



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE



MÉMOIRE DE MASTER EN ELECTRONIQUE GÉNÉRAL

Option

INSTRUMENTATION ÉLECTRONIQUE

Présenté par

Djabbour Abdelkarim

THÈME

**Etude et simulation d'un accéléromètre
piézorésistif**

Soutenu : le mois de Octobre 2013

Devant le jury :

***Président* : BOUAZZA Benyounès**

MC A. UABB Tlemcen

***Examineur* : SOULIMANE Sofiane**

MCA. UABT Tlemcen

***Encadreur* : GHAF FOUR Kheir-eddine**

Prof UAB Tlemcen

Co-encadreur : BENICHOU Abdelkader

Doctorant UAB Tlemcen

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2013/2014

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

- *Aux être les plus chers de ce monde : « mes chères parents » qui m'ont beaucoup aidé pour terminer mes études, et qui m'ont tellement encouragé moralement et psychologiquement, ils se sont sacrifiés pour moi durant toute la période de mes études.*
- *A toute la famille sans exception.*
- *A mon encadreur Mr. Ghaffour Kheir-eddine, Co-encadreur Mr. Benichou Abdelkader et tous les enseignants du département de Génie Électrique et Électronique..*
- *A mes amis : Rabah, Aissa, Redouane, Mohamed, Anouar, Hakim.*
- *A tout mes amis de la promotion génie électrique sans citer les noms.*
- *A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.*

DJABBOUR ABDELKARIM

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier DIEU, le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de terminer mes études et de réaliser ce modeste travail.

Je remercie très sincèrement Monsieur Kheir-Eddine Ghaffour, professeur à l'université de Tlemcen, qui a assuré l'encadrement de mon travail où il a été une source de motivation et d'encouragement. Je tiens à lui exprimer mes profonds respects et mes respectueuses gratitudees pour sa patience, ses orientations et son suivi durant l'élaboration de ce Master.

Je remercie Monsieur Benichou Abdelkader un doctorant à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'être le Co-encadreur et pour toutes les aides qu'il m'a apportées dans la simulation numérique.

Je remercie Monsieur, Bouazza Benyounes, maître de conférences à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'être président du jury de mon travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Messieurs : Soulimane Sofiane, maître de conférences à l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'ont fait en acceptant de participer à ce jury.

Je remercie vivement tous les enseignants du département génie électrique et électronique.

DJABBOUR ABDELKARIM

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Généralités sur les microsystèmes MEMS et capteurs.....	3
I. Introduction	3
II. Les microsystèmes électromécaniques (MEMS)	3
1. Introduction	3
2. Définition d'un MEMS.....	6
3. L'intérêt de l'intégration	7
4. Les dimensions	7
5. Le matériau utilisé	8
6. Pourquoi la miniaturisation.....	9
7. La classification des MEMS	10
8. Domaines d'applications de MEMS	10
1. Les capteurs	10
2. Les MEMS RF.....	12
3. Les BioMEMS.....	14
III. Les capteurs	18
III.1 Généralités et définitions.....	18
1. Mesurande	18
2. Capteur	18
2.1 Chaîne de mesure.....	19
2.2 Types de grandeur physique	20
2.3 Etalonnage des capteurs	20
2.4 Classification des capteurs.....	21
1. Capteurs passifs.....	21
2. Capteurs actifs	22
a. Thermoélectricité	23
b. Pyroélectricité	23
c. Piézoélectricité	23
d. Induction	23
e. Photoélectricité.....	24
f. Effet Hall	24
2.5 Caractéristiques d'un capteur : définition métrologique	24
1. Limites d'utilisation des capteurs	25
a. Domaine nominale d'emploi (ou domaine normal)	25
b. Domaine de non- détérioration.....	25
c. Domaine de détérioration (non-destruction)	25
2. Étendue de la mesure (E.M)	25
3. Seuil	25
4. Hystérésis	25
5. Résolution	26
6. Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur	26
7. Sensibilité	26
8. Finesse	27
9. Linéarité	27

10. Rapidité - Temps de réponse	28
11. Erreurs de mesure	28
a) Erreurs systématiques (qui entachent chaque mesure)	28
b) Erreurs accidentelles ou aléatoires (qui n'entachent pas chaque mesure).....	28
12. Caractéristiques statistiques d'un capteur.....	29
1. Fidélité.....	29
2. Justesse	29
3. Précision	29
2.6 Conditionneur associé	30
1. Capteurs actifs	30
1.1 Type source de tension	30
1.2 Type source de courant	31
1.3 Type source de charge.....	31
2. Capteurs passifs.....	32
II.2 Différents types des capteurs.....	33
1. Capteurs d'accélération	33
2. Capteurs d'humidité	33
3. Capteurs de position.....	33
4. Capteurs de température.....	33
5. Capteurs de pression.....	33
II.3 Différentes détections des capteurs	34
1. Détection résistive.....	34
2. Détection capacitive.....	34
3. Détection inductive.....	34
4. Détection piézoélectrique.....	34
5. Détection piézorésistive.....	34

Chapitre 2 : Accéléromètre piézorésistif et technologies de micro-usinage des MEMS...35

I. Introduction.....	35
II. Technologies de micro-usinage des MEMS	36
II.1 Micro-usinage en surface (ou surface micromachining)	36
II.2 Le micro-usinage en volume (bulk micromachining)	37
1. Gravure en volume sèche.....	37
2. Gravure en volume humide.....	37
2.1. Gravure isotrope.....	37
2.2 Gravure anisotrope.....	38
III. Accéléromètre piézorésistif.....	39
III.1. Principe général	39
III.2. Principales caractéristiques métrologiques	39
II.3. Les jauges piézorésistives	40
1. Définition.....	40
2. Principe général	40
III.4. La détection piézorésistive	41
III.5. Comparaison avec les autres types d'accéléromètres	42
III.5.1. Avantages des accéléromètres piézorésistifs	42
III.5.2. Inconvénients des accéléromètres piézorésistifs	43

Chapitre 3 : La théorie de la piézorésistivité.....44

I. Introduction	44
II. Notion de résistivité électrique	44
III. Relation entre contrainte et déformation- loi de Hooke	45
III.1 Définitions	45
1. Élasticité	45
2. Limite élastique	45
3. Module de Young (élasticité)	45
4. Plasticité	45
III.2 Loi de Hooke	46
1. Allongement.....	46
2. Cisaillement	47
III.3 Généralisation de la Loi de Hooke -Tenseur d'élasticité-	47
VI. La piézorésistivité dans le cas du silicium monocristallin	50
1. Coefficients piézorésistifs	50
2. Facteurs de jauge.....	54
2.1. Facteurs de jauge dans le cas des contraintes triaxiales.....	55
2.2. Facteurs de jauge dans le cas des contraintes planes	56
2.3. Facteurs de jauge dans le cas des contraintes uniaxiales.....	57
a. Cas des contraintes longitudinales.....	57
b. Cas des contraintes transversales.....	58
V. La piézorésistivité dans le silicium polycristallin	58

Chapitre 4 : Etude et simulation d'un accéléromètre à détection piézorésistive60

I. Introduction	60
II. Etude de la structure proposée	60
II.1 Comportement statique de la structure.....	60
1. Structure proposée	60
2. Les paramètres de conception.....	61
II.2 Principe de fonctionnement.....	63
III. Simulation et l'étude de sensibilité à l'aide du logiciel ANSYS.....	65
III.1 Simulation	65
IV.2 Etude de la sensibilité.....	67
Conclusion générale	70
Annexe A.....	71
Annexe B.....	75
Annexe C.....	78
Références bibliographiques	81

Liste des figures :

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Dr. Richard. Feynman.....	4
Figure 1.2 : Miniaturisation d'un accéléromètre (Motorola) utilise dans les systèmes déclencheurs d'AIRBAG.....	6
Figure 1.3 : Système mono-bloque ou composé (technologies hybride et monolithique).....	7
Figure 1.4 : Les dimensions de MEMS	8
Figure 1.5 : Représentation schématique des structures (a) cristalline, (b) poly cristalline, et (c) amorphe d'un matériau	9
Figure 1.6 : Domaines des MEMS- Exemples.....	10
Figure 1.7 : Gonflable de l'airbag d'automobile pour coussins	11
Figure 1.8 : Microsystèmes dans l'environnement d'automobile (Airbag Pneumatique, Anticollision, Gestion boîte, Injection)	12
Figure 1.9 : Exemple de capacité variable à plaques parallèles.....	13
Figure 1.10 : Exemples de micro-interrupteurs (micro-commutateurs) mécaniques (Switch RF).....	13
Figure 1.11: Biopuce à ADN.....	14
Figure 1.12 : Distributeur d'insuline	15
Figure 1.13 : Environnement Biomédical (Distributeur d'insuline, Biopuce à ADN, micro-pompe, prothèses auditives, surveillance en utilisant pacemaker)	15
Figure 1.14: Exempels de micromiroir inclinable (tournante)	16
Figure 1.15: Matrices 256 voies (16x16 miroirs) commercialisées.....	16
Figure 1.16 : Le système de projection d'images de Texas-Instruments (1995).....	16
Figure 1.17 : Principe d'un capteur	19
Figure 1.18 : Structure d'une chaine de mesure.....	20
Figure 1.19 : Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse du capteur	21
Figure 1.20 : Schéma fonctionnel du capteur passif.....	21
Figure 1.21: Schéma fonctionnel d'un capteur actif	22
Figure 1.22 : Thermoélectricité et pyroélectricité	23
Figure 1.23 : Piézoélectricité et induction	24
Figure 1.24 : Photoélectricité et effet Hall	24
Figure 1.25 : Courbe typique d'hystérésis.....	26
Figure 1.26 : Exemple de linéarisation de caractéristiques	27
Figure 1.27 : Modèle du capteur source de tension	30
Figure 1.28 : Exemple de conditionneur	30
Figure 1.29 : Modèle du capteur type source de courant	31
Figure 1.30 : Convertisseur courant tension	31
Figure 1.31: Modèle du capteur type source de charge	31
Figure 1.32 : Amplificateur de charge	32
Figure 1.33 : Modèle du montage potentiométrique	32
Figure 1.34 : Montage en pont	32
Figure 1.35 : Schéma de principe des capteurs de pression	33

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Principe de la gravure en surface37
Figure 2.2 : Exemple de cavité obtenue par gravure isotrope38
Figure 2.3: Exemple de cavité obtenue par gravure anisotrope..... 39
Figure 2.4 : Principe de fonctionnement d'un accéléromètre à détection piézorésistive42

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Allongement (déformation) sous contraintes uni-axiales46
Figure 3.2: Déformation en cisaillement47
Figure 3.3 : Expression du tenseur d'élasticité pour un cube symétrique50
Figure 3.4: Système d'axes utilisé pour le calcul de la résistance électrique des jauges de contrainte54
Figure 3.5: Cas des contraintes longitudinales applicables au cas d'une poutre57
Figure 3.6: Cas des contraintes transversales applicables au cas d'une poutre58

Chapitre 4 :

Figure 4.1 : Structure de l'accéléromètre61
Figure 4.2 : Schéma simplifié a) Application de la force dans un couple de poutres b) Schéma de la déformation des poutres61
Figure 4.3 : Contraintes dans une des poutres 62
Figure 4.4 : Implantation des jauges de contrainte63
Figure 4.5 : La génération du maillage pour la méthode FEM65
Figure 4.6 : La distribution des contraintes dans les micropoutres dans le cas d'une accélération de 1g suivant z..... 66
Figure 4.7 : Déformation de la structure causée par une accélération de 1g suivant z 66
Figure 4.8 : Déplacement causé par l'accélération de 1g suivant z..... 67
Figure 4.9 : Montage de conditionnement : Pont de Wheatstone complet pour calculer la tension de sortie..... 68
Figure 4.10 : Sensibilité en fonction de l'accélération suivante z69
Figure 4.11 : Tension de sortie en fonction de l'accélération suivante z 69

