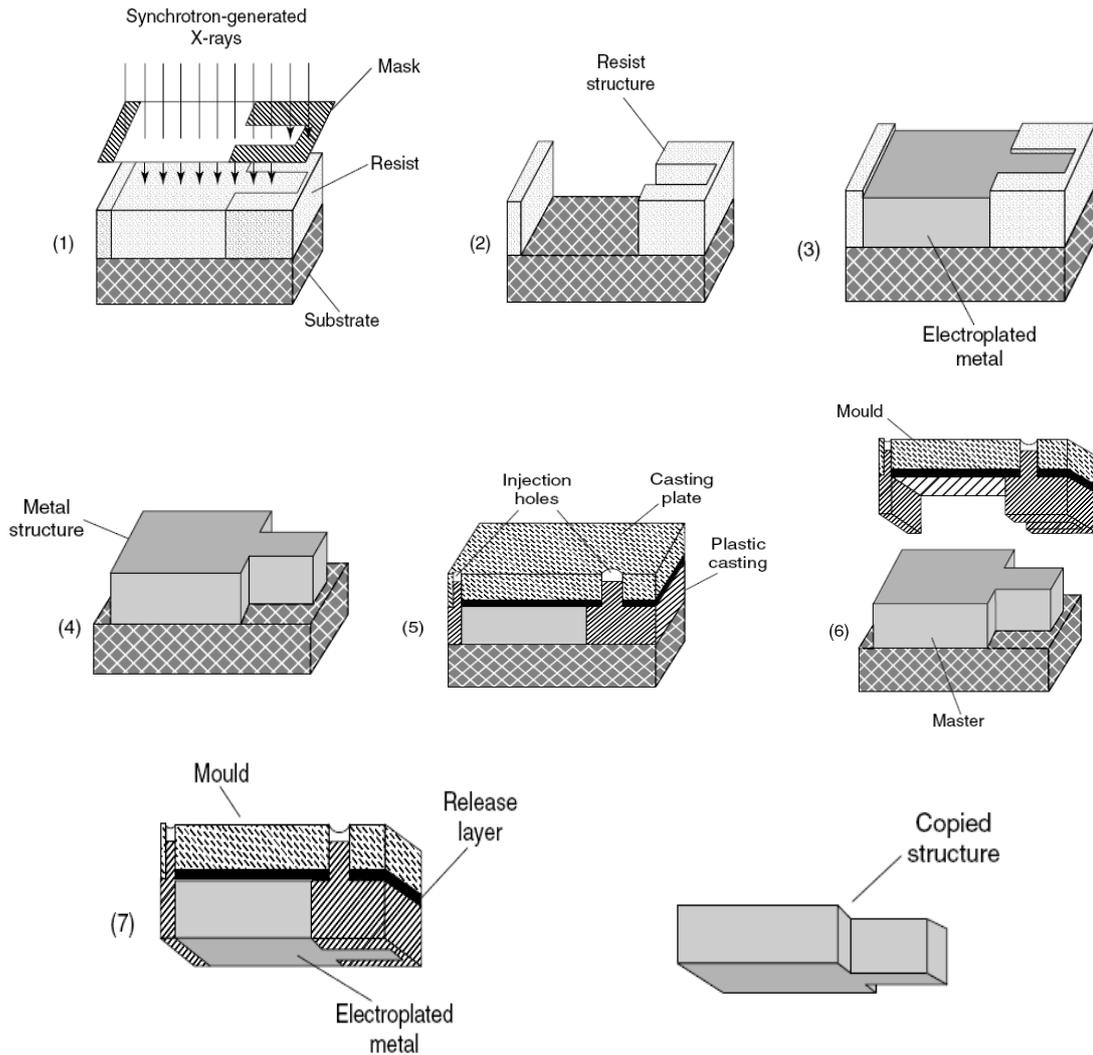
On a parfois recours à une étape supplémentaire en fin de fabrication : le wafer bonding, qui permet de lier deux systèmes conçus sur deux wafers différents en les positionnant face à face et par interconnexion) [1].

Une couche de photorésine épaisse est déposée sur un substrat, une étape de lithographie aux rayons X ou UV est opérée. La croissance du métal se fait alors dans la forme de résine, une couche de précurseur (seed) métallique est nécessaire sur le substrat pour démarrer la réaction de croissance électrolytique, la résine est ensuite nettoyée.

Ce procédé permet d'obtenir directement des pièces métalliques ou bien des moules métalliques pour réaliser des microstructures en plastique par injection.

Les MEMS exigent généralement les microstructures complexes qui sont un peu épaisses et tridimensionnelles. Par conséquent, beaucoup de technologies de micro-fabrication ont été développées pour réaliser le haut-aspect-rapport (de haut en large) et les dispositifs 3D.

Un diagramme schématique du processus de LIGA est montré sur la figure 2.19. Avec le processus de LIGA, la taille des microstructures peut atteindre jusqu'aux centaines de microns, tandis que la résolution latérale est maintenue à l'échelle submicronique en raison de la lithographie avancée de rayon X.



**Figure 2.19 : Procédé LIGA pour la fabrication de pièces métalliques ou de moules métalliques pour injection de plastiques [22].**

De divers matériaux peuvent être incorporés au processus de LIGA en tenant compte des propriétés électriques, magnétiques, piézoélectriques, optiques et les propriétés isolantes dans les capteurs et les déclencheurs.

Cependant, le coût élevé de production de processus de LIGA dû au fait qu'il n'est pas facile d'accéder à des sources de rayon X limite l'application du LIGA. Un autre inconvénient du processus de LIGA se fonde sur le fait que les structures fabriquées en utilisant le LIGA ne sont pas vraiment tridimensionnelles.

Comme nous savons, les structures complexes épaisses en 3D sont nécessaires pour certains MEMS avancées, qui signifie que d'autres processus de la microfabrication 3D doivent être développés pour les MEMS [22].

## **II.5. Conclusion :**

L'objectif de ce chapitre, est de définir la technologie et la méthode de fabrication des microsystèmes dédiés à la fabrication des accéléromètres quelque soit sa nature de détection (capacitif, résonant, thermique,.....).

Ainsi, nous avons présenté les technologies de fabrications des microsystèmes MEMS les plus utilisés. On a montré qu'il existe plusieurs procédés pour la fabrication des parties mécaniques des microsystèmes. Certains sont compatibles avec une intégration monolithique de l'ensemble du système tandis que d'autres ne permettent que la fabrication des éléments mécaniques. Pour cette raison, nous avons présenté deux types de technologies qui s'avèrent nécessaires pour la fabrication des microsystèmes MEMS:

- Celles obtenues par micro usinage de surface.
- Celles obtenues par micro usinage de volume.

# **Chapitre III**

## **Modélisation d'un accéléromètre capacitif en technologie MEMS**

### III. Modélisation d'un accéléromètre capacitif en technologie MEMS :

#### III.1. Présentation mécanique de l'accéléromètre :

L'accéléromètre peut être modélisé comme un système mécanique, d'un ressort, masse et amortisseur représenté sur la figure 3.1:

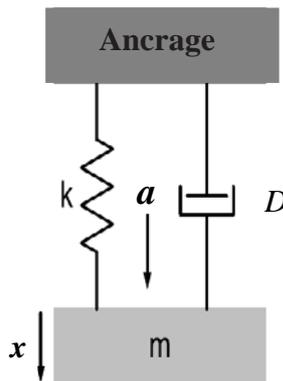


Figure 3.1 : Présentation mécanique du système [23,24].

Une force  $F$  produite par la puissance de l'accélération agit sur la masse  $m$  et résulte un déplacement  $x$ .

L'équation décrivant la réaction de système est donnée par :

$$F(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + kx \quad (3.1)$$

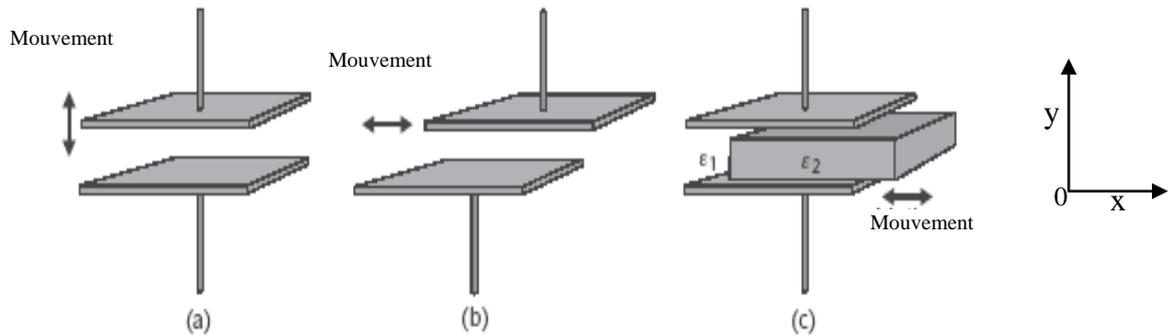
Où

$D$  est le coefficient d'atténuation,  $k$  est la constante de raideur du ressort.

#### III.1.1. Techniques de détection capacitive :

Les structures physiques des capteurs capacitifs sont relativement simples. La technique néanmoins fournit une manière précise de détecter le mouvement d'un objet. Essentiellement, les dispositifs comportent une électrode fixe (ou plus) et une électrode mobile (ou plus) [14]. Ils sont généralement caractérisés par une non-linéarité

inhérente et une sensibilité due à la variation de la température. La figure 3.2 illustre trois configurations pour une structure parallèle simple de condensateur à plat.



**Figure 3.2 : Exemples de détection par déplacement capacitif: (a) plat mobile, (b) à section variable, et (c) diélectrique mobile [14].**

En ignorant les champs marginales, la capacité d'une structure parallèle simple de condensateur plat est donnée par :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (3.2)$$

La figure 3.2 (a) montre le cas simple où l'électrode inférieure est fixe et l'électrode supérieure est mobile dans le sens vertical (axe des y). Dans ce cas, la séparation  $d$  change ainsi que la capacité mais d'une façon non-linéaire.

La figure 3.2 (b) représente un dispositif de capacité où la séparation  $d$  est fixe et le secteur recouvert varie dans le sens horizontal (axe des x). Dans cette configuration, il y a un rapport linéaire entre la capacité et le secteur du recouvrement.

La figure 3.2(c) montre une structure qui a une distance  $d$  entre les deux électrodes. Un matériel diélectrique serrée entre les deux surfaces et se déplace horizontalement en parallèle avec les surfaces des électrodes.

La figure 3.3 montre une détection capacitive différentielle, qui ressemble en nature à un détecteur de surface plat mobile sauf que dans ce cas il y a une électrode additionnelle fixe.

Si nous supposons que les deux électrodes externes ( $X$  et  $Z$ ) sont fixes et l'électrode intérieure ( $y$ ) se déplace librement à une direction parallèle vers  $X$ , puis l'espace entre les plats  $X$  et  $Y$  diminue et l'espace entre  $Y$  et  $Z$  augmente.

Si la distance du gap nominale  $d$  et l'électrode centrale se déplace par une distance  $x$ , le rapport entre la tension différentielle de sortie et le déflexion est donné par:

$$(V_2 - V_1) = V_s \left( \frac{x}{d} \right) \tag{3.3}$$

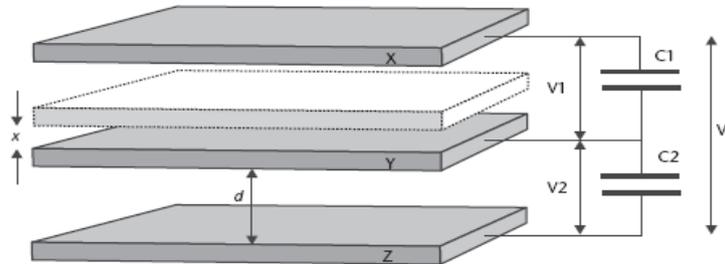


Figure 3.3 : Un capteur capacitif différentiel [14].

Où  $V_s$  est la tension d'alimentation. Ainsi cet arrangement fournit un rapport linéaire préservé sur une gamme dont  $|x| < d$  et capable de détecter le déplacement de quelques picomètres.

### III.1.2. Exemple d'un accéléromètre capacitif commercialisé :

Une des gammes les plus réussies de micro-accéléromètre a été introduite par des systèmes analogiques qui se nomment la chaîne ADXL. Ces dispositifs ont principalement visé le marché des véhicules à moteur, c'était le premier dispositif commercial libéré en 1991 nommé le ADXL50 [14].

Il est basé sur une technologie à surface micro-usinée avec une électronique de détection intégrée sur la même surface du dispositif. Un schéma fonctionnel simplifié du système est montré sur la figure 3.4.