Annexe A :

Figure A.1 : Principe de l'accéléromètre à détection capacitive..... 71
Figure A.2: Exemple d'accéléromètre trois axes à détection piézoélectrique (a) vue de dessus de la structure, (b) accélération verticale, (c) accélération latérale72
Figure A.3 : Accéléromètre à détection thermique74

Annexe B :

Figure B.1 : Définition des contraintes75
Figure B.2 : Définition des composantes du tenseur des contraintes mécaniques..... 76
Figure B.3 : Déformation d'un matériau sous contrainte uni-axiale76
Figure B.4 : Déformation en cisaillement77

Annexe C :

Figure C.1 : Types de jauges métalliques : a) jauge à fil ; b) jauge à trame pelliculaire79

Liste des tableaux :

Chapitre 1 :

Tableau 1.1 : Historique de MEMS..... 5
Tableau 1.2 : Domaines d’application des MEMS17
Tableau 1.3 : Effets utilisés pour les capteurs passifs22
Tableau 1.4 : Effets utilisés pour les capteurs actifs23

Chapitre 3 :

Tableau 3.1: Coefficients piézorésistifs pour le silicium monocristallin..... 52
Tableau 3.2 : Coefficients longitudinal et transversal pour différentes directions54
Tableau 3.3: Facteurs de jauge piézorésistifs uni-axiaux dans le cas du poly-silicium pour deux types de dopage différents59

Chapitre 4 :

Tableau 4.1: Dimensions des paramètres de la structure61

Liste des notations utilisées :

- s : grandeur électrique de sortie.
 m : grandeur physique d'entrée (mesurande).
 U_H : différence de potentiel.
 K_H : constant qui dépend du matériau et des dimensions.
 I : courant électrique.
 B : induction.
 θ : angle entre I et B .
 S : sensibilité du capteur.
 ζ : coefficient d'amortissement.
 $t_r (\varepsilon\%)$: temps de repense dans un écart ε .
 $\langle m \rangle$: valeur moyenne.
 σ : écart type.
 R : résistance électrique.
 ρ : résistivité du matériau.
 L : longueur du matériau.
 S : surface du matériau.
 C : capacité du condensateur
 S : surface de la plaque.
 d : distance entre les deux plaques.
 ε_d : perméabilité diélectrique.
 V : tension électrique aux bornes du fil.
 R : résistance du fil.
 \vec{E} : champ électrique.
 \vec{J} : densité de courant.
 ε : déformation.
 ΔL : allongement spécifique.
 Δd : contraction latérale.
 $\varepsilon_{//}$: déformation parallèle.
 E : module de Young.
 σ : contrainte normale.
 ε_{\perp} : déformation perpendiculaire.
 ν : coefficient de Poisson.
 τ : contrainte en cisaillement.
 γ : déformation en cisaillement.
 G : module en cisaillement (COULOMB).
 σ_{ij} : tenseur des contraintes.
 C_{ijkl} : coefficients du tenseur d'élasticité.
 ε_{kl} : tenseur des déformations.
 S_{ijkl} : coefficients du tenseur inverse (matrice souple).
 ΔR : variation de la résistance des jauges.
 $\Delta \rho$: variation de la résistivité.
 ΔL : déformation du barreau en longueur.
 Δl : déformation du barreau en largeur.

- Δe : déformation du barreau en épaisseur.
 G_l : facteur de jauge longitudinal.
 ε_l : déformation longitudinal
 G_t : facteur de jauge transversal.
 ε_t : déformation transversal.
 μ : mobilité des porteurs de charge.
 μ_n : mobilité des électrons.
 μ_p : mobilité des trous.
 q : charge d'un porteur de charge
 τ : temps libre moyen entre deux collisions de porteurs.
 m^* : masse effective d'un porteur dans un réseau cristalline.
 n : concentration des électrons.
 p : concentration des trous.
 π : coefficient piézorésistif.
 $\langle \pi_l \rangle$: coefficients piézorésistifs longitudinal en moyenne.
 $\langle \pi_t \rangle$: coefficients piézorésistifs transversal en moyenne.
 $\langle G_l \rangle$: facteurs de jauge longitudinale.
 $\langle G_t \rangle$: facteurs de jauge transversale.
 I : moment quadratique.
 M_f : moment de flexion.
 σ_{yy} : contrainte à la surface de la poutre à la distance y du bâti.
 F : force.
 $\varepsilon_{//}$: déformation à la surface de la poutre à la distance y du bâti.
 m : masse.
 a : accélération.
 z_{\max} : flèche maximale prise par les poutres.
 ρ_s : masse par unité de surface.
 d_i : densité du poly-silicium.
 S : la sensibilité électronique.
 V_{mes} : la tension de sortie du pont.
 $\frac{\Delta R_i}{R_i}$: la sensibilité du capteur.
 V_g : la tension d'entrée.
 z : déplacement.
 $P - \Delta R_j i$: résistance de la piézorésistance de type P de position i .
 $N - \Delta R_j i$: résistance de la piézorésistance de type N de position i .
 ΔR_i : variation de résistance de la piézorésistance dans la position i .

Acronymes utilisés:

- MEMS : Micro-Electro-Mechanical System.
CI : Circuit Intégré.

- IR : Infra Rouge.
RF MEMS : Radio Frequency MEMS.
BioMEMS : Biomedical MEMS.
MOEMS : Micro-Opto-Electro-Mechanical System.
ADN : Acide DésoxyriboNucléique.
FEM : Finite Element Method.
FEA : Finite Element Analysis.

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Un MEMS (Micro Electro Mechanical System ou système microélectromécanique) est un système microélectronique composé d'éléments électroniques analogiques et numériques mais aussi d'éléments électromécaniques destinés à assurer des fonctions de capteurs ou d'actionneurs. Les MEMS (aussi désignés sous l'appellation de Microsystèmes en Europe ou Micromachines au Japon) sont utilisés notamment dans les domaines de la microélectronique, de la microbiologie, de la microrobotique, de la micromécanique, de la microfluidique, du micromagnétisme, de la microthermique, de la microoptique, ou de la microchimie. Les différents secteurs économiques concernés sont ceux de l'automobile, du spatial, de l'aéronautique, de la domotique, de la santé, de la biologie, de la chimie, de l'agroalimentaire, de l'environnement, etc.... L'utilisation du silicium comme matériau de base permet la réalisation de microsystèmes par l'intégration sur une puce de microactionneurs et de microcapteurs avec le traitement du signal associé.

Les systèmes microélectromécanique se décrivent assez bien par leur nom : le terme « Micro » se réfère à la taille (d'un micromètre à un millimètre), « Electro » annonce que l'électronique est impliquée et « mécanique » que des parties mobiles y sont incluses.

Un des premiers microsystèmes à avoir été développé et industrialisé est le microaccéléromètre. Les accéléromètres ont le deuxième plus grand volume de vente après les capteurs de pression. Ils utilisés sont réalisés à partir des techniques de microusinage. Ils doivent avoir de petites dimensions et être disponibles en gros volume de production. On les trouve, principalement, dans l'industrie automobile, dans des applications biomédicales, l'électroménager, la robotique, les systèmes d'analyse des vibrations, les systèmes de navigation etc.... Il existe différentes techniques pour transformer l'action de l'accélération en signal électrique. Ces techniques sont basées sur des principes capacitifs, piézorésistifs, piézoélectriques etc....

Dans notre étude, nous avons choisi la transduction piézorésistive pour convertir l'accélération vers un signal électrique à cause de linéarité dans la courbe d'étalonnage, facile à réaliser, l'existence de logiciel ANSYS dans laboratoire.

Les accéléromètres à piézorésistance consistent en un substrat micro-usiné, comprenant une masse sismique suspendue par une ou plusieurs poutres de flexion en silicium. Les poutres comportent des piézorésistances qui afin de fournir un signal maximal sont placées sur les côtés des poutres.

La structure étudiée a été analysée par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS. La méthode des éléments finis FEM (Finite Element Method) est appliquée pour effectuer des analyses sur la distribution des contraintes dans les micropoutres en flexion.

Le travail présenté dans ce mémoire décrit l'étude, simulation et l'optimisation d'un micro-accéléromètre à détection piézorésistif. Ce manuscrit est constitué de quatre chapitres. Il est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, Nous établirons un bilan sur les microsystèmes. Nous citerons ainsi quelques exemples d'application. Nous dresserons ensuite un état de l'art sur les capteurs et leurs caractéristiques.

Dans le second chapitre, on va décrire les technologies de micro usinage des microsystèmes compatibles avec les techniques classiques de la microélectronique. Ainsi, nous présentons de l'accéléromètre piézorésistif en expliquant la détection piézorésistif.

Dans le troisième chapitre, nous établirons la notion de résistivité ainsi la relation entre la contrainte et la déformation. Nous étudierons ensuite la théorie de la piézorésistivité du silicium polycristallin constituant les jauges de contraintes. Ces dernières seront montées en pont de Wheatstone avec des résistances de mêmes valeurs. Nous déterminerons ensuite les différents coefficients piézorésistifs des différentes jauges suivant leur orientation.

Dans le quatrième chapitre, on étudie un accéléromètre à détection piézorésistive. Une structure proposée est constituée d'une masse sismique lourde suspendue par quatre micropoutres longues. Ceci va permettre d'obtenir des sensibilités importantes. Cette structure sera étudiée et modélisée par la méthode des éléments finis sous ANSYS pour optimiser les localisations des jauges de contraintes et séparer chaque composante d'accélération par des circuits en pont de Wheatstone complets.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES MICROSYSTEMES MEMS ET CAPTEURS

I. Introduction :

L'industrie de la microélectronique augmente sans cesse la densité d'intégration de transistors par puce, dans le but d'améliorer les performances des circuits intégrés. La loi de Moore énoncée en 1965 par Gordon Moore, ingénieur de Fairchild Semiconductor (cofondateur d'Intel) [1], indiquait que la densité d'intégration sur silicium doublerait tous les 18 mois, ce qui implique la réduction de taille des transistors. A ce jour, cette prédiction s'est révélée exacte, avec conséquences par l'apparition sur le marché de systèmes électroniques de moins en moins coûteux et de plus en plus performants. Cette évolution quasi-exponentielle est le fruit de progrès fulgurants de la recherche en microélectronique tant aux niveaux des procédés, des techniques de conception que des architectures. Cependant des limites technologiques semblent se profiler à l'horizon comme la finesse de la gravure, l'interconnexion, la densité de composants.

Depuis l'apparition du premier transistor en 1947, et du premier circuit intégré inventé en 1958 par Jack Kilby (Ingénieur à Texas Instrument), les technologies n'ont cessé d'évoluer, et placent aujourd'hui l'industrie du semi-conducteur au premier plan du marché de l'électronique. Les technologies silicium comme les technologies CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor) ont été très largement instaurées, et représentent aujourd'hui environ 75% du marché du semi-conducteur. Cette évolution est largement cofinancée par l'explosion de la micro-informatique, des multimédias et systèmes de communication pour qui les besoins sont de plus en plus grands en termes de performances.

Actuellement, en exploitant les propriétés électriques et mécaniques des semi-conducteurs, nous avons été conduits à concevoir des dispositifs capables d'explorer tout ce qui nous entoure et de mesurer tous les phénomènes physiques de l'univers. Ces nouveaux dispositifs composés d'une partie électrique et d'une partie mécanique ou autre, est appelée microsysteme.

La conception des microsystemes requiert des compétences multidisciplinaires nécessitant la collaboration de plusieurs groupes de différentes spécialités. Ces groupes ont leurs propres méthodologies de travail et leurs langages de modélisations qui sont spécifiques à un domaine particulier.

II. Les microsystemes électromécaniques (MEMS) :

1. Introduction :

En 1959 lors d'une présentation durant le meeting annuel de la société américaine de la physique au CALTECH, Richard Feynman (1918-1988) (figure 1.16) a dit : « There's Plenty of Room at the Bottom », que l'on peut interpréter par : Il y a plein d'espace en bas de l'échelle, Feynman voulait attirer l'attention sur l'intérêt de la miniaturisation, non pas en terme de taille ou de volume, mais sur le fait que la miniaturisation d'un système rend possible la multiplication des fonctions réalisées par ce système ou de la quantité d'informations stockée par ce dernier.



Figure 1.1 : Dr. Richard. Feynman [2].

C'est Richard Feynman qui parla le premier de micromachines et qui comprit leur intérêt et les problèmes soulevés par la physique et la mécanique des petites dimensions. C'est quelques années après l'apparition des premiers circuits intégrés en 1958, par le récent Prix Nobel Jack Kilby, [1] que l'on découvrit la possibilité de fabriquer des structures mécaniques avec des technologies dérivées de la microélectronique et notamment la lithographie et le dépôt de couches minces. Ces technologies de fabrication permettront de concevoir, simuler, fabriquer, assembler et tester des structures de l'ordre du micromètre.

Les développements de la micromécanique ont été motivés par le fait que les matériaux de la microélectronique comme le silicium et le poly-silicium possédaient des propriétés mécaniques intéressantes pour les applications visées. En effet, le silicium et le polysilicium ont des modules d'Young très élevés (respectivement 160 et 169 GPa) et ils fonctionnent le plus souvent dans le domaine élastique et non plastique (pas d'hystérésis).

L'évolution des microsystemes dans l'histoire de la microélectronique est largement développée. L'historique des microsystemes est très important, le tableau (1.1) suivant est illustré le chemin de la réalisation des microsystemes :

Tableau 1.1 : Historique de MEMS.

1750	Moteur électrostatique (Benjamin Franklin, Andrew Gordon)
1824	Découverte du silicium (Berzelius)
1927	Brevet sur le transistor (Lilienfield)
1947	invention du transistor (En germanium!)
1954	Smith, C.S., "Piezoresistive effect in Germanium and Silicon, Physical Review, 94.1, April 1954 -> Premier article sur un capteur à base de semi conducteur
1958	Jauges d'élongation en silicium disponibles commercialement
1961	Démonstration du premier capteur de pression en silicium (Kulite)
1967	Invention du micro usinage de surface (Nathanson, 'Resonant Gate Transistor')
1970	Démonstration du premier accéléromètre en silicium (Kulite)
1977	Premier capteur de pression capacitif (Stanford)
1980	Petersen, K.E., "Silicon Torsional Scanning Mirror", IBM J. R&D, v24, p631, 1980
1982	Capteur de pression sanguine jetable (Foxboro/ICT, Honeywell, \$40)
1982	Traitement du signal intégré à une puce MEMS
1984	Premier MEMS en Polysilicium (Howe, Muller)
1988	Micro moteur rotatif à entraînement électrostatique latéral (Fan, Tai, Muller)
1989	Actionneur 'comb drive' (Tang, Nguyen, Howe)
1991	Articulation en polysilicium (Pister, Judy, Burgett, Fearing)
1992	Réseau de diffraction optique (Solgaard, Sandejas, Bloom)
1992	Démarrage de la fonderie MCNC avec le procédé 'MUMPS' (www.memsrus.com)
1993	Commercialisation du premier accéléromètre fabriqué par micro usinage de surface (Analog Devices, ADXL50)
1993	Premier micro commutateur hautes frequences (Northeastern Univ. Analog Devices)
1993	Premières capacités variables (Hughes puis Raytheon)
1995	Premier micro commutateur capacitif (Raytheon)
1998	Première de Star Wars (utilisation des Digital Micromirror Device de Texas Instruments)

Enfin, les premiers microsystèmes intégrés avec l'électronique (Figure 1.22), appaurent vers les années 1980, [1] dans le cas des capteurs de pression. Les années 1990 virent ensuite l'explosion des applications industrielles et l'apparition de technologies standardisées utilisées pour différentes applications. Puis, ce fut l'intégration monolithique avec l'électronique et l'apparition des premiers outils de CAO. C'est dans les années 90 également qu'appaurent les initiatives telles que la fabrication multiutilisateurs, qui permirent l'accès à faible coût à ces technologies.

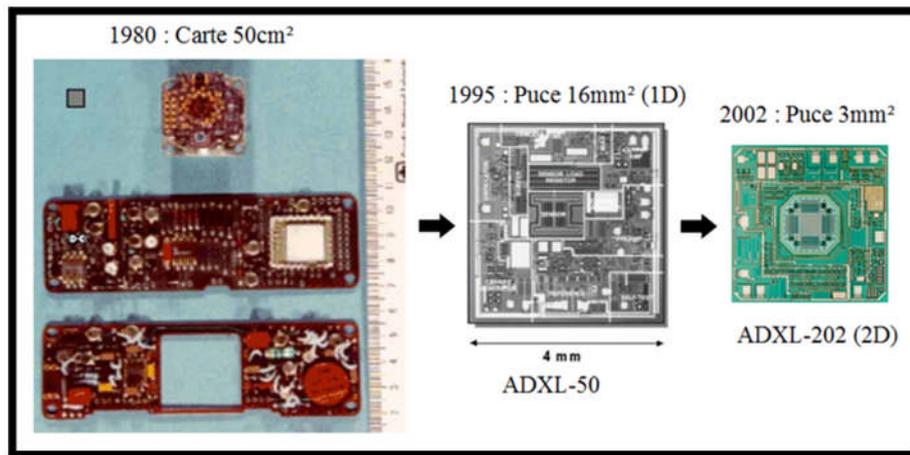


Figure 1.2 : Miniaturisation d'un accéléromètre (Motorola) utilisé dans les systèmes déclencheurs d'AIRBAG [3].

2. Définition d'un MEMS :

Le MEMS représente des systèmes microélectromécanique et ont été inventés aux Etats-Unis vers la fin des années 80. La dénomination « MEMS » provient de l'abréviation anglaise de « Micro-Electro-Mechanical Systems » (système micro-électro-mécanique). Sous cette abréviation, il y a trois définitions relativement différentes :

➤ Définition américaine (MEMS) :

Le terme MEMS (Micro Electro Mechanical System) est plus utilisé que le terme MICROSYSTEME. Il s'agit d'un micro dispositif ou d'un système intégré qui combine **des composants électriques ou mécaniques** fabriqués avec les techniques des CI et qui varient en taille du micromètre au millimètre. Ces systèmes réunissent le traitement de l'information avec la capture et l'action afin de pouvoir changer la façon avec laquelle on perçoit et on contrôle le monde physique.

➤ Définition européenne (MST) :

Les microsystemes, d'après la définition européenne, sont des systèmes miniaturisés intelligents qui combinent de manière monolithique ou non des capteurs et des actionneurs à des fonctions de traitement du signal et de l'information.

➤ Définition japonaise :

Au Japon l'accent est donné aux **Micromachines** (ou Micromechatronics) qui sont composées d'éléments fonctionnels de la taille de quelques millimètres et capables de réaliser des opérations microscopiques complexes.

On appelle MICROSYSTEME, un système de taille micronique fabriqué selon les procédés collectifs intégrant un capteur et/ou actionneur et circuit de traitement de signal.

On utilise le terme microcapteurs intégrés ou intelligents pour les microcapteurs intégrant le traitement signal.

On parle l'intégration monolithique lorsque la compatibilité entre les différentes technologies permet la fabrication sur le même substrat(Si). Elle est dite hybride si les différentes fonctions sont réalisées sur des substrats séparés et assemblés en fin de processus.

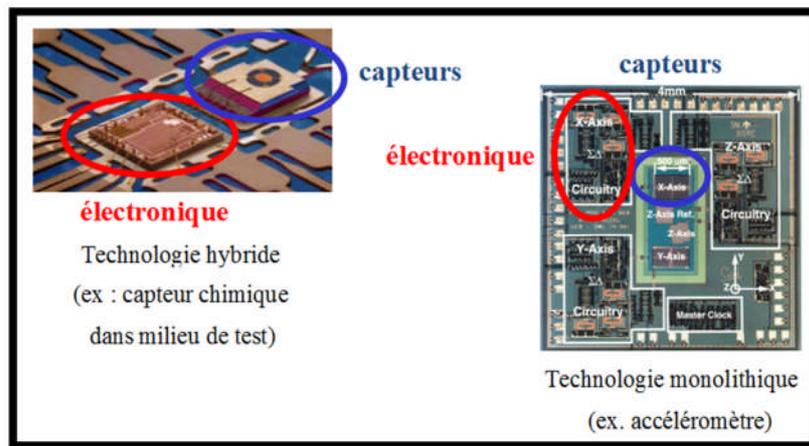


Figure 1.3 : Système mono-bloque ou composé (technologies hybride et monolithique) [4].

3. L'intérêt de l'intégration :

On intègre des fonctions dans le MEMS pour les intérêts suivants [5]:

- Augmenter la rapidité.
- Réduire le bruit (Filtrage, adaptation d'impédance, modulations ...).
- Diminution des distances « capteurs –électronique ».
- Intégration du conditionneur de capteurs passifs.
- Intégration du conditionneur du signal (linéarisation, contre-réaction etc.).
- Conversion analogique / numérique.
- Enregistrements.
- Communications.
- Gestion de l'affichage.
- Implémentation de capteurs sur le même « chip » (élimination des grandeurs d'influence).
- Intégration de dispositifs de régulation (ex : régulation de T°).
- Auto calibrage (prise en compte du vieillissement etc.).
- Autotests de fonctionnement.

4. Les dimensions :

En pratique, un microsystème est un système de dimensions micromètres (proche de micromètre) vers centimètres (figure 1.4) :

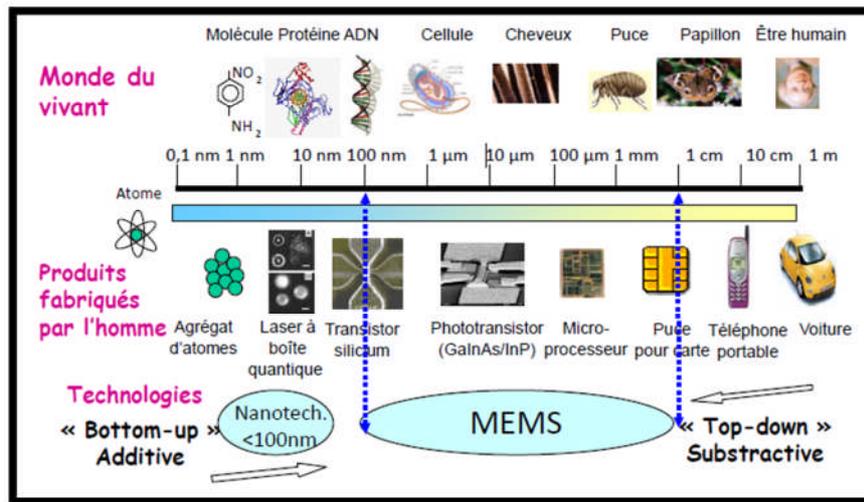


Figure 1.4 : Les dimensions de MEMS [4].