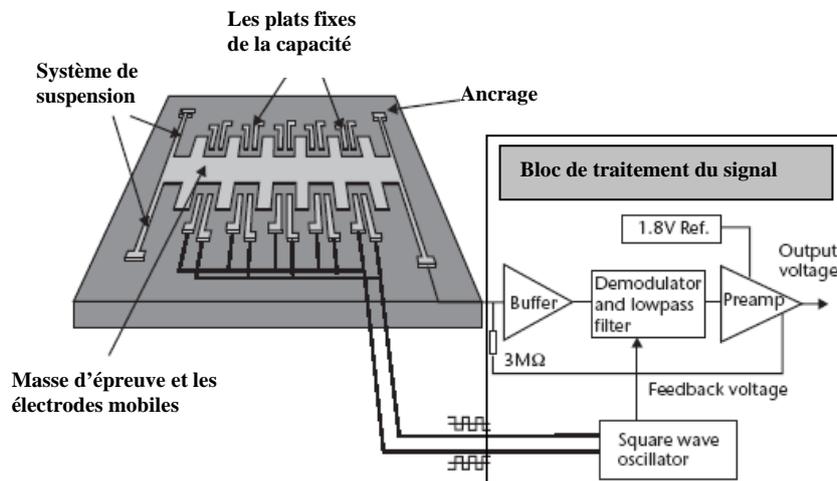


Figure 3.4: Schéma fonctionnel de l'accéléromètre ADXL50 [14].

## III.2. Conception d'un accéléromètre MEMS :

### III.2.1. Introduction:

Le modèle de conception d'un accéléromètre MEMS gravé en surface à base de poly-silicium est présenté sur la figure 3.5 suivante:

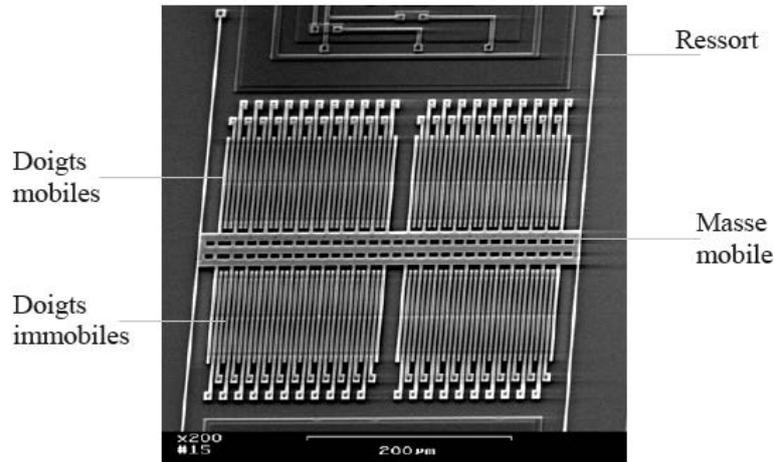


Figure 3.5 : Accéléromètre à détection capacitif type ADXL [14].

La modélisation et la conception technologique des dispositifs de MEMS (Micro Electro Mechanical System) deviennent une importante et intéressante solution pour la recherche. Cependant, de divers efforts sur l'optimisation et technologie de conception du dispositif de MEMS ont été faits tel que la modélisation et la simulation d'un accéléromètre capacitif. La compatibilité des CMOS conventionnels fournit un rendement élevé d'avantage et un prototype réglable rapide et transmissible à n'importe quelle fabriquant de CMOS.

Dans ce travail, nous allons présenter les différentes étapes de réalisation d'un accéléromètre capacitif MEMS à doigts, partant de la modélisation vers la conception, ainsi, nous allons comparaitre l'influence les différents paramètres du dispositif telle que la largeur et la longueur des doigts et la largeur de la masse d'épreuve sur le fonctionnement de l'accéléromètre et sa sensibilité.

Basé sur des études, une conception optimisée d'un accéléromètre capacitif MEMS à doigts est suggérée.

### III.2.2. Processus de micro fabrication:

Le micro usinage d'un accéléromètre CMOS (complémentaire métal oxyde semi-conducteur) utilise une haute technologie, il est réalisé à partir des processus sur commande combinant le micro usinage de surface de poly-silicium et des processus des circuits électroniques [25]. Il est fabriqué en utilisant un processus de trois métaux de  $0,5\mu\text{m}$  n-CMOS [26]. Après la fabrication, deux étapes de gravure sèche présentée sur la figure 3.6 sont utilisées pour définir et libérer la structure. La figure 3.6 (a) montre la coupe du morceau après la fabrication régulière de CMOS.

La première étape est représentée par la figure 3.6 (b), les couches diélectriques sont enlevées par gravure à ions réactif  $\text{CHF}_3/\text{O}_2$  anisotropique (RIE Reactive Ion Etch) avec la couche supérieure en métal agissant en tant que masque résistant à la gravure. Après que la paroi latérale de la microstructure soit définie avec précision, une gravure plasma  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  (RIE) isotopique est utilisée pour graver en volume le silicium et libérer la structure composée représenté dans la figure 3.6(c) [27]. La disposition dans les couches en métal est conçue pour former des poutres, des plats et des doigts électrostatiques à peigne.

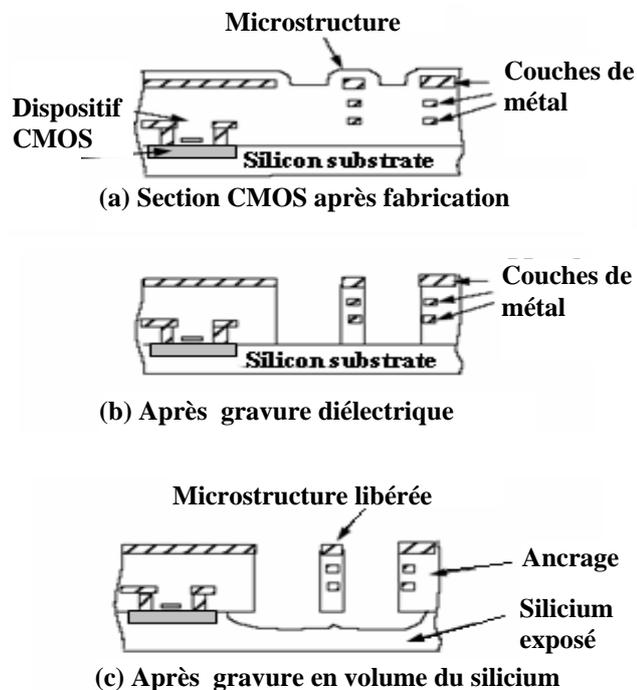


Figure 3.6: Processus de microfabrication d'un CMOS - MEMS [23, 26, 27, 28].

Des conducteurs électriques multicouches à isolement peuvent être conduits dans des structures composées, permettant plus d'options de conception (comparées aux structures des conducteurs homogènes).

Une sensibilité élevée du capteur améliore le signal par rapport au bruit électrique, le détecteur capacitif du pont complet possède un rendement différentiel meilleur pour rejeter le bruit.

Le dégagement du silicium dans l'étape de libération (figure 3.6(c)) contraint le placement des circuits de détection au moins  $15\mu\text{m}$  loin des microstructures. Comparé à la plupart des technologies de micro-fabrication commercialisée en poly-silicium, le MEMS à l'interconnexion électronique dans le CMOS-MEMS est plus court et supporte une capacité moins parasite. Des parasites sur les connexions à impédance élevée peuvent être négligeables pour une capacité de circuit d'interface, cependant, la sensibilité de capteur augmente quand on utilise la détection capacitive.

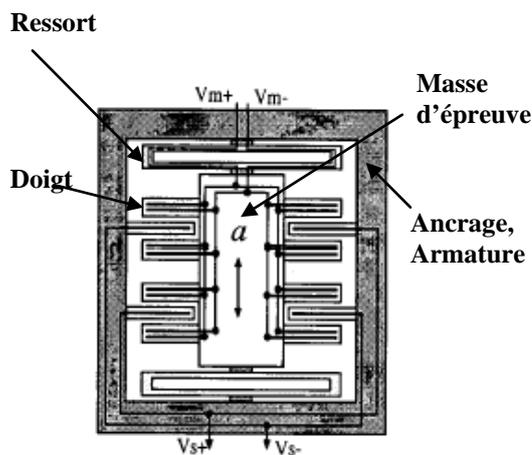


Figure 3.7: Structure de l'accéléromètre [26, 27, 28].

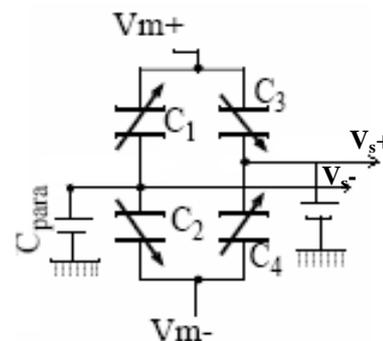


Figure 3.8: Schéma électrique du modèle de l'accéléromètre [23, 26, 29].

$C_{para}$  : est la capacité parasite et  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$  représentent les capacités différentielles entre les doigts mobiles et les doigts fixes.

Les figures 3.7 et 3.8 représentent respectivement la structure et le schéma du modèle de l'accéléromètre.

La topologie utilisée ici est celle d'un simple axe, une masse centrale commune dans un accéléromètre latéral à détection capacitive [28]. La masse d'épreuve est suspendue à l'aide de quatre ressorts serpentinés attachés à ses coins. Des poutres

interdigités mobiles sont utilisées pour la détection capacitive différentielle est représenté sur la figure 3.7. Chaque doigt se compose de deux nœuds électriques, un pour les deux capacités sur le demi-pont capacitif et les nœuds de détections sont situés sur les doigts de redressement.

Les différents schémas des interfaces capacitives sont présentés par la figure 3.9. L'interface capacitive la plus fréquemment utilisée pour la détection est une interface à demi pont asymétrique montrée sur la figure 3.9(a). La variation de la capacité peut être mesurée en conduisant les extrémités du pont et en prenant les nœuds centraux comme sorties. Généralement, des interfaces différentielles de détection capacitives ont été mises en application avec les processus de micro usinage extérieurs de poly-silicium.

Dans certaines conceptions, le déplacement est détecté avec la moitié du pont capacitif en modulant le nœud central (de la masse d'épreuve) en reliant les deux extrémités fixées à une interface de détection différentielle comme elle est présentée sur la figure 3.9 (b).

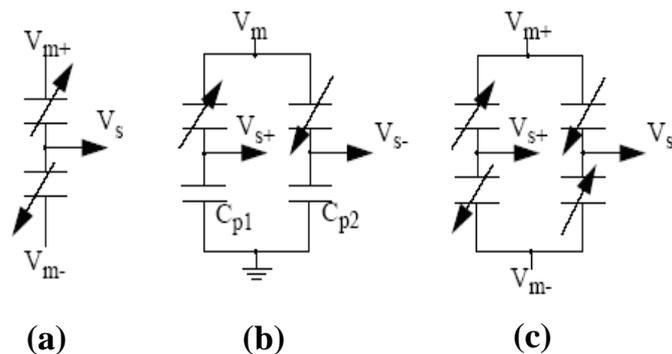


Figure 3.9: Différents schémas d'interfaces capacitives [23, 28].

La différence entre les deux capacités parasites ( $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$ ) obtenue à la sortie, peut être traduite comme une variation environnementale telle que la température et le vieillissement.

### III.2.3. Principe de l'opération:

Un schéma d'un micro accéléromètre capacitif simplifié est représenté sur la figure 3.10. La partie centrale de l'accéléromètre est une masse d'épreuve micromécanique suspendue. Quand une accélération externe est appliquée, la masse

d'épreuve se déplace avec la partie mobile de la référence qui agit en tant qu'élément de détection [28].

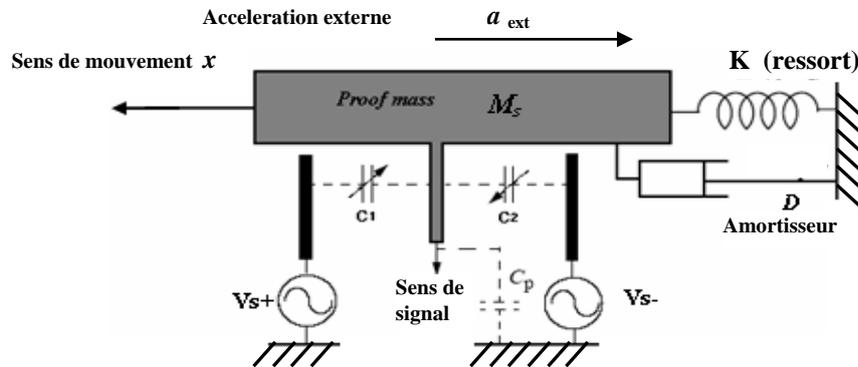


Figure 3.10: Schéma d'un micro accéléromètre Capacitif [23].

Les déplacements de la masse d'épreuve impliquent une accélération qui peut être mesurée par plusieurs méthodes. Pour une approche d'une détection capacitive, le déplacement est détecté en mesurant la variation de capacité entre les électrodes mobiles fixées à la masse d'épreuve et les électrodes fixes adjacentes. La capacité à faible parasite réalisée à partir de l'intégration monolithique est une solution pour améliorer la performance de cette technique.