5. Le matériau utilisé :

Le SILICIUM est le matériau le plus utilisé pour la fabrication des microsystèmes. Il est parmi les éléments les plus abondants sur la terre et peut être facilement obtenu à partir du sable raffiné pour produire à la fin un silicium de pureté 99,99999999% [6]. Il a permis d'innover et explorer de nouveaux domaines d'application dans la fabrication des circuits intégrés. Il devient évident que le silicium est la plate-forme appropriée sur laquelle les composants électroniques, mécaniques, thermiques, optiques, et même les fonctions de dynamique des fluides peuvent être intégrées.

L'utilisation de Silicium très importants dans les Technologies de MEMS parce que :

- Très répandu (fabrication de CI) ;
- Très grande pureté (99,99999999%) ;
- Facilement micro usiné.
- Fortement piézorésistif.
- Semi-conducteur (l'intégration des fonctions capteurs et actionneurs avec l'électronique associée).
- Très bonnes propriétés électriques (bonne conducteur).
- Très bonnes propriétés mécaniques :
 - Propriétés élastiques limité : 7 GPa.
 - Module d'Young : 160 GPa.
 - Déformation plastique (irréversible) jusqu'à $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - Propriétés mécaniques indépendantes du dopage jusqu'à 10^{20} cm^{-3} .
 - Matériau stable.
- Propriétés optiques :
 - Transparent aux IR.
 - Pour une épaisseur $< 0,4\text{ }\mu\text{m}$, il reflète 60% de la lumière incidente.
- Propriétés biologiques :
 - Il ne contient pas des substances toxiques.
 - Bénin pour le corps humain.

Le silicium possède une structure cubique faces centrées et une bande interdite de 1,1eV, et d'ailleurs, comme la plupart des matériaux semi-conducteurs il peut être dopé avec des impuretés pour modifier sa conductivité [7]. Mécaniquement, le silicium cristallin est un matériau dur et fragile qu'il se déforme élastiquement lorsque atteindre sa limite d'élasticité, à ce point il se casse. L'élément silicium existe sous trois formes différentes: monocristalline, poly cristalline ou amorphe (Figure 1.5) [6].

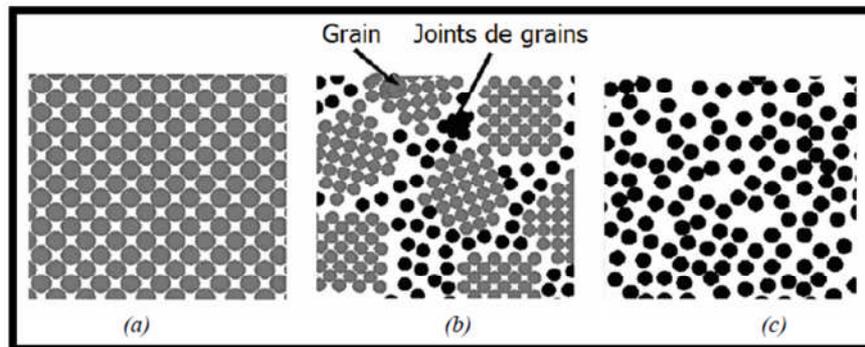


Figure 1.5 : Représentation schématique des structures (a) cristalline, (b) poly cristalline, et (c) amorphe d'un matériau [6].

Le silicium monocristallin est une structure atomique tridimensionnelle de même orientation cristallographique (le grain) qu'il est d'usage pour fabriquer des substrats circulaires (de diamètre de 100 mm à 300 mm et l'épaisseur de 525 μ m à 650 μ m). Ces atomes occupent des emplacements spécifiques et ordonnés dans une maille de treillis [6].

Le silicium polycristallin et le silicium amorphe sont déposés comme des couches minces (une épaisseur typique inférieure à 5 μ m). Dans un matériau poly cristallin, l'orientation du réseau n'est pas la même dans tout le matériau. Les grains sont séparés par des joints de grains, qui sont des zones dans lesquelles le réseau cristallin est "perturbé" puisqu'il s'agit d'une transition entre deux orientations.

Dans la fabrication des microsystemes, on ne utilise pas le silicium seulement mais aussi d'autre comme métaux (Al, Au, Cu, Ni, Ti Ni, Ni Fe...), isolants (SiO₂, Si₃N₄...), polymères, céramiques, etc.

6. Pourquoi la miniaturisation :

- Réduction de la taille et du poids.
- Réduction de la consommation énergétique.
- Amélioration des performances (vitesse, sensibilité...).
- Production collective de composants individuels.
- Réduction des coûts.
- Nouvelles propriétés et fonctionnalités.
- Motivations scientifiques: explorer des 'objets' plus petits.
- Prédominance de certains phénomènes physiques.
- Fréquences de fonctionnement et largeur de bande élevées.
- Grande fiabilité mécanique.
- Constantes de temps thermiques faibles.

7. La classification des MEMS :

Plusieurs paramètres utilisés pour classer les MEMS qu'ils sont :

- Suivant la grandeur physique à mesurer.
- Suivant le système de traitement de l'information.
- Suivant le principe physique exploité.
- Suivant l'application.
- Suivant la complexité.
- Suivant l'énergie du signal considéré.

8. Domaines d'applications de MEMS :

Les microsystemes électromécaniques ou MEMS sont des composants qui interagissent avec leur environnement principalement grâce à leurs fonctions de déformation mécanique [8]. Les dispositifs MEMS font aujourd'hui l'objet d'un effort de recherche et d'industrialisation très important. Il en résulte une explosion des applications dans de multiples domaines (micro-optique, microcalorimétrie, micromécanique, micro-magnétisme, microélectronique, micro-fluidique, chimie, biochimie, etc.).

On distingue plusieurs familles de MEMS, dont les plus importantes sont [8]:

- Les Microsystemes : capteurs ou actionneurs,
- Les MOEMS : MEMS optiques,
- Les MEMS RF : applications radio et hyper fréquences (RF et HF),
- Les BioMEMS : développés pour la médecine et la biologie.

La Figure (1.6) donne pour chaque domaine quelques exemples d'applications.

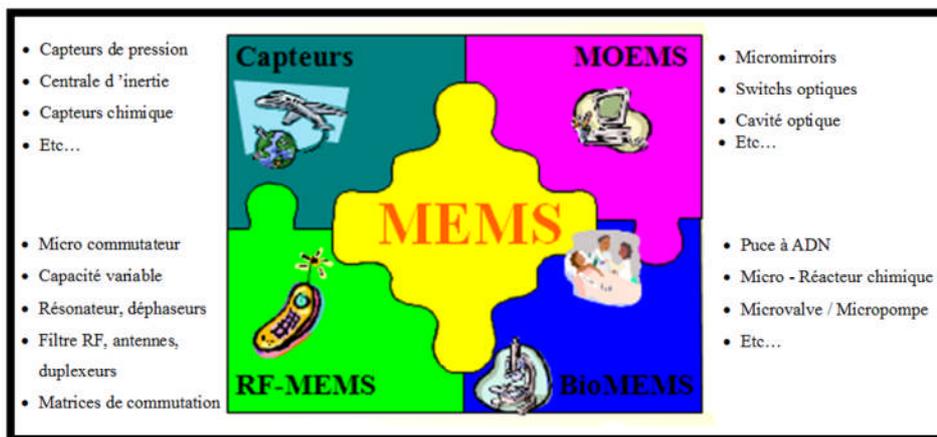


Figure 1.6 : Domaines des MEMS- Exemples [3].

1. Les capteurs :

Les capteurs offrent aux dispositifs MEMS un vaste domaine d'applications. De nombreux composants, intégrés de manière monolithique au sein de circuits intégrés et entièrement encapsulés, ont été ainsi fabriqués. Ainsi, ces structures permettent de réaliser des gyroscopes, des capteurs de position, des capteurs de pression, des capteurs biologiques, des capteurs de température ou encore des capteurs de concentration de gaz.

L'accéléromètre AD-XL50 produit par Analog Devices qui est utilisé pour déclencher le gonflage des airbags des automobiles en cas de choc brutal (figure 1.7).

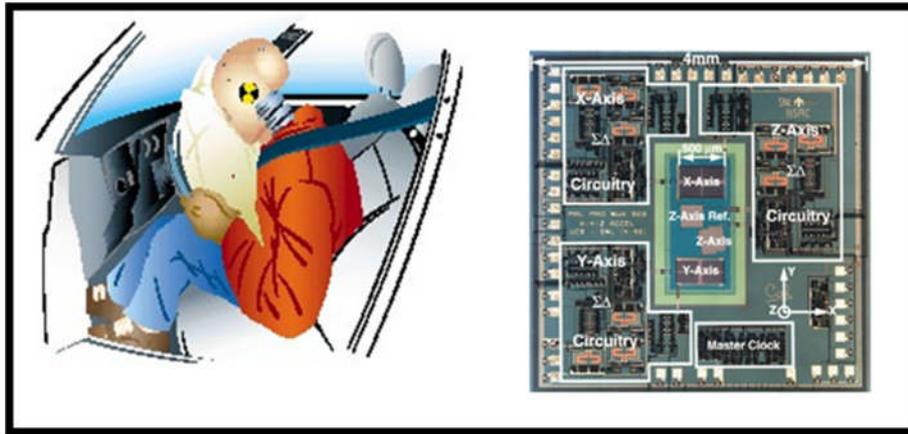


Figure 1.7 : Gonflable de l'airbag d'automobile pour coussins [4].

Les applications automobiles profitent quant à elles des avantages des microsystèmes en termes de coût, d'intégration, de miniaturisation et également de communication sans fil, rendant possible une interrogation du MEMS à distance (cas des capteurs de pression avec communication radiofréquence). Les microsystèmes permettent alors la multiplication des capteurs et des systèmes de mesures dans tous sous-ensembles de la voiture tels que :

- La sécurité : déclencheuse d'airbag avec les accéléromètres, détection de crevaison, les capteurs de pression télé interrogés dans les pneus, les systèmes optiques intelligents, les systèmes anticollision (scanner), etc.
- Gestion châssis : les systèmes d'anti-patinage avec l'emploi de gyroscopes, les suspensions actives avec l'intégration dans les essieux de centrales inertielles et les inclinomètres, etc.
- Moteur et boîte : pression d'air injection, contrôle échappement avec les capteurs de gaz (CO, CO₂...), qualité d'huile, contrôle boîte auto, etc.
- Habitacle et communication : climatisation, antivols, systèmes de guidage, etc.