Basé sur les paramètres mécaniques de l'élément de détection représenté sur la figure 3.10, l'équation différentielle du déplacement  $x$  en fonction de l'accélération externe est celle d'un système mécanique masse-ressort-amortisseur [26], [28]:

$$M_s \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + D \cdot \frac{dx}{dt} + K_s \cdot x = M_s \cdot a_{ext} \quad (3.4)$$

Où :

$K_s$  est la constante de raideur du ressort,

$D$  est le coefficient d'atténuation,

$M_s$  est la masse d'épreuve,

$a_{ext}$  est l'accélération externe.

Avec la notion de la transformée de Laplace, l'équation ci-dessus est convertie à une fonction de transfert de second ordre:

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{D}{M_s} + \frac{K_s}{M_s}} = \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{\omega_r}{Q} + \omega_r^2} \quad (3.5)$$

Où:

$\omega_r$ : est la fréquence de résonance.

$Q$ : est le facteur de qualité.

Pour une basse fréquence ( $\omega \ll \omega_r$ ) l'équation (3.5) devient:

$$\frac{X}{A} \approx \frac{1}{\omega_r^2} \quad (3.6)$$

La sensibilité est inversement proportionnelle au carré de la fréquence de résonance ce qui signifie que plus la fréquence de résonance est inférieure implique une sensibilité supérieure. Mais réellement, la limite inférieure de la fréquence de résonance est liée par plusieurs facteurs tels que la résistance mécanique du choc, une faible constante du ressort et une masse effective élevée.

### III.2.4. Conception du dispositif:

La conception d'un accéléromètre MEMS à peigne à surface de poly-silicium est montrée sur la figure 3.11.

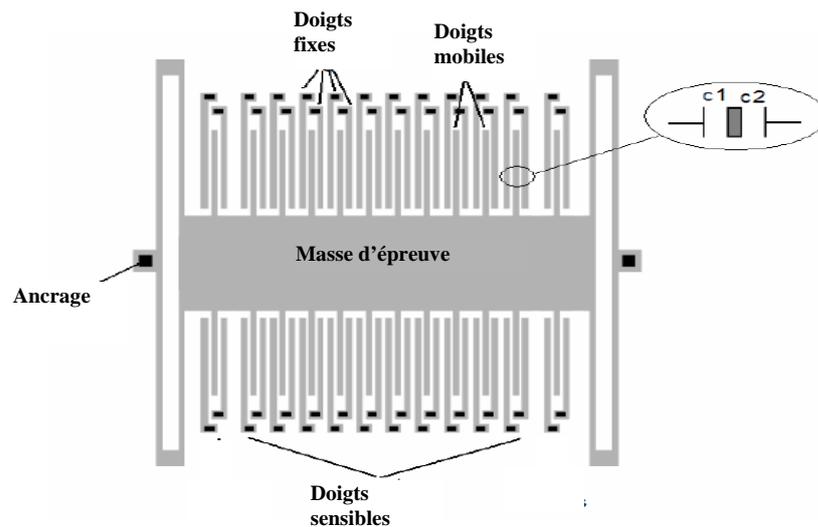


Figure 3.11: Conceptions générale d'un accéléromètre MEMS à peigne [30].

Les parties mobiles de cet accéléromètre MEMS à peigne se composent de quatre poutres pliées, d'une masse d'épreuve et de quelques doigts mobiles. Les parties fixes incluent deux supports (ancres) et quelques doigts fixes droits et gauches. La masse mobile centrale est reliée aux deux supports par quatre poutres pliées.

Dans les deux côtés à droite et à gauche de chaque doigt mobile, il y a les doigts fixes à gauche et à droite. Les doigts mobiles constituent la paire de capacité différentielle  $C_1$  et  $C_2$  [30].

Si l'accélération est nulle ( $a = 0$ ), les doigts mobiles se situent au milieu des doigts fixes gauches et droits. Les capacités intermédiaires  $C_1$  et  $C_2$  sont égaux. A la présence d'une accélération  $a$  le long de la direction horizontale parallèle au plan du dispositif, la masse d'épreuve  $M_s$  sera exposée à une force à inertie  $F = -M_s \cdot a$  le long de la direction opposée. Cependant, il y aura une déflexion des poutres du ressort ainsi qu'un déplacement d'une distance  $x$  de la masse mobile et des doigts mobiles le long de la direction de la force à inertie. Cela change automatiquement les gaps des capacités gauches et droits ainsi que les valeurs des capacités différentielles  $C_1$  et  $C_2$ .

Pour tester l'efficacité de l'accéléromètre, il suffit de mettre le dispositif à l'état du repos, c'est-à-dire, à une accélération nulle ( $a=0$ ) et en appliquant une tension  $V_d$  aux doigts fixes gauches ou droits. Une force électrostatique attirera les doigts mobiles vers une des directions gauche ou droite et en comparant ainsi soit la différence des déplacements ou la différence des capacités entre les deux états.

### III.2.5. Suspension mécanique:

La topologie de la poutre pliée peut fournir une constante d'amortissement inférieure et ainsi une sensibilité plus élevée.

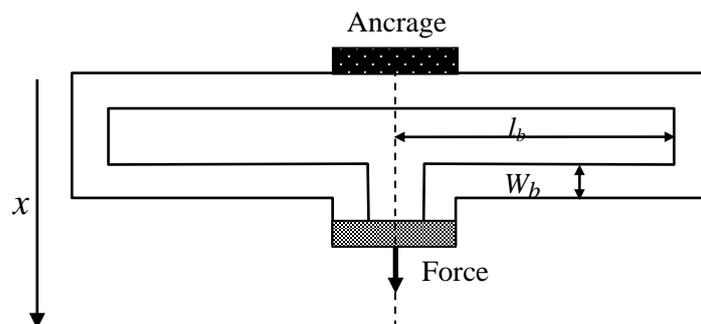


Figure 3.12: Structure détaillée du ressort de l'accéléromètre [23, 31].

La constante de raideur du ressort de cette structure est donnée par la relation:

$$K_s = \frac{1}{2} \cdot E \cdot h \cdot \left( \frac{w_b}{l_b} \right)^3 \quad (3.7)$$

Les quatre poutres pliées peuvent être traitées en tant que quatre ressorts reliés en parallèle. Par conséquent, la constante du ressort le long de la direction  $x$  pour une structure de suspension telle qu'elle est montrée sur la figure 3.12, peut être déterminée

par: 
$$K_{total} = 2 \cdot E \cdot h \cdot \left( \frac{w_b}{l_b} \right)^3 \quad (3.8)$$

Où:

$K_s$ : est la constante de raideur du ressort d'une seule poutre pliée.

$l_b$ : est la longueur de la poutre.

$w_b$ : est la largeur de la poutre.

$h$ : est l'épaisseur de la poutre.

$E$ : est le module de Young de la structure du matériau.

### III.2.6. Facteur d'atténuation et de qualité:

Il y a deux façons d'atténuer le mécanisme. D'abord, l'atténuation structurelle provoquée par le frottement des couches structurelles composées [28]. La seconde est l'atténuation de l'air visqueux due à la pression atmosphérique. Dans un accéléromètre latéral, l'atténuation est due à la pression qui se produit pendant la variation du gap d'air situé entre deux surfaces parallèles étroites.

Le coefficient d'atténuation entre les lacunes d'une poutre à doigt est donné par la

relation suivante [24]: 
$$D = N_f \cdot \eta_{eff} \cdot l_b \cdot \left( \frac{h}{d_0} \right)^3 \quad (3.9)$$

Où :

$N_f$  : Nombre total des doigts sensibles.

$\eta_{eff}$  : Viscosité efficace de l'air.

$d_0$ : Gap de la capacité

Cependant le facteur de qualité est donné par:

$$Q = M_s \cdot \omega_r / D \quad (3.10)$$

$$\text{Où : } \omega_r = \sqrt{K_s / M_s}$$

La réduction du coefficient d'atténuation augmente la possibilité du comportement résonnant (facteur de qualité  $Q$  supérieur).

### III.2.7. Connaissance de base d'un dispositif de MEMS capacitif :

Une structure de capacité de MEMS différentielle typique est représentée sur la figure 3.13 où  $M_s$  représente une masse de forme plate mobile ;  $F_1$  et  $F_2$  représentent deux fixateurs plats (des doigts dans un accéléromètre capacitif),  $B_1$  et  $B_2$  représentent les deux poutres du dispositif de MEMS [32].

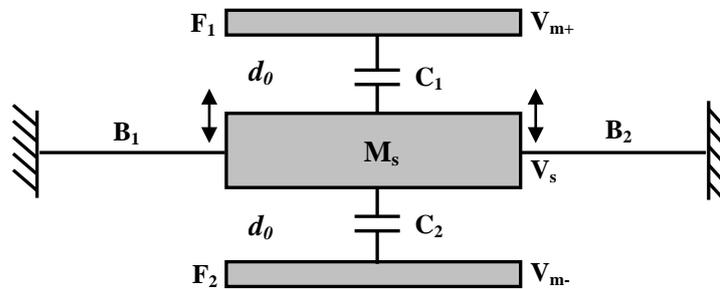


Figure 3.13: Diagramme schématique d'un dispositif capacitif de MEMS [23].

La masse mobile  $M_s$  est ancrée au substrat par deux faisceaux flexibles  $B_1$  et  $B_2$ , elle constitue deux capacités différentielles  $C_1$  et  $C_2$  avec les plats fixés inférieurs et supérieurs. Dans le mode statique, la masse mobile  $M_s$  est située au milieu entre  $F_1$  et

$$F_2, \text{ alors : } C_1 = C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d_0} \quad (3.11)$$

Où:

$\varepsilon_0$  : est la constante diélectrique de l'air.

$S$ : est la superficie de chevauchement entre  $M_s$  et  $F_1, F_2$ .

$d_0$ : est le gap statique de la capacité entre  $M_s$  et  $F_1, F_2$

A la présence de l'accélération ( $a \neq 0$ ), il y aura une déflexion des poutres et un certain déplacement de la masse mobile  $M_s$  le long de la direction verticale. Pour un

déplacement de  $x$  de la masse mobiles vers le haut avec ( $x \ll d_0$ )  $C_1$  et  $C_2$  peuvent être dérivés par les équations suivantes :

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{(d_0 - x)} \approx \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d_0} \left(1 + \frac{x}{d_0}\right) \quad (3.12)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{(d_0 + x)} \approx \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d_0} \left(1 - \frac{x}{d_0}\right) \quad (3.13)$$

Pour un déplacement  $x$ , des tensions de modulation  $V_{m+}$  positive et  $V_{m-}$  négative sont appliquées à  $F_1$  et  $F_2$  séparément:

$$V_{F1} = V_{m+} = +V_0 \quad (3.14)$$

$$V_{F2} = V_{m-} = -V_0 \quad (3.15)$$

Où:

$V_0$ : L'amplitude de la tension de modulation.

$t$  : Le temps de l'opération.

Selon la loi de conservation de charge, la charge dans les capacités  $C_1$  et  $C_2$  doit être égale. Dans ce cas nous avons:

$$C_1(V_{F1} - V_S) = C_2(V_S - V_{F2}) \quad (3.16)$$

Là où  $V_S$  est le niveau de la tension détectée par les doigts mobiles (masse mobile  $M_s$ ). La résolution des équations est donnée par:

$$V_S = \left(\frac{x}{d_0}\right) \cdot V_0 \quad (3.17)$$

La masse mobile centrale  $M_s$  agit en tant que diviseur de tension entre les plats fixes supérieur et inférieur  $F_1$  et  $F_2$  respectivement. En mesurant le niveau de la tension sur l'électrode centrale mobile  $V_S$ , nous pouvons trouver le déplacement  $x$  de la masse central mobile  $M_s$ . Ainsi, nous pouvons dériver la valeur des stimuli physiques appliqués. C'est le principe fonctionnant pour la plupart des dispositifs capacitifs différentiels de MEMS. Si la tension  $V_d$  est appliquée au plat fixe  $F_1$  et la tension

nominal  $V_{nominal}$  est appliqué à  $M_s$ , une force attractive électrostatique  $F_d$  sera éprouvée par la masse mobile centrale:

$$F_d = \frac{\epsilon_0 \cdot S \cdot V_d^2}{2 \cdot d_0^2} \quad (3.18)$$

Pour la transmission électrostatique verticale, la tension transmise ne peut pas dépasser une valeur de seuil par laquelle la déflexion excède  $1/3$  du gap  $d_0$  de la capacité. Autrement, la masse mobile sera coincée au plat fixe par une rétroaction positive et un court circuit se produira.

Afin d'améliorer la sensibilité d'un accéléromètre à peigne, une analyse dynamique doit être évoluée. Un accéléromètre de peigne de MEMS peut être simplifié par un modèle de ressort-masse. Pour chaque poutre à plie, les deux sections de poutre peuvent être traitées en tant que deux ressorts reliés en série.