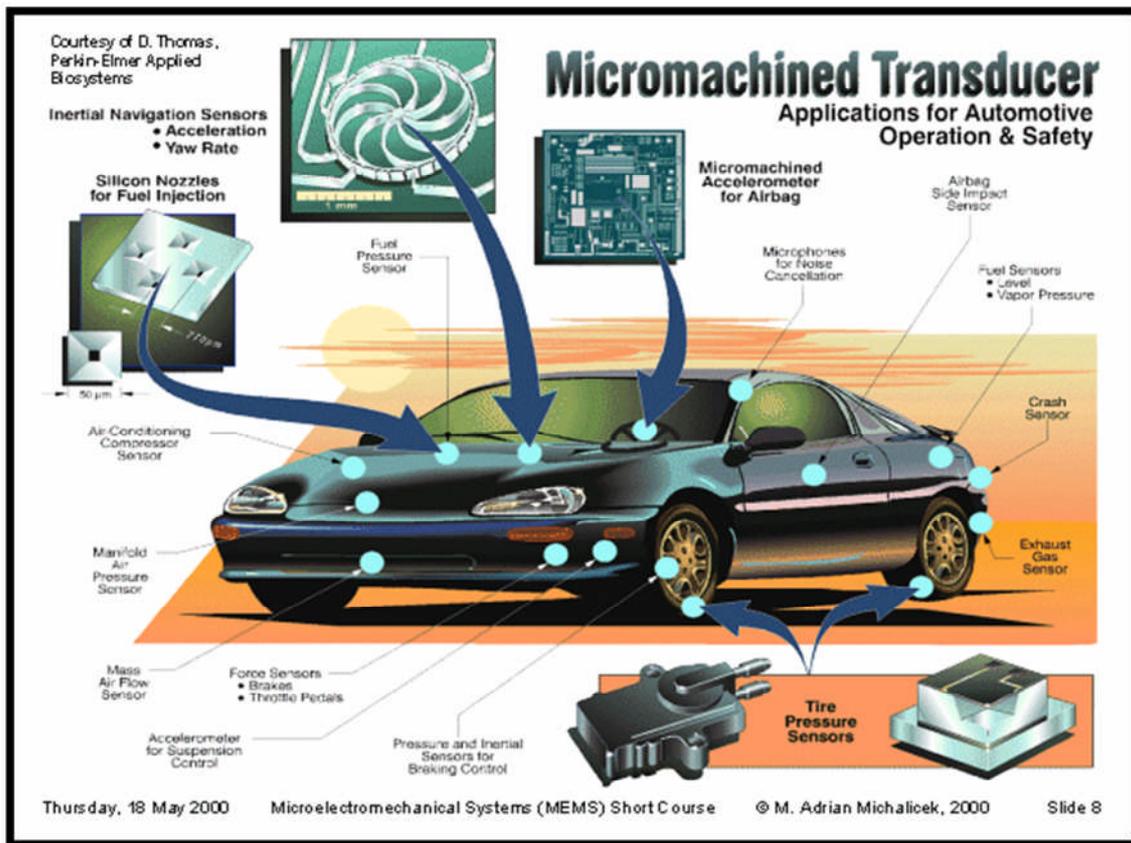


Figure 1.8 : Microsystèmes dans l'environnement d'automobile (Airbag Pneumatique, Anticollision, Gestion boîte, Injection) [4].

Les MEMS font désormais partie intégrante des systèmes automobiles ou ils remplissent des fonctions allant de ces accéléromètres pour airbags aux capteurs de niveau de carburant, en passant par le contrôle de la puissance de freinage et la réduction du bruit dans l'habitacle. Parmi les dernières innovations en matière automobile figurent également les "pneus intelligents" indiquant au conducteur qu'un des pneus est dégonflé 80 kilomètres avant la crevaison totale.

2. Les MEMS RF :

Les systèmes de communication micro-ondes bénéficient également de la technologie MEMS, désignée sous le sigle MEMS RF. Les MEMS RF ont en particulier le potentiel d'accroître les fréquences d'opération des composants, d'être plus performants en terme d'isolation, de pertes d'insertion et de linéarité. La technologie de fabrication MEMS pour les applications hyperfréquences (RF et HF) s'est développée et diversifiée, rendant possible aujourd'hui la réalisation d'un grand nombre de dispositifs [8].

Les capacités variables avec les micro-commutateurs constituent une grande partie des composants MEMS RF étudiés et présentes dans la littérature. Ces composants présentent des géométries de conception très variées et sont généralement constitués d'une structure mobile ou d'une membrane mécaniquement déformable [8].

Les capacités variables sont souvent utilisées afin d'assurer une accordabilité continue, alors que les commutateurs MEMS sont préférés pour les fonctions de commutation

ou pour obtenir une accordabilité discrète. Les dispositifs ainsi réalisés présentent des performances très intéressantes, qui sont fortement liées à celles des composants MEMS qui les composent. La figure (1.9) représente un exemple de capacité variable (variation analogique de capacité) réalisée par usinage de surface sous forme d'une fine membrane métallique ou diélectrique recouverte de métal (électrode mobile) se déplaçant sur des petites distances au-dessus d'une électrode fixe déposée sur la surface du substrat.

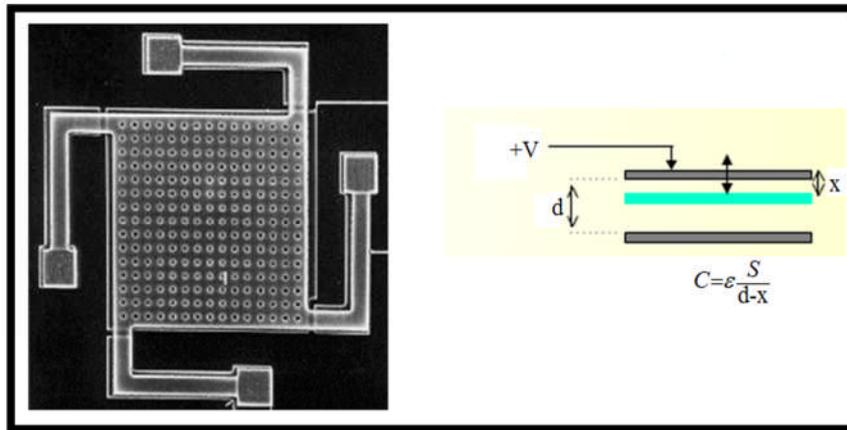


Figure 1.9 : Exemple de capacité variable à plaques parallèles [3].

Les micro-commutateurs sont basés sur le contrôle du mouvement d'une partie mécanique miniaturisée quand ils sont actionnés [8]. La figure (1.10) représente deux exemples de micro-commutateurs.

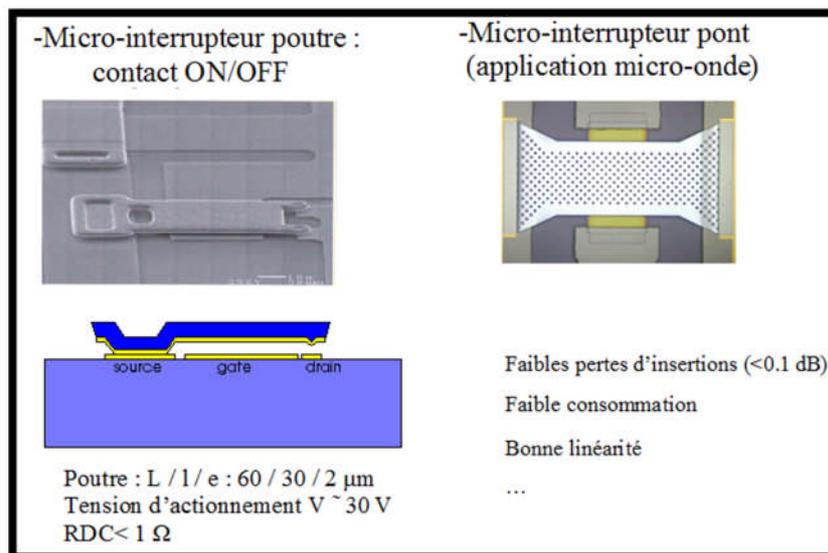


Figure 1.10 : Exemples de micro-interrupteurs (micro-commutateurs) mécaniques (Switch RF) [3].

Très compacts et performants, les dispositifs MEMS RF forment une nouvelle génération de composants RF qui permettront d'accroître les performances des circuits dans lesquels ils seront intégrés. Déjà 70% des téléphones mobiles fabriqués dans le monde intègrent des filtres acoustiques hautes fréquences qui utilisent cette technologie [8].

3. Les BioMEMS :

La technologie MEMS suscite un immense intérêt dans les domaines de la microfluidique et de la biochimie pour les applications à la biologie et la médecine, du fait de la biocompatibilité des matériaux utilisés dans la technologie MEMS et de la taille des microsystemes pour les biosciences (BioMEMS) [8].

En général, les BioMEMS sont employés pour le traitement thérapeutique, la livraison, la manipulation, le diagnostic, l'analyse ou la construction d'entités biologiques et chimiques. Leurs applications peuvent être systématisées en trois catégories [8] :

- **Les systèmes d'analyse, de diagnostic et de traitement biomédicaux :**
 - micro-capteurs intelligents (Bio Chips),
 - micro-laboratoires (Lab-on-Chip, RTAS),
 - biopuces à ADN (acide désoxyribonucléique),
- **L'instrumentation de microchirurgie :**
 - micro-scalpels et micro-pinces,
 - endoscopie et imagerie,
- **Les systèmes actifs implantables :**
 - contrôle de paramètres (température, pH, pression sanguine) avec éventuellement injection automatique de médicaments,
 - génération de stimuli nerveux (recréer le mouvement de membres handicapés),
 - organes artificiels (rétines, prothèses auditives) ou dispositifs hybrides bio/artificiels.

La biopuce à ADN a permis d'accélérer l'identification des quelques 30 000 gènes que contient le code génétique humain (figure 1.11) [4].

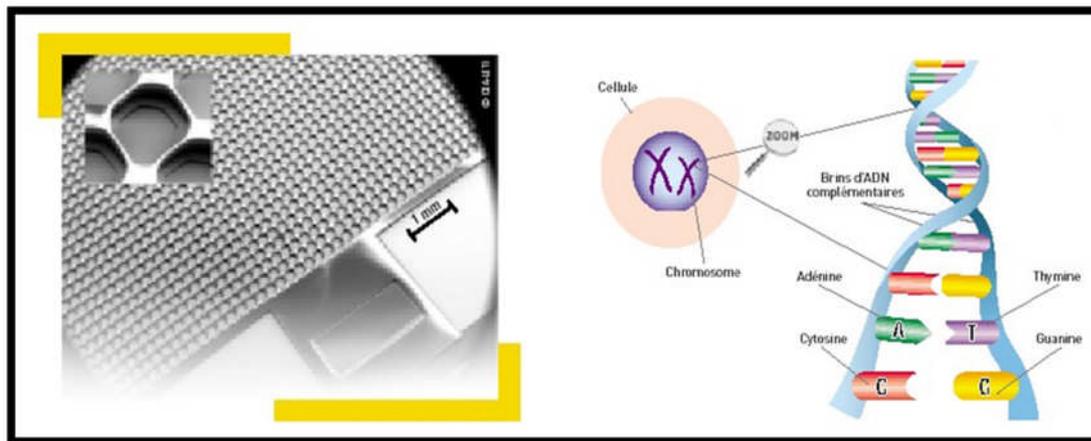


Figure 1.11: Biopuce à ADN [4].

La seringue commence à être remplacée par un distributeur qui, fixé sur la peau comme un patch, délivre continuellement l'insuline (figure 1.12) tout au long de la journée [4].