### III.2.8. Analyse de la performance du système:

Quand une accélération  $a$  est appliquée à l'accéléromètre le long de la direction horizontale parallèle au dispositif plan, la poutre se dévie sous l'effet de la force à inertie. Cette déviation est vers le sens contraire de l'accélération appliquée. La sensibilité du déplacement du dispositif est définie comme un déplacement de la masse mobile (et doigt mobile) le long du système par unité de gravité d'accélération  $g$  ( $1g = 9.8m/s^2$ ). Les quatre poutres pliées peuvent être traitées autant que quatre ressorts connectés en parallèle.

Pour chaque poutre pliée, les deux sections de poutre peuvent être traitées comme deux ressorts connectés en série et chaque section de poutre peut être traitée par un modèle de poutre à double agrafes [24].

Supposant que pour chaque section de poutre pliée, la largeur et la longueur de la poutre séparément sont  $W_b$  et  $L_b$ .

La largeur et la longueur de la masse mobile centrale est  $W_m$  et  $L_m$  consécutivement, l'épaisseur du dispositif (l'épaisseur de la couche du poly-silicium) est donné par  $h$ .  $N_f$  est le nombre total des doigts sensibles.

Pour chaque doigt mobile, la largeur et la longueur sont  $W_f$  et  $L_f$  respectivement.

En absence de toute accélération ( $a=0$ ), le gap de la capacité entre chaque doigt mobile et doigt fixe à droite et à gauche est donnée par  $d_0$ .

$\rho$  est la densité du poly-Si ( $\rho=2.33 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$ ).

$E$  est le module de Young du poli-silicium donnée par ( $E=1.70 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ) [32].

Considérant que la longueur non couverte entre la masse mobile et les doigts fixes est nulle ( $\Delta l_f = 0$ ) comme représenté sur la figure 3.14.

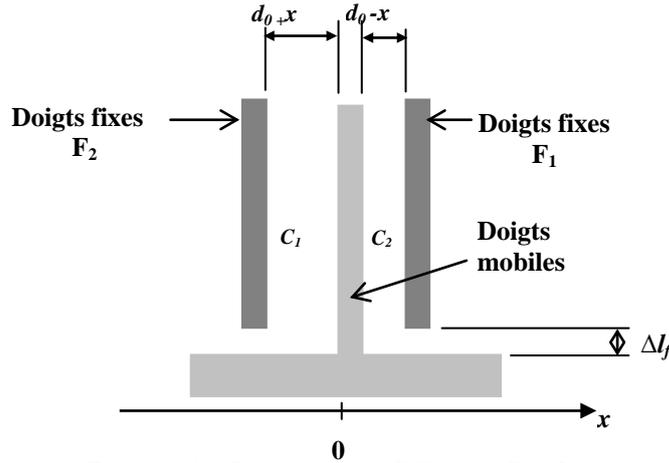


Figure 3.14: Les capacités différentielles d'un accéléromètre capacitif MEMS [23, 24].

À partir de l'équation (3.11) et quand l'accélération est nulle ( $a=0$ ), la capacité de détection statique des doigts d'un accéléromètre à MEMS est donnée par la relation [30,23]:

$$C_1 = C_2 = C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0} \quad (3.19)$$

- Quand l'accélération le long de la direction gauche horizontale est non nulle ( $a \neq 0$ ), la masse mobile se déplace vers la droite par une distance  $x$  impliquée par une force à inertie (figure 3.10). On suppose que l'approximation de déplacement  $x$  est inférieure à  $d_0$  ( $x \ll d_0$ ), les capacités à gauche et à droite  $C_1$  et  $C_2$  changent de valeurs et deviennent :

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{(d_0 + x)} = \frac{\varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0 \cdot (1 + x/d_0)} \approx \frac{\varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0} \cdot \left(1 - \frac{x}{d_0}\right) \quad (3.20)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{(d_0 - x)} = \frac{\varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0 \cdot (1 - x/d_0)} \approx \frac{\varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0} \cdot \left(1 + \frac{x}{d_0}\right) \quad (3.21)$$

La variation différentielle de la capacité  $\Delta C$  devient :

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0} \cdot \left( \frac{x}{d_0} \right) = 2 \cdot C_0 \cdot \left( \frac{x}{d_0} \right) \quad (3.22)$$

Partant des deux équations précédentes (3.20) et (3.21) pour une petite déflexion approximative, la variation différentielle de la capacité est directement proportionnelle au déplacement  $x$  des doigts mobiles. On peut considérer l'accéléromètre comme un modèle simplifié de masse – ressort à petites déflexions (angle de déflexion des doigts  $< 5^\circ$ ).

Considérant  $M_s$  comme masse totale de l'accéléromètre, la force à inertie  $F_{inertiel}$  en fonction de la masse mobile à une accélération  $a$  donné le long de la direction de détection est :

$$F_{inertiel} = -M_s \cdot a \quad (3.23)$$

Soit  $K_{total}$  la constante totale des quatre ressorts, le déplacement  $x$  de la masse mobile est donné par :

$$x = \frac{F_{inertiel}}{K_{total}} = -\frac{M_s \cdot a}{K_{total}} \quad (3.24)$$

La fréquence de résonance  $f_0$  du système ressort-masse est donnée par [32]:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{K_{total} / M_s} \quad (3.25)$$

La masse  $M_s$  de l'accéléromètre, inclut la masse séismique et tous les doigts mobiles fixés à elle, est exprimée selon [30] par:

$$M_s = \rho \cdot h \cdot (W_m \cdot L_m + N_f \cdot W_f \cdot L_f) \quad (3.26)$$

Où :

$\rho$  : La densité du poly-Si.

$h$ : Épaisseur du dispositif.

La constante de raideur du ressort  $K_s$  d'une seule poutre pliée peut être calculée par:

$$K_s = \frac{12 \cdot E \cdot I_b}{L_b^3} \quad (3.27)$$

Où :

$I_b$  est le moment à inertie de la poutre.

Les deux sections d'une poutre pliée possèdent une même longueur connectée en série. Dans ce cas, la constante du ressort  $K_s$  d'une poutre pliée [29] devienne:

$$K_s = \frac{E \cdot h \cdot W_b^3}{2 \cdot L_b^3} \quad (3.28)$$

Quatre poutres pliées de même taille sont connectées en parallèle, la constante totale du ressort du dispositif  $K_{total}$  est donnée par:

$$K_{total} = 4 \cdot K_s = \frac{2 \cdot E \cdot h \cdot W_b^3}{L_b^3} \quad (3.29)$$

### III.2.9. Analyse de la sensibilité:

Supposant que l'accélération du dispositif est celle de la gravité ( $a=g$ ), à partir de l'équation (3.24), le déplacement de la masse mobile du dispositif le long de la direction de l'accélération pour une accélération équivalente à la gravité terrestre peut être exprimé comme:

$$x = \frac{M_s \cdot g}{K_{total}} = \frac{\rho \cdot g \cdot (W_m \cdot L_m + N_f \cdot W_f \cdot L_f) \cdot L_b^3}{2 \cdot E \cdot W_b^3} \quad (3.30)$$

La sensibilité de déplacement  $S_d$  du dispositif est définie comme déplacement des doigts mobiles par unité d'accélération (g) le long de la direction de l'accélération

$S_d = \frac{x}{g}$ , peut être exprimée par:

$$S_d = \frac{\rho \cdot (W_m \cdot L_m + N_f \cdot W_f \cdot L_f) \cdot L_b^3}{2 \cdot E \cdot W_b^3} \quad (3.31)$$

La sensibilité capacitive  $S_c$  est définie comme une variation de capacité du dispositif par unité d'accélération (g) le long de la direction d'accélération. Pour un déplacement  $x$  de la masse et des doigts mobiles où  $x$  est inférieur au gap statique de la capacité  $d_0$ , la sensibilité capacitive  $S_c$  peut être exprimée par [24, 32]:

$$S_c = \frac{2 \cdot N_f \cdot \varepsilon_0 \cdot h \cdot (L_f - \Delta L_f) \cdot S_d}{d_0^2} \quad (3.32)$$

Où  $\Delta l_f$  est la longueur non couverte des doigts mobiles.

Si on considère que  $\Delta l_f$  est très inférieure par rapport à  $L_f$  ( $\Delta l_f \approx 0$ ), la sensibilité capacitive  $S_c$  devient:

$$S_c = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0^2} \cdot S_d = \frac{\Delta C}{g} = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot N_f \cdot L_f \cdot h}{d_0} \cdot \left( \frac{x}{d_0} \right) \cdot \frac{1}{g} \quad (3.33)$$

A partir des équations précédentes, nous pouvons constater que les sensibilités du dispositif  $S_d$  et  $S_c$  dépendent d'une façon directe des paramètres géométriques du dispositif, c'est-à-dire, la sensibilité peut être ajustée par la modélisation des paramètres géométriques.

### III.3. Conclusion :

Dans cette partie du travail, Nous avons optimisé un accéléromètre capacitif en technologie MEMS par une modélisation des paramètres qui nous semblent nécessaire.

Au premier lieu, nous avons présenté un modèle général d'accéléromètre capacitif sous forme d'un système mécanique (ressort, masse et amortisseur) avec une présentation des différentes techniques de détection capacitive.

Après avoir choisi notre modèle qui est fréquemment utilisé dans le domaine de détection capacitive, nous sommes passés au processus de conception de l'accéléromètre capacitif.

Le principe de la modélisation est fondé sur des connaissances de base du dispositif de MEMS capacitif que nous avons présenté dans ce chapitre, ainsi l'analyse de la performance du système et plus spécialement l'analyse de la sensibilité qui est considérée comme un facteur déterminant pour définir la qualité et la performance d'un capteur.

# **Chapitre IV**

## **Simulation et discussion des résultats**

## **IV. Simulation et discussion des résultats :**

### **IV.1. Introduction :**

Le but de notre travail est d'étudier et d'analyser d'une manière approfondie un accéléromètre capacitif afin d'optimiser et d'améliorer son comportement électrique et physique.

Cependant, il est d'une grande importance de trouver l'élément physique utile qui fait de cet accéléromètre un capteur avantageux et efficace.

Après avoir eu une idée générale sur les différents types des capteurs, la caractéristique commune la plus importante à laquelle les chercheurs se basent est la sensibilité. Durant notre travail, cette dernière est considérée comme paramètre important et essentiel pour la réalisation de notre accéléromètre.

### **IV.2. Simulation, discussion des résultats et optimisation:**

Considérant que le déplacement de la masse mobile (et les doigts mobiles)  $x$  est inférieur au gap  $d_0$  ( $x \ll d_0$ ), c'est une condition laquelle le système fonctionne afin d'éviter le court circuit du dispositif (c'est-à-dire, contact entre les doigts mobiles et les doigts fixes) et que l'épaisseur de la couche structurale du dispositif " $h$ " dans ce modèle est égale à  $6 \mu\text{m}$ . Le bruit environnemental étant négligé durant toute la simulation.

Le tableau 4.1 représente les paramètres géométriques et physiques utilisés durant notre simulation comme référence.

La simulation de notre modèle est effectuée à partir de la modélisation faite dans le chapitre précédent. Cependant, des programmes à base de MATLAB sont développés afin d'éclaircir et de montrer le bon fonctionnement de notre modèle d'accéléromètre capacitif.

| Paramètres                                   | Valeur                      |
|--|-----------------------------|
| Gap de capacitance $d_0$                     | $3 \mu m$                   |
| Epaisseur du dispositif $h$                  | $6 \mu m$                   |
| Largeur de la masse $W_m$                    | $80 \mu m$                  |
| Longueur de la masse $L_m$                   | $200 \mu m$                 |
| Largeur de la poutre $W_b$                   | $3 \mu m$                   |
| Longueur de la poutre $L_b$                  | $270 \mu m$                 |
| Largeur du doigt $W_f$                       | $3 \mu m$                   |
| Longueur du doigt $L_f$                      | $160 \mu m$                 |
| Nombre des doigts $N_f$                      | 32                          |
| Module de Young de poly-Si $E$               | $1.72 \times 10^{11} Pa$    |
| Constante diélectrique de l'air $\epsilon_0$ | $8.854 \times 10^{-12} F/m$ |
| Densité du poly-Si $\rho$                    | $2.33 \times 10^3 Kg/m^3$   |
| Gravité de l'accélération $g$                | $9.81 m/s^2$                |

Tableau 4.1: Paramètres physiques et géométriques du modèle [23].

#### IV.2.1. Effet de l'accélération $a$ sur le déplacement de la masse mobile $x$ :

La simulation du déplacement de la masse mobile  $x$  en fonction de l'accélération  $a$  dans un intervalle de 0g jusqu' à 12g par un pas de 2g, est montrée sur la figure 4.1.

Les résultats obtenus dans ce tracé sont comparés avec ceux obtenus par une simulation faite à partir du logiciel Coventorware [32, 33].

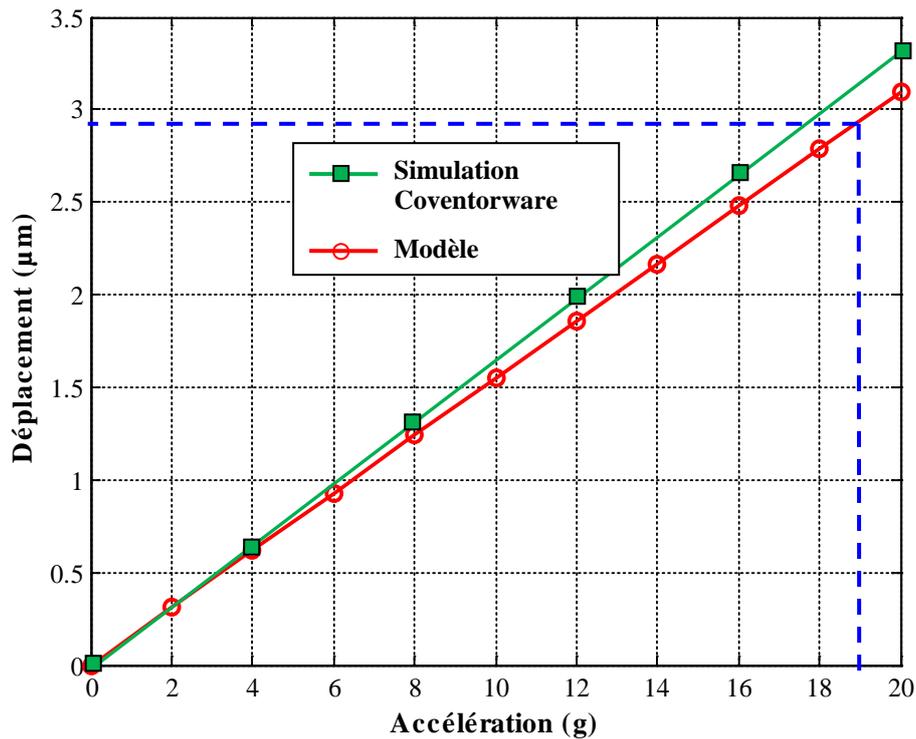


Figure 4.1: Déplacement de masse mobile en fonction de l'accélération.

On remarque que le tracé de la simulation ANSYS est presque identique au tracé de notre modèle.

Suivant le graphe obtenu, nous pouvons dire que l'augmentation de l'accélération induit un élargissement de l'intervalle du déplacement de la masse mobile ainsi que les doigts mobiles du système.

Selon la condition du déplacement précédente ( $x \ll d_0$  c-à-d  $x < 3\mu m$ ), le déplacement de la masse  $x$  est limité par l'accélération du dispositif. Dans ce cas l'accéléromètre ne doit pas dépasser 19g.

#### IV.2.2. Effet de l'accélération sur la différence capacitive :

La simulation de la différence capacitive  $\Delta C$  en fonction de l'accélération  $a$  dans un intervalle de 0g jusqu' à 10g par un pas de 1g est représentée sur la figure 4.2.

Le choix de l'intervalle de l'accélération est fait suivant le résultat précédant qui respecte la limite du déplacement  $x$  c-à-d ( $a < 19g$ ).

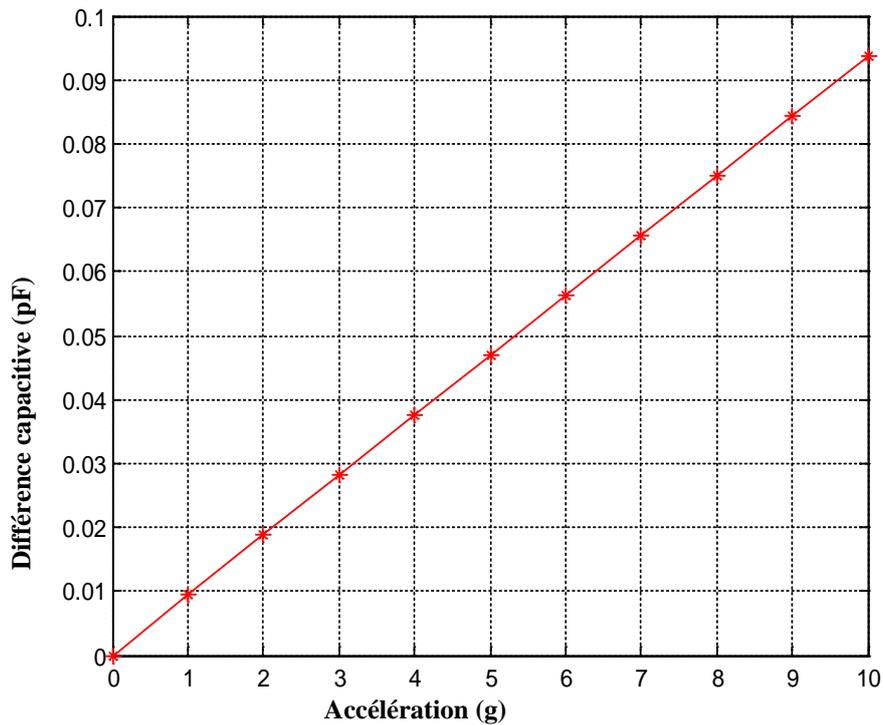


Figure 4.2.: La sensibilité capacitive vs l'accélération.

A partir du résultat obtenu dans la figure 4.2, on remarque que l'augmentation de l'accélération a comme conséquence une augmentation de la différence capacitive qui s'estime par quelques picofarad qui nous semble faible mais en réalité elle a une grande influence sur le système et plus particulièrement sur la partie du traitement du signal.

Puisque le but de notre travail c'est d'avoir une sensibilité élevée, alors on peut apprécier l'efficacité du modèle.

### IV.2.3. Effet de déplacement de la masse mobile $x$ sur la différence capacitive:

Sachant que le déplacement  $x$  dépend de l'accélération  $a$  et que ce déplacement  $x$  est inférieur au gap  $d_0$  : ( $x < d_0$ ), le tracé de la différence capacitive  $\Delta C$  en fonction du déplacement de la masse mobile est présenté sur la figure 4.3.

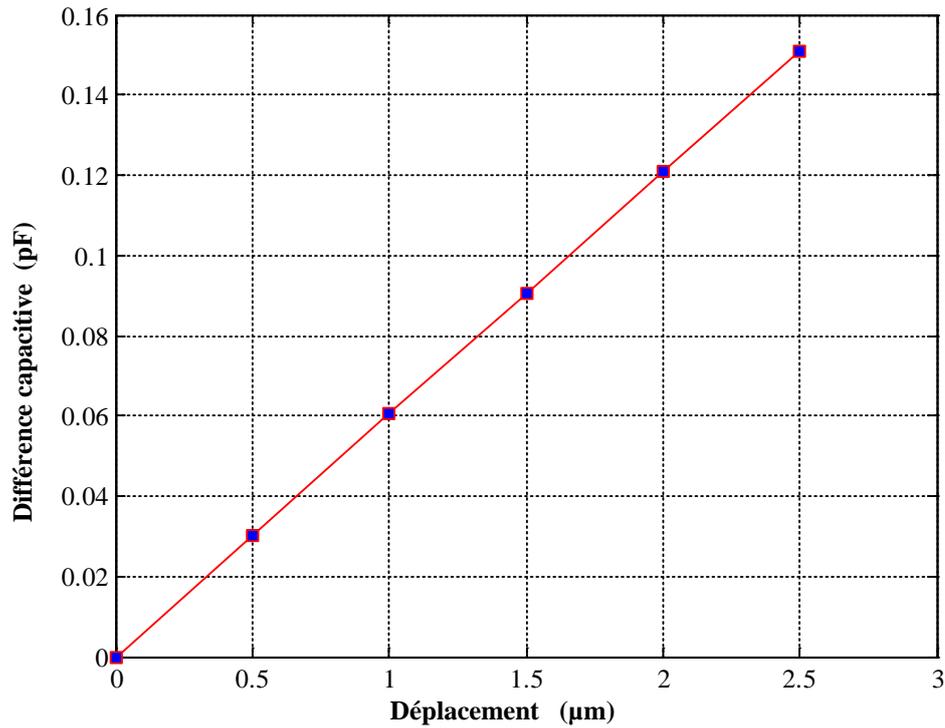


Figure 4.3: Sensibilité capacitive vs le déplacement de la masse mobile.

D'après le résultat de la simulation, on remarque que la variation capacitive est extrêmement sensible au minimum déplacement des doigts mobiles.

#### IV.2.4. Effet de la variation de la largeur de la poutre $W_b$ sur le déplacement de la masse mobile $x$ en fonction de l'accélération $a$ :

Le tracé du déplacement  $x$  en fonction de l'accélération  $a$  pour de différentes largeurs de la poutre  $W_b$  ( $2 \mu\text{m}$ ,  $2,5 \mu\text{m}$ ,  $3 \mu\text{m}$ ) est représenté sur la figure 4.4, sachant que  $d_0$  est fixé à  $3 \mu\text{m}$ .

Après l'analyse des résultats obtenus par la simulation du modèle en tenant compte de la condition  $x$  inférieur au gap  $d_0$  ( $x < d_0$ ) pour laquelle on évite le contact ou le frottement entre les deux doigts (mobile et fixe) qui risque le cours circuit.

Il est essentiel que l'accélération  $a$  ne dépasse pas  $5g$  à  $W_b = 2 \mu\text{m}$ .

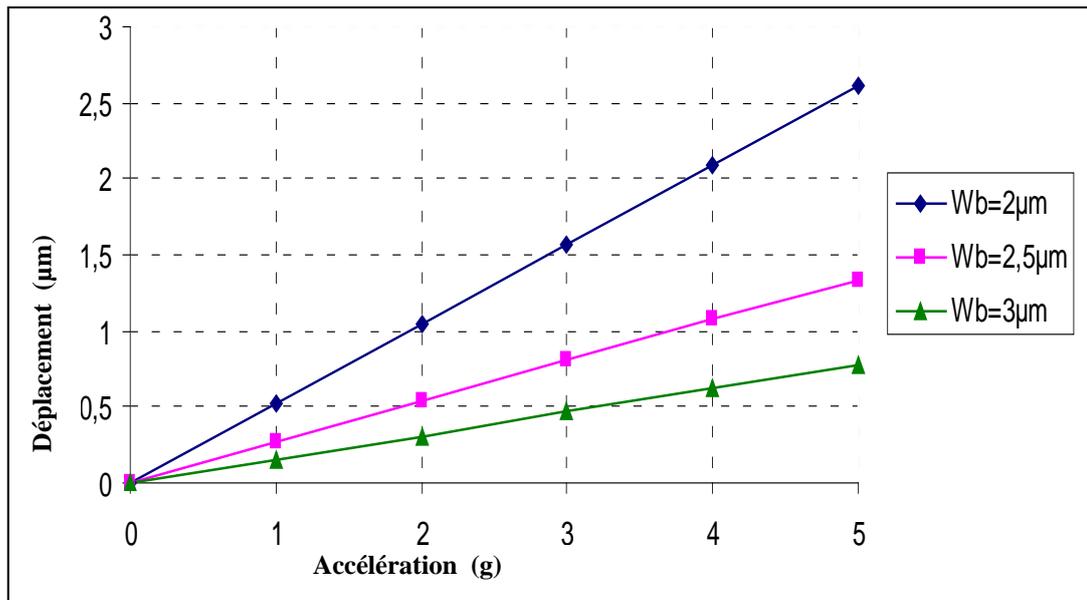


Figure 4.4: Déplacement de la masse mobile vs l'accélération avec de différente  $W_b$ .

Afin de supporter une accélération plus importante, il est conseillé d'élargir la largeur de la poutre du ressort  $W_b$  mais de telle façon à ne pas dépasser une accélération limitée précédente 19 g.

D'autant qu'il est nécessaire de choisir une largeur de la poutre  $W_b$  supérieure à  $2\mu\text{m}$ , il est considéré comme un avantage pour sa fabrication du point de vue robustesse.

#### IV.2.5. Effet de la variation de la largeur de la masse mobile $W_m$ sur le déplacement $x$ en fonction de la largeur de la poutre $W_b$ :

En tenant compte des paramètres des doigts mobiles fixes cités dans le tableau 4.1, ainsi que la longueur fixe de la poutre ( $L_b=270\mu\text{m}$ ), la simulation graphique de la sensibilité de déplacement  $S_d$  en fonction de la largeur de la poutre  $W_b$  pour les différentes largeurs de la masse mobile  $W_m$  est représenté sur les figures 4.5.

Les résultats obtenu dans ce tracé sont comparés avec ceux obtenu par une simulation basé sur ANSYS [30, 32].