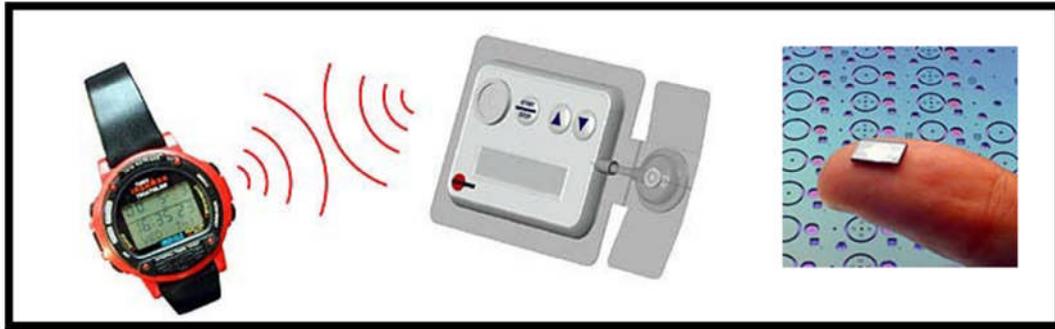


Figure 1.12 : Distributeur d'insuline [4].

La figure (1.13) représente le point d'application des appareils médicaux à l'être humain pour le diagnostic et le traitement de malade.

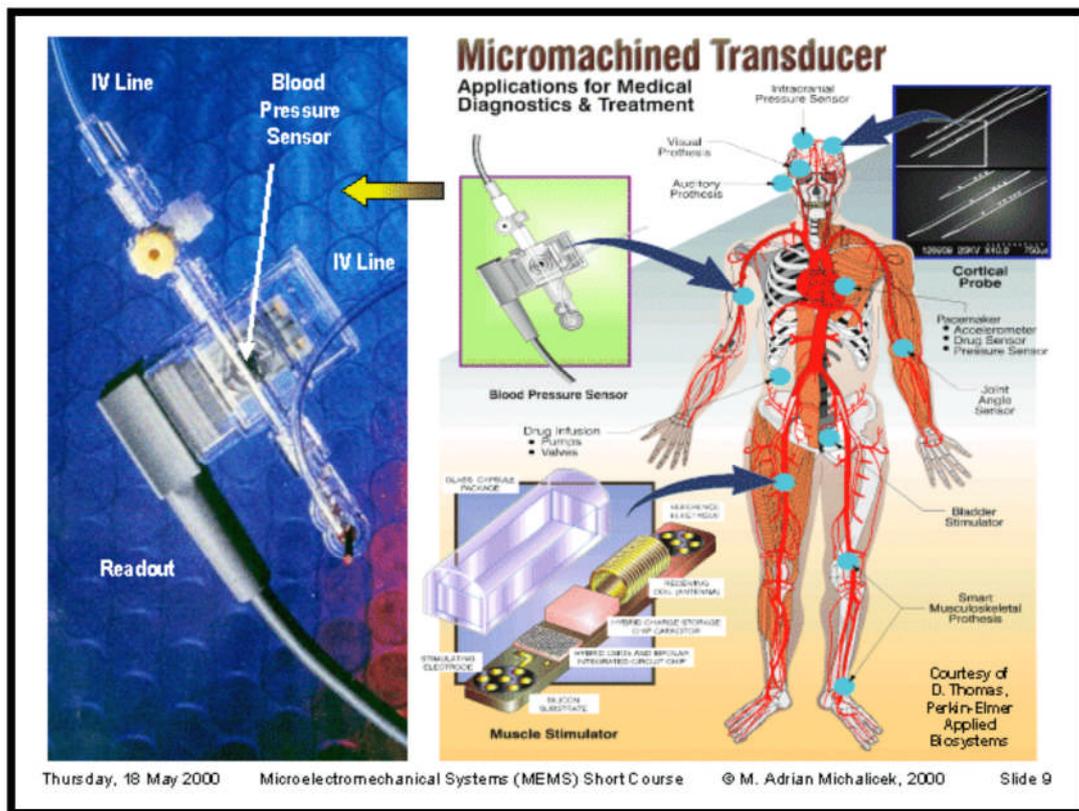


Figure 1.13 : Environnement Biomédical (Distributeur d'insuline, Biopuce à ADN, micropompe, prothèses auditives, surveillance en utilisant pacemaker) [9].

4. Les MOEMS :

Le domaine de l'optique ouvre une grande possibilité d'intégration aux structures MEMS. Elles associent des fonctions électriques, mécaniques et optiques d'où leur appellation MEMS-Optiques ou MOEMS [8].

Les structures MEMS font leur apparition en optique pour la réalisation de miroirs à inclinaison variable (figure 1.14). Après leur émergence dans les domaines des

télécommunications et de l'imagerie, les MOEMS présentent un grand potentiel de développement dans de nombreux secteurs (l'aérospatiale, l'astronomie, l'ophtalmologie, les biotechnologies...) [8]. La plupart des dispositifs et systèmes MOEMS intègrent un ou plusieurs micro-miroirs. En effet, l'optique est générée une large gamme de microsystèmes regroupant les commutateurs optique, les matrices de micro-miroirs (figure 1.15), les modulateurs spatiaux de lumière, les composants pour l'optique adaptative, les matrice de microlentilles (parfois à focale variable), les microcapteurs optiques ou encore les MEMS diffractifs.

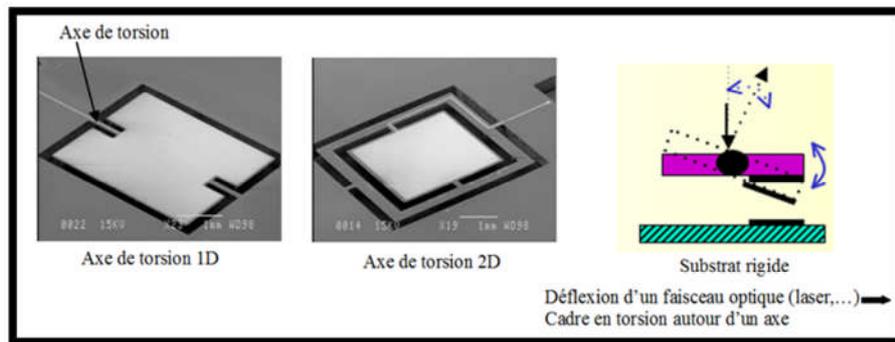


Figure 1.14: Exemples de micromiroir inclinable (tournante) [3].

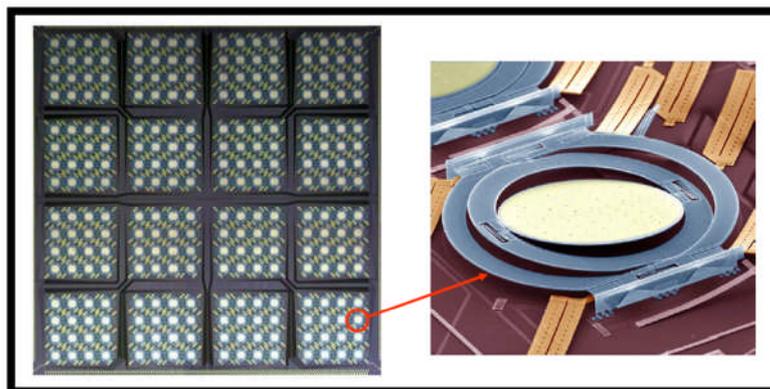


Figure 1.15: Matrices 256 voies (16x16 miroirs) commercialisées [4].

Le marché de très grand public de la projection d'images (figure 1.16) dans des téléviseurs ou au cinéma utilise des matrices de micro-miroirs déjà largement commercialisées à l'image du produit phare des MOEMS de Texas Instrument.



Figure 1.16 : Le système de projection d'images de Texas-Instruments (1995) [3].

Le tableau suivant donne un aperçu sélectif des applications de MEMS dans les cinq domaines actuels : la défense, le médical, l'électronique, les télécommunications et l'automobile.

Tableau 1.2 : Domaines d'application des MEMS.

Défense	Médical	Electronique	Communications	Automobile
Guidage des Armes	Micro-valves, micro-pompes, microréacteurs chimiques, puces ADN	Têtes de lecteur de disque	Commutateurs optiques ou photoniques et interconnexions pour réseaux large bande passante	Capteurs de navigation embarqués
Surveillance	Stimulateurs musculaires et systèmes de diffusion intra-sanguine	Têtes d'impression pour imprimantes à jet d'encre	Relais, micro-commutateurs, matrices de commutation, filtres radios fréquences, antennes, duplexeurs, micro-miroirs	Capteurs de compression du système de climatisation
Systèmes armement	Capteurs de pression intracorporels, capteur de pression sanguine	Télé-projecteurs	Systèmes de projection pour les téléphones portables	Capteurs de force de freinage, accéléromètres pour le contrôle des suspensions
Capteurs intégrés	Prothèses	Capteurs sismiques	Oscillateurs commandés sous tension (VCO)	Détecteurs de niveau de carburant et de pression de vapeur
Stockage des données	Instruments d'analyse miniaturisés	Détecteurs de pression pour l'aérospatial	Diviseurs et coupleurs, résonateurs, déphaseurs	Capteurs pour coussins gonflants (airbag)
Surveillance aérienne	Stimulateurs Cardiaques	Systèmes de stockage des données	Lasers accordables	Pneus intelligents

Le dispositif que nous nous intéresserons dans notre domaine d'étude est considéré comme un capteur fabriqué par la technologie MEMS. Pour cette raison, nous voulons essayer dans la suite de faciliter le choix des capteurs en rappelant tout d'abord les principes de base qu'ils utilisent et leurs principales caractéristiques.

III. Les capteurs :

Tous les dispositifs industriels, qu'ils appartiennent au monde des grands systèmes de l'aéronautique et de l'espace, des transports ou de la production et du traitement de l'énergie, ne peuvent fonctionner correctement que s'ils sont capables de réguler certains paramètres, de limiter les variations de certains autres, et de s'affranchir des fluctuations des variables qui les entourent. La mesure des grandeurs physiques traditionnelles s'avère de ce fait fondamentale.

Lorsqu'on souhaite traduire une grandeur physique en une autre grandeur (généralement électrique), on fait appel à un « capteur ». Les capteurs permettent de mesurer les effets des phénomènes de toutes natures qui agissent sur l'environnement de l'homme, avec l'évolution de la technologie, l'électronique en particulier. Leur importance s'accroît car ils permettent d'assurer la liaison homme – machine – environnement.

II.1 Généralités et définitions :

1. Mesurande :

C'est la grandeur physique que l'on souhaite mesurer (grandeur physique à mesurer).

2. Capteur :

Un capteur est le premier élément de la chaîne de mesure ou d'instrumentation. Il transforme les grandeurs physiques, chimiques ou biologiques (le mesurande) en une autre grandeur de nature différente (généralement électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

La grandeur physique à mesurer est appelée mesurande « m ». Le rôle du capteur va permettre donc de convertir « m » en une grandeur électrique exploitable qu'on appellera la mesure « s ». Cette grandeur électrique est une image de la mesurande.

On parle aussi de transducteur, la grandeur physique d'entrée (le mesurande) étant transformée en une autre grandeur physique de sortie ou en un signal électrique.

Le capteur présente sous l'action d'un mesurande non électrique (m) une caractéristique en fonction de grandeur de sortie de nature électrique (s) de type charge, tension, courant, impédance (R, L, C) ou une différence de potentiel (ddp) désignée par :

$$s = F(m) \quad (1.1)$$

La mesure de grandeur de sortie doit permettre de connaître la valeur de mesurande (figure 1.17). La relation $s = F(m)$ résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent :

- Le fonctionnement du capteur ;
- Sa construction (géométrie, dimensions et les matériaux) ;
- Son environnement ;
- Son mode d'emploi (température, alimentation).