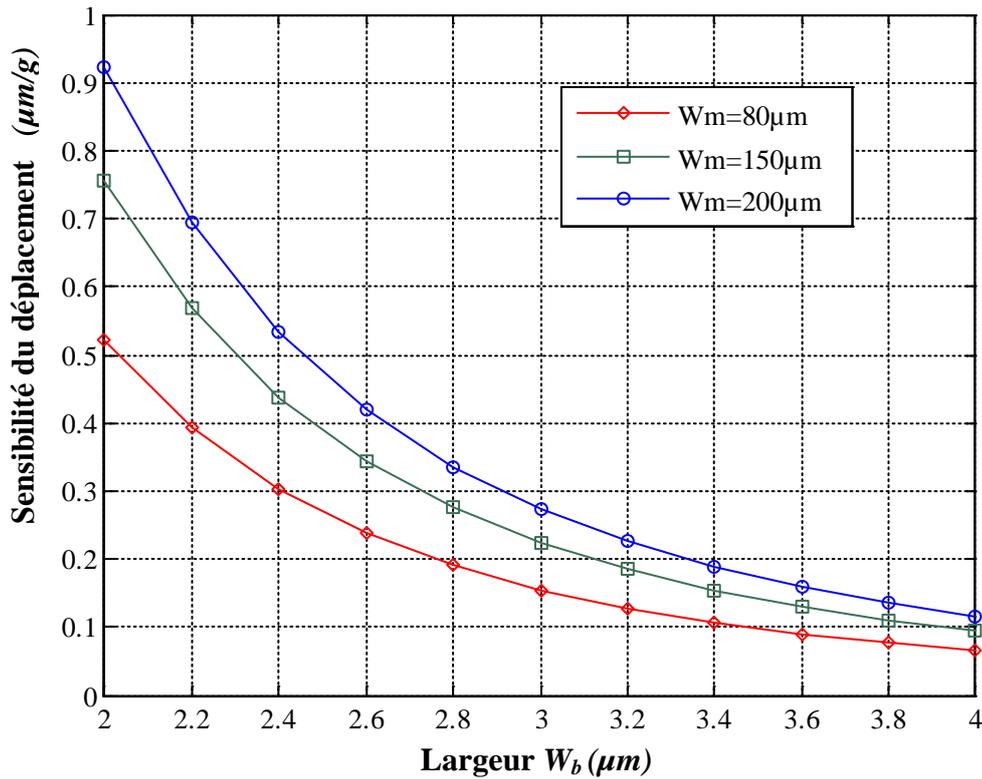


Figure 4.5 : Tracé de la sensibilité du déplacement en fonction de la largeur de la poutre  $W_b$  pour de différentes largeurs de la masse  $W_m = 80\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m}$

Suite aux résultats obtenus à partir des graphes de la figure 4.5, nous pouvons affirmer qu'il existe deux paramètres géométriques importantes qui peuvent ajuster avec efficacité la sensibilité du dispositif sans causer de changement remarquable à la structure entière du dispositif, ce sont la largeur de la poutre du ressort  $W_b$  et la largeur de la masse centrale  $W_m$ .

Les équations précédentes montrent que la sensibilité de déplacement des doigts mobiles est inversement proportionnelle au cube de la largeur de la poutre  $W_b$ .

À partir de ces graphes, nous pouvons conclure que la sensibilité de déplacement  $x$  augmente brusquement pendant que la largeur de la poutre du ressort diminue. Elle augmente également par l'élargissement de la masse centrale  $W_m$ , mais ce changement n'est pas significatif en comparant avec le changement de la largeur de la poutre.

Cependant, il est essentiel de prendre en considération la largeur de la poutre  $W_b$  comme paramètre important afin d'ajuster la sensibilité du déplacement  $x$ .

#### IV.2.6. Effet de la variation de la largeur de la masse mobile $W_m$ sur la fréquence de résonance $f_0$ en fonction de la largeur de la poutre $W_b$ :

La variation de la fréquence de résonance  $f_0$  en fonction de la largeur de la poutre du ressort fixe ( $l_b=270\mu\text{m}$ ) pour de différentes valeurs de la largeur de la masse mobile,  $W_m= 80\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m}$  et  $300\mu\text{m}$  est présentée dans la figure 4.6 ci-dessous : La comparaison du résultat à été fait avec une simulation ANSYS [32].

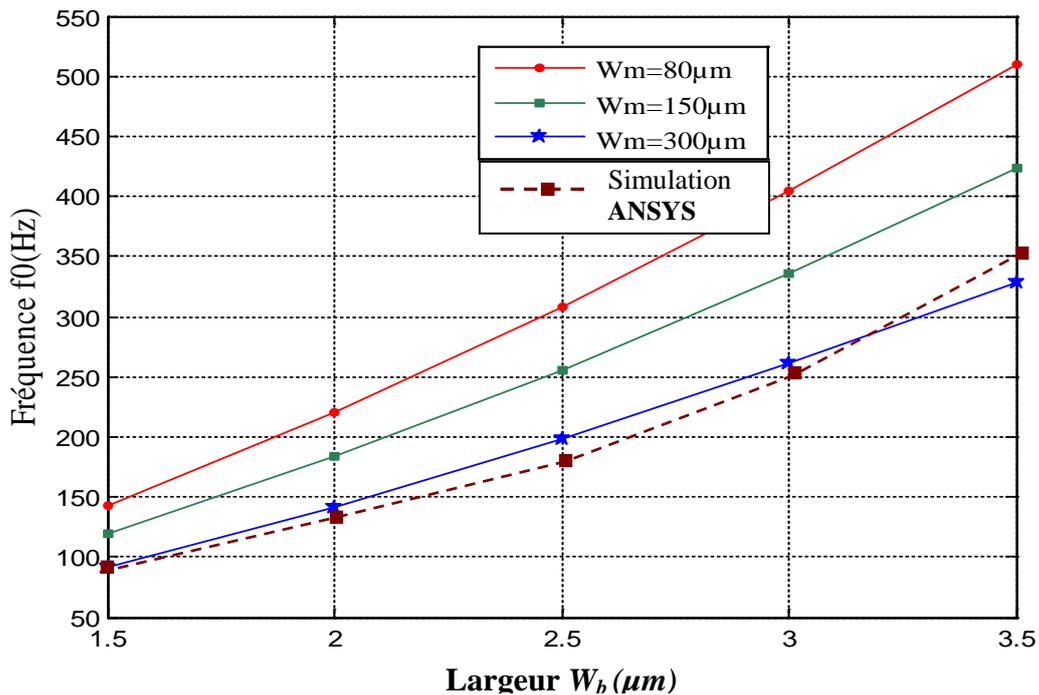


Figure 4.6 : Tracé de la fréquence  $f_0$  en fonction de la largeur  $W_b$  pour de différentes largeurs de la masse mobile.

On remarque que pour  $W_m = 300\mu\text{m}$ , les deux tracés celui de la simulation ANSYS et celui de notre modèle sont presque compatibles.

La fréquence de résonance du système ressort s'accroît presque au fur et à mesure avec l'élargissement de largeur de la poutre du ressort  $W_b$ , cela est due à la relation qui relie les deux paramètres l'un à l'autre par l'équation (3.25) décrite dans le troisième chapitre.

Quand la largeur de la masse mobile  $W_m$  varie de  $80\mu\text{m}$  jusqu'à  $300\mu\text{m}$ , la fréquence de résonance  $f_0$  diminue.

Dans ce cas, y'a deux paramètres géométriques qui diminuent la valeur de la fréquence de résonance : l'élargissement de la masse mobile et la diminution de la largeur de la poutre du ressort.

#### IV.2.7. Effets de la variation de la longueur de la poutre du ressort $L_b$ sur la fréquence $f_0$ en fonction de la largeur de la poutre $W_b$ :

Pour une largeur de la masse mobile  $W_m = 80\mu\text{m}$ , la simulation de la fréquence de résonance  $f_0$  en fonction de la largeur de la poutre du ressort  $W_b$  pour de différentes longueurs  $L_b$  de la poutre du ressort ( $140\mu\text{m}$ ,  $190\mu\text{m}$  et  $270\mu\text{m}$ ) est représenté dans la figure 4.7 :

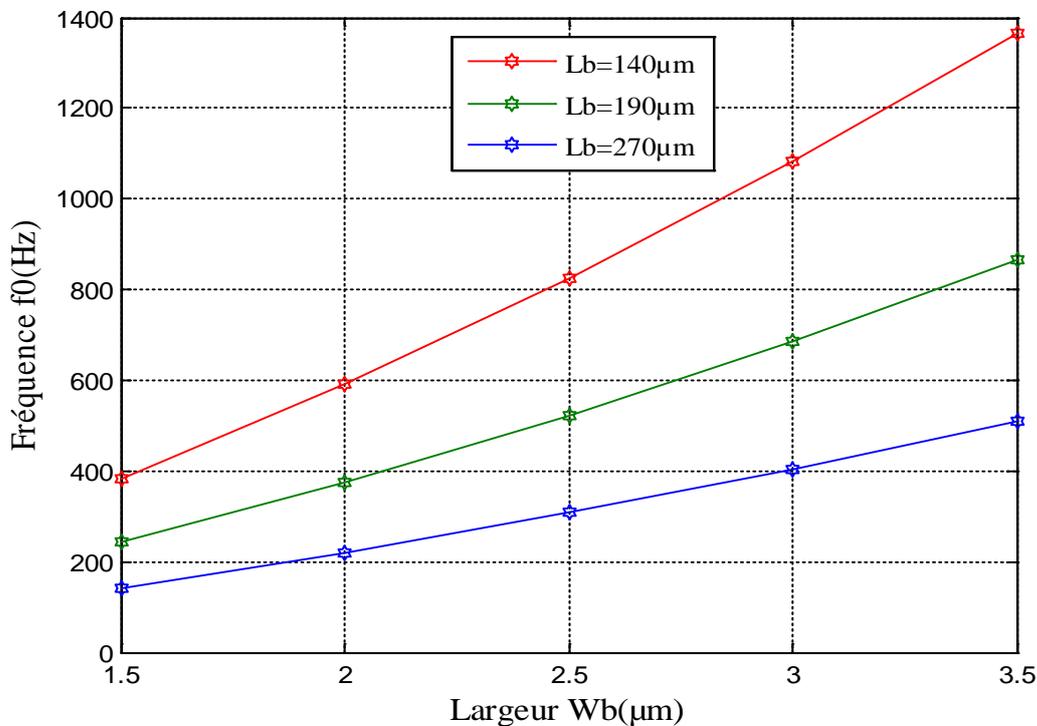


Figure 4.7: Tracé de la fréquence  $f_0$  en fonction de la largeur  $W_b$  pour de différentes longueurs de la poutre du ressort.

Pour cette étude, on fixe la largeur de la masse mobile  $W_m$  et on varie la longueur de la poutre  $L_b$ .

La fréquence de résonance  $f_0$  s'accroît corrélativement avec l'élargissement de la largeur de la poutre du ressort  $W_b$  d'une part. D'autre part, la fréquence de résonance  $f_0$  s'accroît aussi d'une manière proportionnelle et significative avec la diminution de la longueur de la poutre du ressort  $L_b$ .

Donc, la variation des deux paramètres  $W_b$  et  $L_b$  démontre un même effet sur la variation de la fréquence par rapport à la variation de la largeur de la poutre  $W_b$ .

#### IV.2.8. Effet de l'accélération $a$ sur la tension de sortie $V_s$ :

En appliquant les paramètres du tableau 4.1 dans notre modèle, une tension de modulation  $V_0 = 0.3V$  est appliquée pour alimenter le dispositif de l'accéléromètre capacitif, la courbe de la tension de sortie  $V_s$  au niveau des doigts mobiles (masse mobile) pour une accélération variable entre 1g et 19g est présentée par la figure 4.8 ci-dessous :

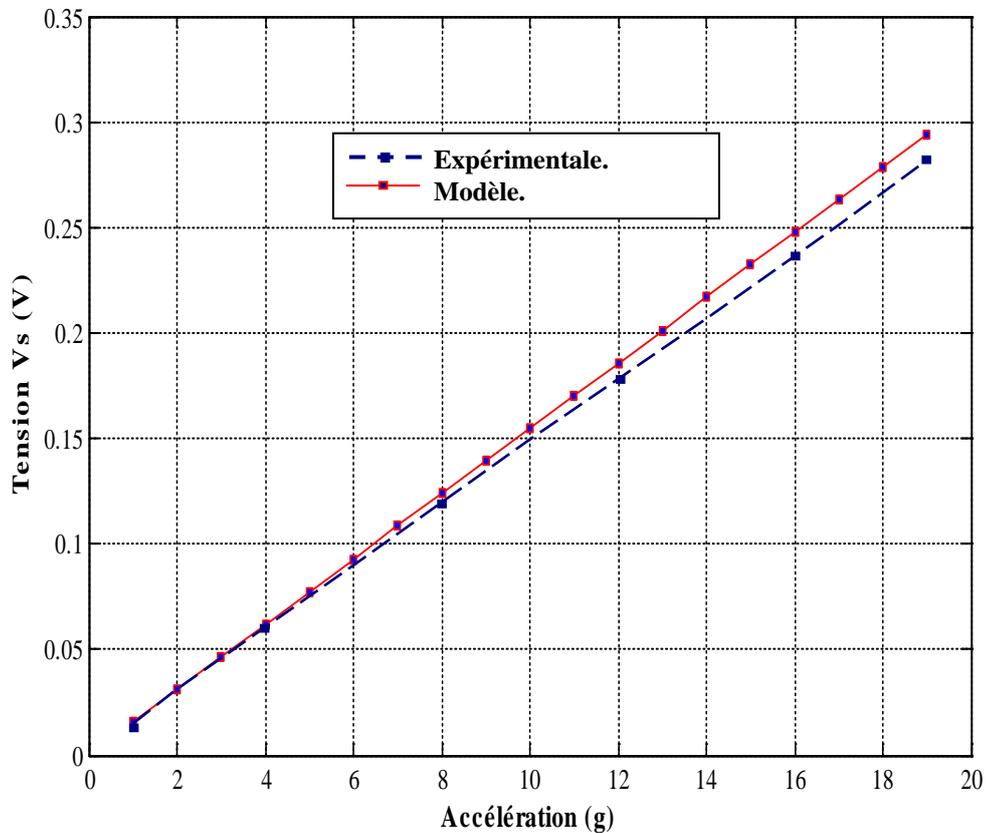


Figure 4.8 : Variation de la tension  $V_s$  en fonction de l'accélération  $a$ .

Le tracé a été comparé par rapport à une réponse expérimentale mesurée et fait par [25] et [32].

Quand une tension de modulation  $V_m = 0.3V$  est appliquée pour activer le dispositif, une tension de modulation positive  $V_{m+}$  est appliquée au niveau des doigts fixes supérieurs et l'autre tension de modulation négative  $V_{m-}$  est appliquée au niveau

des doigts fixes inférieurs de l'accéléromètre capacitif (voir figure 3.13). Cependant, la tension  $V_s$  obtenue au niveau des doigts mobiles pour une accélération maximale appliquée de 19g est de 0.29V.

Durant l'intervalle de l'accélération de 1g à 19g, la tension  $V_s$  s'élève de 0.02V jusqu'à 0.29V, cela est dû au rapport déplacement /gap ( $x/d_0$ ) qui est responsable de la désignation de la valeur de la tension  $V_s$ .

Le déplacement des doigts mobiles  $x$  dépend de l'accélération  $a$ , et cette dernière détermine la valeur de la tension de sortie  $V_s$ . Donc, pour mesurer l'accélération d'un tel objet qui fonctionne entre 0 jusqu'à 19g, il suffit de mesurer la tension à la sortie de l'accéléromètre capacitif  $V_s$ , pour déterminer la valeur de l'accélération.

### IV.3.Conclusion :

Le modèle de capteur d'accélération capacitif qu'on a étudié durant cette thèse est un dispositif qui se base essentiellement sur la maîtrise de la géométrie de fabrication tel que l'épaisseur du dispositif, les longueurs de la poutre du ressort et les doigts qui constituent les capacités ainsi que les largeurs des poutres et de la masse mobile.

Quand on augmente l'accélération, le déplacement  $x$  s'étale et donne comme résultat une élévation de la tension de sortie  $V_s$ .

La sensibilité de déplacement et la sensibilité capacitive jouent un rôle très important afin d'obtenir une meilleure précision. Cependant, les résultats qu'on a déduits par l'optimisation et la simulation du modèle durant notre étude confirme l'efficacité du modèle c à d, les deux paramètres  $a$  et  $x$  qui agissent sur la variation de la tension de sortie  $V_s$  sont les mêmes paramètres qui varient proportionnellement avec la sensibilité.

Un autre élément essentiel qui influe sur le système, est la raideur du ressort, il joue un rôle très important pour contrôler la fréquence de résonance du ressort  $f_0$ .

L'ajustage de la fréquence de résonance agit sur la force d'amortissement de telle façon à contrôler le déplacement  $x$  des doigts mobiles. Cette fréquence dépend de la largeur et de la longueur de la poutre et de la largeur de la masse mobile.

Pour avoir une meilleure performance de sensibilité et de robustesse qui répondent à notre modèle d'accéléromètre capacitif étudié précédemment, il est nécessaire qu'on respecte les paramètres optimisés suivantes :

- L'accélération maximale ne doit pas dépasser 19g.
- La largeur de la poutre du ressort doit être limitée entre 2 $\mu$ m et 4 $\mu$ m.
- La largeur de la masse mobile doit être supérieur à 80 $\mu$ m jusqu'à 300 $\mu$ m.
- L'épaisseur  $h$  du dispositif doit être de 6 $\mu$ m.
- Le gap de la capacité  $d_0$  de 3 $\mu$ m.
- Le nombre des doigts total fixes et mobiles dans ce modèle doit être de 32.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale :**

L'objectif de notre travail était d'une part, l'évaluation de la technologie CMOS associée à la micro-gravure pour la conception des accéléromètres microsystèmes MEMS, et d'autre part, de mettre en place un flot complet de conception et modélisation pour de tels capteurs.

Les technologies de fabrication des microsystèmes sont dérivées de celles de fabrication de la micro électronique utilisant les mêmes techniques des générations de masque (la photolithographie, le micro-usinage en volume et le micro-usinage en surface). Cependant, la plus part des parties mécaniques des procédés de fabrication des circuits intégrés à base des MEMS sont fabriquées à l'aide de procédés qui éliminent certaines parties du wafer en ajoutant de nouvelles couches structurales pour former le dispositif mécanique.

Les accéléromètres sont des dispositifs qui font partie des capteurs dont les propriétés principales sont la sensibilité et la gamme de fréquence de fonctionnement.

La modélisation d'un accéléromètre est réalisé à partir d'une ou quelques paramètres plus au moins sensible suivant leurs types de détections (optique, piézoélectrique, piezorésistif, thermique, capacitif, ....etc.).

Après un état de l'art sur les différents types de détections MEMS utilisés pour la mesure de l'accélération, nous avons choisi d'étudier, modéliser et simuler un capteur capacitif dont le principe est la mesure du déplacement des doigts mobiles au bout duquel est fixée la masse mobile agitée par un ressort sous forme de poutre bouclé, les doigts fixes et les doigts mobiles forment ainsi des capacités sous vide.

Les accéléromètres à détection capacitive CMOS utilisent deux types de gravure : La gravure en volume (bulk micromachining) où ici deux étapes post-process sont nécessaires : l'une pour supprimer le diélectrique et l'autre pour libérer la partie mobile. La gravure en surface (surface micromachining) consiste à éliminer les couches sacrificielles pour obtenir des structures suspendues. Le gap entre les différents doigts étant très petit (de l'ordre du micron). Cette technique permet de réaliser des capacités allant jusqu'à l'ordre du picoFarad.

Le principe de la modélisation consiste à simuler la sensibilité du déplacement des doigts mobiles ainsi que la sensibilité capacitive due aux différentes accélérations

appliquées. Pour cet effet, nous avons sélectionné les paramètres considérés sensibles tel que la largeur et la longueur de la poutre ( $W_b$  et  $L_b$ ), la largeur et la longueur des doigts mobiles ( $W_f$  et  $L_f$ ) et la largeur de la masse mobile  $W_m$  afin de modéliser le système et d'obtenir un accéléromètre de qualité. Cependant, il est essentiel d'imposer une limite inférieure pour la largeur de la poutre dans un processus de fabrication, si elle est trop étroite (moins de  $2\mu\text{m}$ ), elle deviendra extrêmement fragile et peut se casser facilement.

Pour avoir une bonne performance et une bonne sensibilité d'un accéléromètre capacitif, il est nécessaire de choisir de meilleurs paramètres tels que la largeur et la longueur de la poutre ( $W_b$  et  $L_b$ ) qui représentent la suspension du système d'accélération. D'autre part, la largeur et la longueur des doigts mobiles ( $W_f$  et  $L_f$ ) qui constituent les capacités entre les doigts mobiles et les doigts fixes influent directement sur la valeur de l'accélération de ces capacités.

Après la simulation du modèle et la modélisation des paramètres de l'accéléromètre capacitif, nous avons confirmé que la géométrie du dispositif tel que la largeur et la longueur des doigts mobiles et les paramètres du ressort jouent un rôle très important dans la fabrication et la réalisation d'un accéléromètre capacitif efficace basé sur une grande sensibilité et une haute précision.

Finalement, pour avoir de meilleure qualité de la sensibilité, robustesse et rendement qui répondent à notre modèle d'accéléromètre capacitif étudié précédemment, il est nécessaire qu'on respecte les paramètres optimisés suivantes :

- L'accélération maximale ne doit pas dépasser  $19g$ .
- La largeur de la poutre du ressort doit être limitée entre  $2\mu\text{m}$  et  $4\mu\text{m}$ .
- La largeur de la masse mobile doit être supérieur à  $80\mu\text{m}$  jusqu'à  $300\mu\text{m}$ .
- L'épaisseur  $h$  du dispositif doit être de  $6\mu\text{m}$ .
- Le gap de la capacité  $d_0$  doit être de  $3\mu\text{m}$ .
- Le nombre des doigts total doit être de 32 concernant uniquement ce modèle.

Il est possible d'obtenir un autre modèle d'accéléromètre capacitif avec des caractéristiques différentes que les notre suivant les besoins (exemple : la taille de l'accéléromètre, nombre des doigts appropriées), il suffit de modifier quelques paramètres mais avec grande attention pour ne pas perdre l'efficacité du dispositif ainsi que son objectif.

# **Références bibliographiques**

**Références bibliographiques:**

- [1]: Flavien Delauche : Optimisation statistique du rendement paramétrique de microsystèmes (MEMS). Thèse de Doctorat, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2003.
- [2]: Aboubacar Chaehoi : Conception et modélisation de MEMS monolithiques CMOS en technologie FSBM : application aux accéléromètres. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2005.
- [3]: H.C.Nathanson et al : The Resonant Gate Transistor.. IEEE Tran, Electron Devices, Vol.14, no.3, pp117-133, March 1967
- [4]: Henri Camon : Contribution à la conception et la réalisation de microsystèmes électrostatiques. Thèse de Doctorat, LAAS/CNRS. p28. 2005
- [5]: Amel Zenati : Modélisation et simulation de microsystèmes multi domaines à signaux mixtes : vers le prototypage virtuel d'un microsystème autonome. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I, pp46-65. 2007.
- [6]: Zein Juneidi : Outils CAO pour micro système. Thèse de Doctorat, Laboratoire TIMA, Institut National Polytechnique de Grenoble.p68. 2003.
- [7]: Wenli Zhou, Wei-Hsin Liao and Wen J. Li: Analysis and design of a self-powered piezoelectric microaccelerometer. Department of Automation and Computer-Aided Engineering. The Chinese University of Hong Kong Shatin, N.T., Hong Kong.
- [8]: Ashwin Arunkumar Seshia: Integrated Micromechanical Resonant Sensors for Inertial Measurement Systems. Engineering - Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley and Indian Institute of Technology, Bombay, 2002.
- [9]: Witte. M. Gu, H: Force and position sensing resistors, ' an emerging technology', in Proceedings of the International Conference on New Actuators, Bremen, VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik, Berlin, Germany: 168 170. 1992.
- [10]: Lung-Jieh Yang<sup>1</sup>, Chen-Chun Lai, Ching-Liang Dai, Pei-Zen Chang A Piezoresistive Micro Pressure Sensor Fabricated. Commercial DPDM CMOS Process. Department of Mechanical & Electro-Mechanical Engineering, University, Tamsui, Taiwan ; Department of Mechanical Engineering, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan. Institute of Applied Mechanics. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, No 1, pp. 67\_73 (2005).
- [11]: A.Chaehoi, L. Latorre, P.Nouet: Piezoresistive CMOS Beams for Inertial Sensing. LIRMM, Microelectronic Dept. CNRS / University of Montpellier – France, Baglio, Dipartimento Elettrico Elettronico & Sistemistico ,Università di Catania, Italia. Email [salvatore.baglio@dees.unict.it](mailto:salvatore.baglio@dees.unict.it)

- [12]: Sylvaine Muratet, 2005. Conception, caractérisation et modélisation. Fiabilité prédictive de MEMS à actionnement électrothermique. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS.
- [13]: Huang and N.K.S. Lee: Bimorph electrothermal transducer. Reproduced from Q.A. 1999, 'Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator', *Journal of Micromechanics and Microengineering* 9: 64–70.
- [14]: Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White: MEMS Mechanical Sensors. British Library Cataloguing in Publication Data, 2004. MEMS mechanical sensors. (Artech House MEMS library) (2004). *Microelectricalmechanical systems-Design and construction, Transducers*. Beeby, Stephen.621.3'81. ISBN 1-58053-536-4.
- [15]: E. B. Cooper, E. R. Post, S. Griffith, J. Levitan, and S. R. Manalisa: High-resolution micromachined interferometric accelerometer. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139 M. A. Schmidt. *Microsystems Technologies Laboratories, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Quate Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305. Applied Physics Letters* (may 2000), Volume 76, number 22.
- [16]: Yiyi Zeng: Design of a MEMS-based optical accelerometer with large measurable range and high sensitivity, 2008. *Electrical and Computer Engineering*. The university of british Columbia.
- [17]: Nin C. Loh, Martin A. Schmidt: Sub-10 cm<sup>3</sup> Interferometric Accelerometer With Nano-g Resolution, Senior Member, IEEE, and Scott R. Manalis. *Journal of micro-electro-mechanical-systems*, vol. 11, no. 3, june 2002.
- [18]: Courtesy, sandia National Labs-MEMS, S&T Department, [www.mems.sandia.gov](http://www.mems.sandia.gov).
- [19]: J.H. Smith, S.Montague, J.J. Sniegowski, J.R. Murray, R.P. Manginell, P.J.Mc Whorter: Characterization of the embedded micromechanical device approach to the monolithic integration of MEMS with CMOS. In *SPIE Micromachining and Microfabrication*, 1996.
- [20]: Olivier Francais: ESIEE Group, SAME 2003–Tutorials MEMS. <http://www.esiee.fr/~francaio>,
- [21]: P.French, M. Nagas, M.Esashi: Electrochemical etch-stop in TMAH without externally applied bias. In *Sensors and actuators A*. (56), pp 279-280,1996.
- [22]: G. Stix: Micro-electro-mechanical systems (MEMS) and radio frequency MEMS, 1992, 'Trends in micromechanics: micron machinations', *Scientific American* (November 1992): 72–80, par permission de Scientific American.
- [23]: Mourad Benmessaoud; Mekkakia Maaza Nasreddine: Optimization of MEMS capacitive accelerometer. Review paper, *Springer Microsystem Technologies*