La fonction $s = F(m)$ dépend souvent d'autres grandeurs physiques différentes de mesurande qui peuvent entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie propres à **l'environnement** (température, humidité, etc.). Ces grandeurs sont appelées grandeurs d'influence.

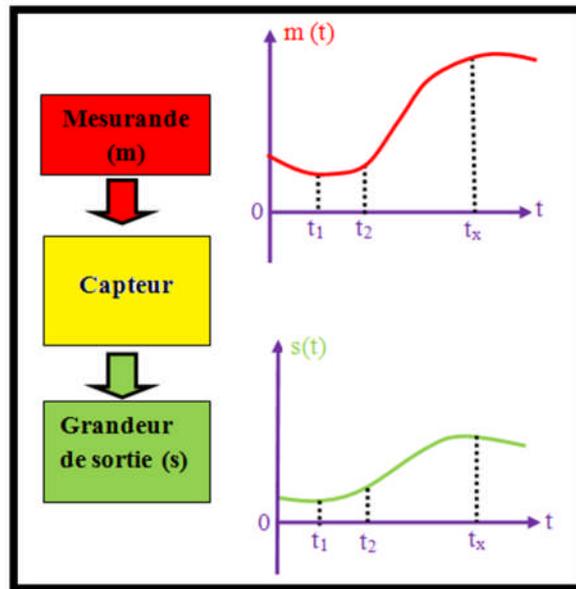


Figure 1.17 : Principe d'un capteur.

Le signal délivré par le capteur n'est pas directement utilisable et a besoin d'être amplifié, adapté, converti, linéarisé, digitalisé, etc. L'ensemble des circuits et appareils qui assure ces opérations est appelé chaîne de mesure.

2.1 Chaîne de mesure :

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. La chaîne de mesure est une suite d'éléments transducteurs et d'organe de liaison d'un instrument de mesure allant du capteur qui est le premier élément au dispositif d'indication, de stockage ou de traitement qui en est le dernier élément. Elle permet de transformer une grandeur à mesurer en un signal électrique exploitable. La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum trois étages :

- Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre une autre grandeur physique.
- Un conditionneur de signaux dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou d'utilisation. Cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal. Le choix de conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure.
- Une unité de visualisation et/ou d'utilisation qui permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter dans le cas d'un asservissement, par exemple.

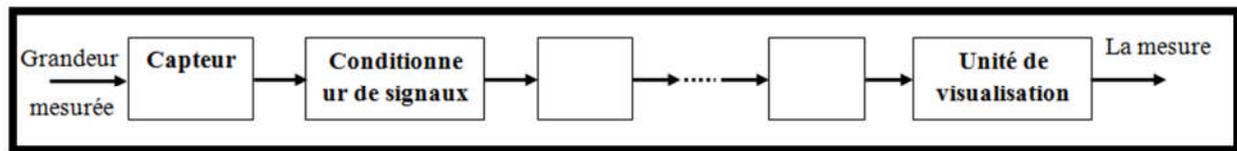


Figure 1.18 : Structure d'une chaîne de mesure.

Cette structure de base se rencontre dans toutes les chaînes de mesure et cette, quelle que soit leur complexité et leur nature. De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.

Les éléments inconnus de la chaîne de mesure doivent pouvoir assurer la transmission du signal pour le traiter, le traitement analogique de signal (éviter la dégradation du signal par le bruit et les parasites) pour le rendre exploitable, la conversion du signal sous forme numérique.

2.2 Types de grandeur physique :

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles [10]. Chaque capteur s'associera à l'une de ces 6 familles :

- Mécanique : déplacement, force, masse, pression, débit...
- Thermique : température, capacité thermique, flux thermique.
- Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique.
- Magnétique : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique.
- Radiatif : lumière visible, rayons X, micro-ondes.
- Biochimique : humidité, gaz, sucre, hormone.

2.3 Etalonnage des capteurs :

La relation $s = F(m)$ est explicitée pour tout capteur par un **étalonnage** qui est obtenue lorsqu'on mesure des valeurs de s pour un ensemble de valeurs de m connues avec précision [11] (figure 1.19.a) et donc chaque valeur de m correspond à une valeur de s mesurée (figure 1.19.b). Cette relation peut dépendre non seulement du mesurande mais aussi des grandeurs d'influence. S'il n'y a pas de grandeurs d'influence, l'étalonnage est simple, sinon il est multiple.

L'étalonnage du capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'explicitier, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celles de la grandeur électrique de sortie et ceci, compte tenu de tous les paramètres additionnels (la vitesse de variation de mesurande, les grandeurs d'influence nécessaires au fonctionnement du capteur, hystérésis) susceptibles de modifier la réponse du capteur [11].

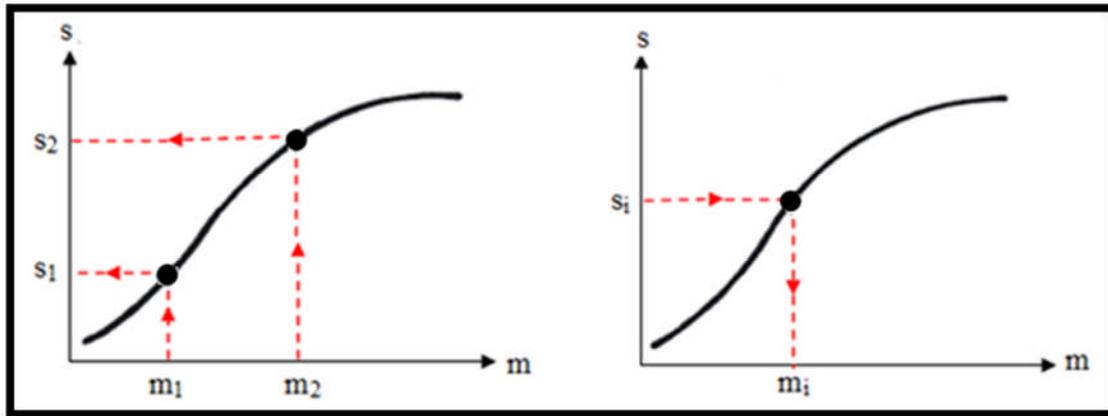


Figure 1.19 : Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m ; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse du capteur.

2.4 Classification des capteurs :

Les classifications des capteurs suivant le mode de fonctionnement, on distingue deux capteurs fonctionnent selon deux principes de base suivant l'origine du signal électrique de sortie (grandeur de sortie), qui sont **les capteurs passifs et les capteurs actifs**. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

1. Capteurs passifs :

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif (impédance) qui peut être résistif, capacitif ou inductif.

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs : c'est son conditionneur. Les différents types de conditionneurs seront abordés au dernier partie de chapitre 1.

La figure (1.20) représente les éléments de constitution d'un capteur passif.

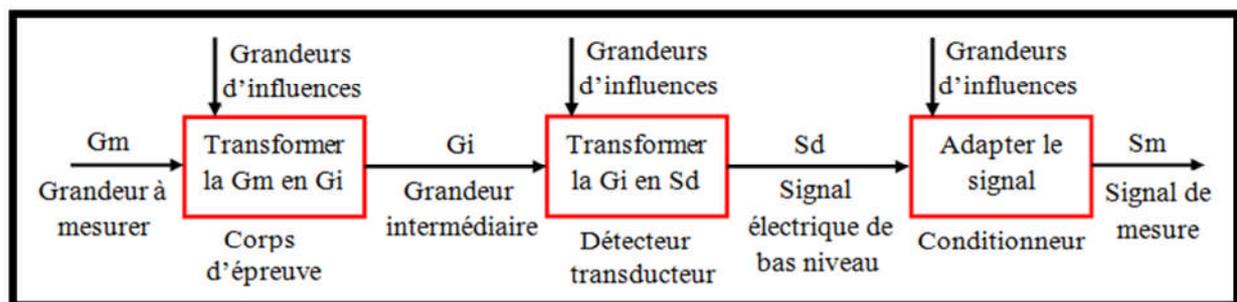


Figure 1.20 : Schéma fonctionnel du capteur passif.

Un capteur passif est composé de :

- Corps d'épreuve : c'est un élément mécanique qui réagit à la grandeur à mesurer pour rôle de transformer la grandeur à mesurer (mesurande) en une autre grandeur physique mesurable (souvent une grandeur intermédiaire qui sera traduite en signal électrique).

Cette grandeur constitue la réaction du corps d'épreuve (exemple : membrane, microlevier, micropont, etc.).

- Transducteur : est un élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie (exemple: Condensateur variable, Résistance variable).

Le tableau ci-dessous résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Tableau 1.3 : Effets utilisés pour les capteurs passifs.

Mesurande	Effet utilisé (grandeur de sortie)	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteurs
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

2. Capteurs actifs :

Dans ce cas, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge.

La figure (1.21) représente les éléments de constitution d'un capteur actif.

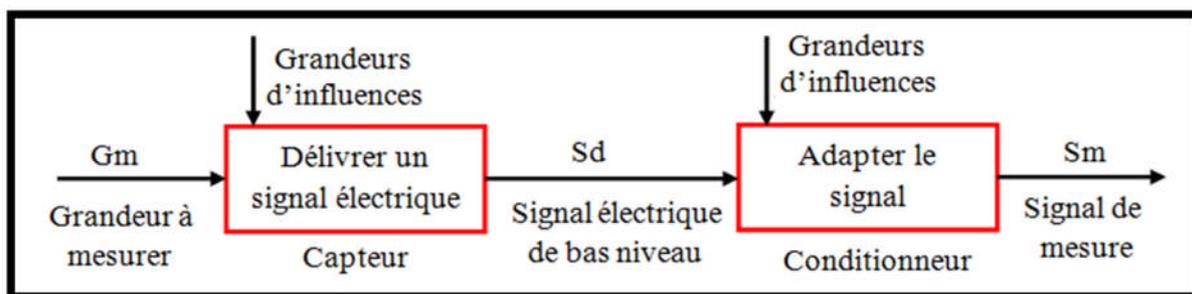


Figure 1.21: Schéma fonctionnel d'un capteur actif.

Il est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion directe en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à mesurer (énergie thermique, mécanique ou de rayonnement). Les principes physiques mis en jeu sont présentés sur le tableau (1.4).

Les signaux de sortie délivrés par les capteurs actifs sont de très faible puissance. Ils sont dits de bas-niveau et doivent être amplifiés pour pouvoir ensuite être transmis à distance.

Tableau 1.4 : Effets utilisés pour les capteurs actifs.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	induction	Tension

Définitions des effets utilisés dans le tableau précédent :

a. Thermoélectricité :

C'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T_1 et T_2 . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température (T_1-T_2).

b. Pyroélectricité :

Certains cristaux dits pyroélectriques, présentent une polarisation électrique proportionnelle à leur température. Ainsi, en absorbant un flux de rayonnement, le cristal pyroélectrique va s'échauffer et ainsi sa polarisation va se modifier entraînant une variation de tension détectable.