- (2013), Micro- and Nanosystems Information Storage and Processing Systems, ISSN 0946-7076, Vol 19, PP 713–720, DOI 10.1007/s00542-013-1741-z.
- [24]: Babak Vakili Amini: A Mixed-Signal Low-Noise Sigma-Delta Interface IC For Integrated Sub-Micro-Gravity Capacitive SOI Accelerometers, Thèse, doctor of Philosophy in the School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, May 2006.
- [25]: Huikai Xie and Gary K. Fedder: A CMOS Z-axis Capacitive Accelerometer With Comb Finger Sensing, Department of Electrical and Computer Engineering and the Robotic Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213-3890, USA.
- [26]: Hao Luo, Gang Zhang, L. Richard Carley, A: Post-Cmos Micromachined Lateral Accelerometer, IEEE, and Gary K. Fedder (journal of micro-electro-mechanical systems, vol.11. no. 3, June 2002).
- [27]: Gang Zhang, Huikai Xie, Lauren E. de Rosset and Gary K. Fedder: A Lateral Capacitive CMOS Accelerometer With Structural Curl Compensation, Department of Electrical and Computer Engineering and The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- [28]: Gang Zhang, B.S: Design And Simulation Of A CMOS-MEMS Accelerometer, Tsinghua University (1994), Carnegie Mellon University.
- [29]: Vishal Gupta and Tamal Mukherjee: Layout Synthesis Of CMOS MEMS Accelerometers, Department of ECE, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA-15213.
- [30]: Kanchan Sharma, Isaac G. Macwan, Linfeng Zhang, Lawrence Hmurcik, Xingguo Xiong: Design Optimization Of Mems Comb Accelerometer, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Bridgeport, Bridgeport, CT 06604.
- [31]: Cheng-Kuan Lu: Wireless Mems Accelerometer For Real-Time, Department of Electrical Engineering and Computer Science Case Western Reserve University January, 2008.
- [32]: Xingguo Xiong: Built-In Self-Test And Self-Repair For Capacitive MEMS Devices, Thesis for the degree of doctor of philosophy, Department of Electrical and Computer Engineering and Computer Science of the College of Engineering, July, 2005.
- [33]: Badariah Bais and Burhanuddin Yeop Majlis: Low-g Area-changed MEMS Accelerometer Using Bulk Silicon Technique, Institute of Microengineering and Nanoelectronics (IMEN), Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia, American Journal of Applied Sciences 5 (6): 626-632, 2008, ISSN 1546-9239, 2008 Science Publications.

# **Annexe**

**Programme sous  
MATLAB**

## Programme sous MATLAB:

### - Declaration des données:

```
Ns=24;  
Nd=8;  
Nf=Ns+Nd;  
d0=3e-6;  
epsilon=8.854e-12;  
ro=2.33e+6;  
E=1.72e11;  
h=6e-6;  
Lb=270e-6;  
Wb=3e-6;  
Lm=200e-6;  
Wm=80e-6;  
Lf=160e-6;  
Wf=3e-6;  
g=9.81;
```

### - Simulation de la sensibilité capacitive $S_c$ en fonction de l'accélération $a$ :

```
Ms=ro*h*((Wm*Lm)+(Nf*Wf*Lf));  
% La constante d'amortissement Ks pour une seule plie est:  
  
Ks=(E*(Wb^3)*h)/(2*(Lb^3));  
%Pour Quatre plies :  
Ktotal=4*Ks;  
  
a=0:1:10;  
  
% a=x*Ktotal/Ms;  
% capacités en fonction du déplacement x:  
C1=(epsilon*Nf*Lf*h/d0)*(1-(x/d0));  
C2=(epsilon*Nf*Lf*h/d0)*(1+(x/d0));  
deltaC=(2*epsilon*Nf*Lf*h/d0)*(x/d0);  
a=x*Ktotal/Ms;  
Sd=(Ms*a)/Ktotal;
```

```
Sc=(2*Nf*epsilon*h*Lf*Sd)/((d0)^2);
```

```
plot(a,Sc,'r-*');
```

```
xlabel('Acceleration (g)')
```

```
ylabel('Sensibilité capacitif (F/g)')
```

```
title ('Simulation de la sensibilité capacitive en fonction de l  
accélération a')
```

```
grid on;
```

**- Simulation de la tension  $V_s$  en fonction de l'accélération  
a :**

```
Vs=(a/(Ktotal/Ms)/d0)*V0*sqrt(2*pi);
```

```
plot(a,Vs,'r-*');
```

```
xlabel('Accélération (g)')
```

```
ylabel('Tension Vs (V)')
```

```
%title ('Simulation de la tension Vs en fonction de l'accélération a')
```

```
grid on;
```

**- Simulation du déplacement x en fonction de l'accélération  
a :**

```
x=(a*Ms)/Ktotal
```

```
plot(a,x,'r-*');
```

```
xlabel('Accélération (g)')
```

```
ylabel('Déplacement ( $\mu$ m)')
```

```
title ('Simulation du déplacement x en fonction de l'accélération a')
```

```
grid on;
```

**- Tracé de la fréquence  $f_0$  en fonction de la largeur  $W_b$   
pour de différentes  $W_m$  :**

```
Wm=80e-6;
```

```
Wm1=150e-6;
```

```
Wm2=300e-6;
```

```
g=9.81;
```

```
A=(Wm*Lm);
```

```

AA=(Wm1*Lm);
D=(Wm2*Lm);
B=(Nf*Wf*Lf);

Ms=ro*h*(A+B);
Ms1=ro*h*(AA+B);
Ms2=ro*h*(D+B);

Ks=(E*(Wb.^3)*h)/(2*(Lb.^3));
%Pour Quatre plies :
Ktotal=4*Ks;

f0=(1/(2*3.14))*sqrt(Ktotal/Ms);
f1=(1/(2*3.14))*sqrt(Ktotal/Ms1);
f2=(1/(2*3.14))*sqrt(Ktotal/Ms2);
Wb=2e-6:0.2e-6:4e-6;

plot(Wb,f0,'r-h',Wb,f1,'g-h',Wb,f2,'b-h')
ylabel('Fréquence f0(Hz)')
xlabel('Largeur Wb(m)')
legend('80µm','150µm','300µm')
title('Tracé de la fréquence f0 en fonction de la largeur Wb ')
grid on;

```

**- Tracé de la Sensibilité de déplacement  $S_d$  en fonction de la largeur  $W_b$  pour de différentes  $W_m$  :**

```

Wm0=80e-6;
Wm1=150e-6;
Wm2=200e-6;

Lb0=140e-6;
Lb1=190e-6;
Lb2=270e-6;

g=9.81;

A=(Wm*Lm);
B=(Nf*Wf*Lf);
Ms=ro*h*(A+B);

```

```

Ks0=(E*(Wb.^3)*h)./(2*(Lb0.^3));
Ks1=(E*(Wb.^3)*h)./(2*(Lb1.^3));
Ks2=(E*(Wb.^3)*h)./(2*(Lb2.^3));

%Pour Quatre plies :
Ktotal0=4*Ks0;
Ktotal1=4*Ks1;
Ktotal2=4*Ks2;

%f0=(1/(2*3.14))*sqrt(Ktotal0/Ms);
%f1=(1/(2*3.14))*sqrt(Ktotal1/Ms);
%f2=(1/(2*3.14))*sqrt(Ktotal2/Ms);

Wb=2e-6:0.2e-6:4e-6;

Sd0=ro*(Lb^3)*((Wm0*Lm)+(Nf*Wf*Lf))./(2*E*(Wb.^3));
Sd1=ro*(Lb^3)*((Wm1*Lm)+(Nf*Wf*Lf))./(2*E*(Wb.^3));
Sd2=ro*(Lb^3)*((Wm2*Lm)+(Nf*Wf*Lf))./(2*E*(Wb.^3));

plot(Wb,Sd0,'r-h',Wb,Sd1,'g-h',Wb,Sd2,'b-h')
ylabel('Sensibilité de déplacement Sd(µm/g)')
xlabel('Largeur Wb(µm)')
legend('Wm=80µm','Wm=200µm','Wm=250µm')
title('Tracé de la Sensibilité de déplacement Sd en fonction de la
largeur Wb ')
grid on;

```



## Résumé

Depuis des dizaines d'années, le domaine des capteurs était 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 (Micro-Electro-Mechanical-Systems), il s'agit alors de capteurs intégrés.

Parmi les premiers microsystèmes développés et industrialisés est le micro-accéléromètre, ses domaines d'utilisation sont variés (airbags des véhicules, les systèmes de navigation, les appareils médicaux, sismométrie, surveillance de machines, etc.).

Notre travail alors consiste à étudier et améliorer de différents types d'accéléromètres à base de MEMS par l'optimisation et la modélisation des paramètres qui s'intègrent dans leur conception on essayant d'améliorer un model de précision et de qualité.

Le premier chapitre recouvre les différents types de détection qui entre dans la fabrication des accéléromètres à base des MEMS tel que la détection piézoélectrique, à structure résonante, piezorésistive, thermique et optique.

Notre intérêt durant le second chapitre, est de définir les technologies et les méthodes de fabrication des microsystèmes (MEMS) dédiés à la fabrication des micro-accéléromètres.

Le troisième chapitre a été consacré pour une étude mathématique et physique d'un model d'accéléromètre capacitif en technologie MEMS par une modélisation des paramètres on utilisant de différentes approches pour améliorer le rendement du modèle.

Dans le dernier chapitre, une simulation du model est réalisée par un logiciel de MATLAB, des paramètres initial sont proposés pour bute d'avoir une amélioration de justesse afin d'obtenir un model parfait et prêt pour la mise en fabrication.

## ملخص

مند عشرات السنين، بقي مجال المستشعرات في أوج الإرتقاء تبعاً للتطور البراق لتكنولوجيات صناعة المكونات الإلكترونية وبالأخص وصول الأنظمة المصغرة إلى سوق الصناعة، وكذا بروز تكنولوجية الأنظمة المايكرو إلكترونيك الميكانيكي. إذا نحن بصدد ذكر المستشعرات المدمجة. ضمن الأنظمة المصغرة الأولى المتطورة و المصنعة نذكر مقيا س التسارع المصغر، مجالات إستعماله متعددة (الواقى الهوائي، أنظمة الملاحة، الأجهزة الطبية، أجهزة إستشعار الهزات الأرضية، مراقبة الأجهزة،.... إلخ). يتركز مجال عملنا في دراسة وتحسين مختلف أنواع مقاييس التسارع المرتكزة على أنظمة المايكرو إلكترونيك الميكانيكية (MEMS) وذلك بالتوسع وتشكيل المعالم التي تندمج في صناعتها مع محاولة تحسين نموذج ذات دقة و جودة عالية.

يشمل الباب الأول دراسة مختلف أنواع المستشعرات الخاصة بالتسارع كالإستشعار عن طريق: الضغط الإلكتروني، الهيكل الاهتزازي (الرنان)، الضغط بالمقاومة، الحرارة ثم الضوئي. نتطرق في الباب الثاني إلى دراسة تقنيات صناعة الأنظمة المايكرو إلكترونيك الميكانيكية التي تندرج في صناعة مختلف أنواع المستشعرات الخاصة بالتسارع وكذا أنواع إستخداماته الأساسية. إهتمامنا في الباب الثالث ينظم دراسة رياضية و فيزيائية لنموذج خاص بمقيا س التسارع المكثف (بالمكثفة، وهذا يقودنا إلى عملية تكييف النموذج مع إستعمال مختلف المقاربات الممكنة في تحسين مردود النموذج. أما في الباب الأخير فينصب إهتمامنا حول تقليد النموذج بإستعمال برنامج مصمم عن طريق حبكة إعلامية من نوع MATLAB و المرتكز حول معطيات و معالم أولية مقترحة مع إدخال تحسينات مصححة من أجل الحصول على نموذج كامل ومهيأ للصناعة.