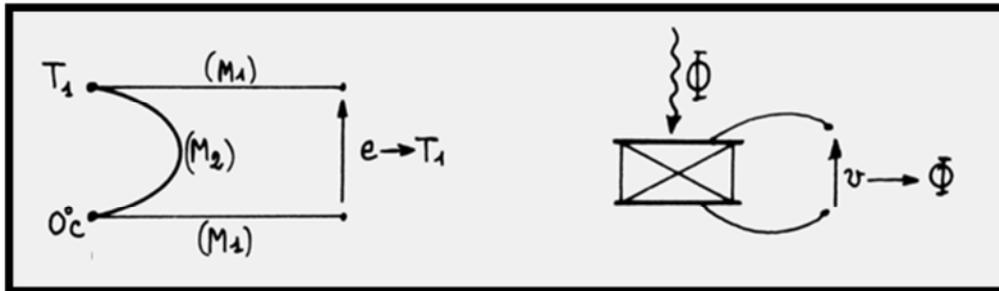


Figure 1.22 : Thermoélectricité et pyroélectricité.

c. Piézoélectricité :

L'application d'une contrainte mécanique (force) sur ce type de matériau engendre l'apparition de charges électriques créées par la déformation du matériau. C'est un phénomène réversible.

d. Induction :

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une force électromotrice (f.é.m.) proportionnelle à sa vitesse de déplacement.

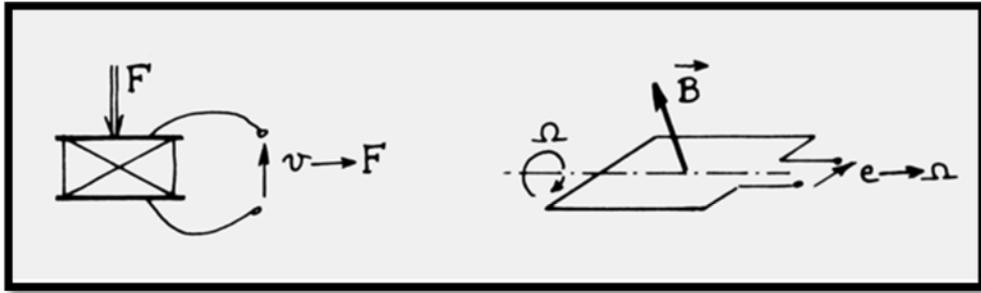


Figure 1.23 : Piézoélectricité et induction.

e. Photoélectricité :

Sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, le matériau libère des charges électriques et celles-ci en fonction du rayonnement.

f. Effet Hall :

Un semi-conducteur de type parallélépipède rectangle, placé dans une induction B et parcouru par un courant I , voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, d'une différence de potentiel qui a pour expression :

$$U_H = K_H . I . B . \sin \theta \quad (1.2)$$

Où K_H est un constant qui dépend du matériau et des dimensions, θ est l'angle entre I et B .

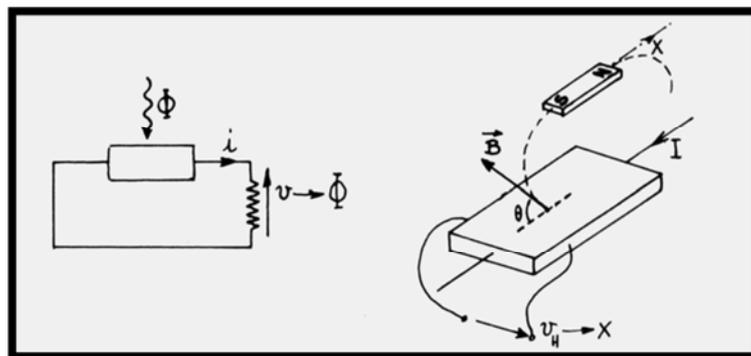


Figure 1.24 : Photoélectricité et effet Hall.

2.5 Caractéristiques d'un capteur : définition métrologique :

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, nous sommes amenés à définir les paramètres importants qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

1. Limites d'utilisation des capteurs :

Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur telles qu'elles étaient connues par étalonnage préalable ou spécifications du constructeur. On peut définir trois domaines d'utilisation :

a. Domaine nominale d'emploi (ou domaine normal) :

Il correspond aux conditions normales d'utilisation du capteur ; ces limites sont les valeurs extrêmes que peuvent atteindre de façon permanente où le mesurande le mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques du capteur.

b. Domaine de non- détérioration :

Les caractéristiques métrologiques du capteur risquent d'être modifiées après de surcharges éventuelles ; cette altération est cependant réversible des propriétés du capteur. La courbe d'étalonnage est toujours valable si on revient dans le domaine nominal.

c. Domaine de détérioration (non-destruction) :

Dans lequel, le capteur peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques de façon irréversible. La réutilisation du capteur dans son domaine nominal d'emploi nécessite donc un nouvel étalonnage.

Si on ne peut pas d'étalonner le capteur (la courbe d'étalonnage n'est pas valable), le capteur est hors d'usage qu'il est nécessaire de remplacer par un nouvel capteur.

2. Étendue de la mesure (E.M) :

C'est le domaine des valeurs de m borné par les valeurs extrêmes du mesurande (minimale et maximale) dans le domaine nominal d'emploi ($m_{\max} - m_{\min}$) dans laquelle les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données. C'est l'élément principal du cahier des charges.

3. Seuil :

Le seuil d'un capteur est la valeur minimale du mesurande à partir de laquelle le capteur devient sensible. En dessous de cette valeur le capteur ne mesure rien et il affiche une valeur nulle.

4. Hystérésis :

L'hystérésis consiste au non coïncidence entre la courbe de charge et celle de décharge c'est-à-dire la mesure par valeurs croissantes et par valeur décroissantes de courte durée à température constante. Lorsque les deux courbes du capteur (croissant et décroissant) de la grandeur physique ne sont pas identiques, on parle d'une erreur due à l'hystérésis du capteur. Cette erreur est exprimée en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure. La figure ci-dessous illustre les caractéristiques de sortie d'un capteur présentant un effet d'hystérésis.

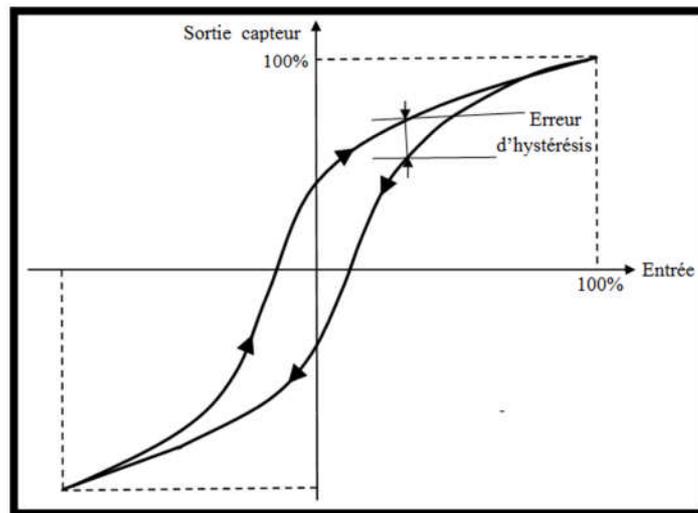


Figure 1.25 : Courbe typique d'hystérésis.

5. Résolution :

La résolution se définit comme la plus petite valeur de variation du mesurande que peut détecter le capteur donnant une lecture significative de la grandeur à mesuré.

6. Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur :

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

7. Sensibilité :

La sensibilité détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée (mesurande) en un point donné. Si elle est constante, on dit dans ce cas que le capteur est **linéaire**. Il y a alors simple proportionnalité entre la variation du mesurande et la variation de la grandeur de sortie et cela se traduit dans une chaîne de mesure par une fonction de transfert simple à déterminer.

Pour des raisons de facilité d'exploitation [11] de capteur, La conception et l'utilisation d'un capteur doit respecter une relation linéaire entre les variations Δs de la grandeur de sortie et celles Δm de la grandeur d'entrée (mesurande) ou excitation :

$$\Delta s = S.\Delta m \quad (1.3)$$

Où S est la sensibilité du capteur.

La sensibilité est alors la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur. Ainsi, elle est indépendante du temps (insensibilité au vieillissement) dans la plage d'utilisation.

La valeur de la sensibilité, dans des conditions d'emploi spécifiées est généralement fournie par le constructeur ; elle permet à l'utilisateur :

- D'estimer l'ordre de grandeur de la réponse du capteur, connaissant l'ordre de grandeur des variations du mesurande,
- De choisir le capteur de façon que la chaîne de mesure dans son ensemble satisfasse aux conditions de mesure imposées.

Il faut noter que la sensibilité d'un capteur peut être en fonction du conditionneur auquel il est associé.

8. Finesse :

La finesse d'un système de mesure (ou la finesse d'un système physique en général) est l'aptitude qu'a celui-ci effectuer des mesures sans perturber le système physique dans lequel il est inséré [12]. Cela permet d'évaluer l'influence du système sur la mesure. On la définit non seulement vis à vis du système mais aussi vis à vis de l'environnement d'utilisation du système. Par exemple, lorsque le système est capteur dans le cas d'une mesure thermique, on cherchera un capteur à faible capacité calorifique vis à vis des grandeurs l'environnant.

9. Linéarité :

Zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande. Cette zone peut être définie à partir d'une droite tracée (par exemple, par la méthode des moindres carrés) dans la courbe d'étalonnage approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur. On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité qui exprime en % l'écart maximal entre la courbe réelle (courbe d'étalonnage) et la droite approchant la courbe.

L'écart de linéarité d'un capteur permet d'apprécier la plus ou moins bonne linéarité d'une courbe d'étalonnage. Il peut être mesuré et utilisé pour corriger les données des essais réels en vue d'améliorer la précision.

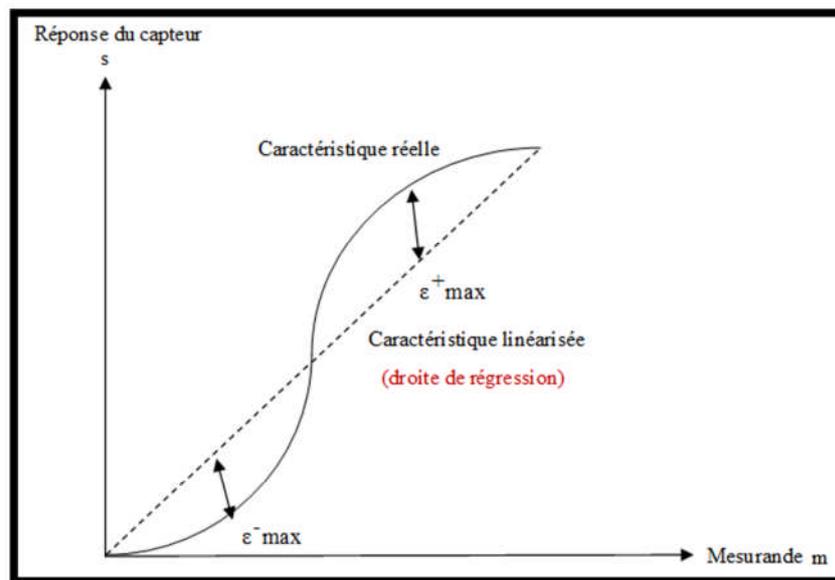


Figure 1.26 : Exemple de linéarisation de caractéristiques.

10. Rapidité - Temps de réponse :

La rapidité caractérise l'aptitude du capteur à suivre en sortie les variations du mesurande avec le temps. La grandeur utilisée pour définir la rapidité est le temps de réponse t_r , c'est la durée qui s'écoule après une variation brusque (échelon) du mesurande jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus que $\varepsilon\%$ de la valeur finale. Un temps de réponse doit donc toujours être spécifié avec l'écart $\varepsilon\%$, On note le temps de réponse : $t_r(\varepsilon\%)$.

En plus du temps de réponse à $\varepsilon\%$, d'autres intervalles de temps ont été définis :

- Le temps de retard à la montée ou délai à la montée : c'est le temps nécessaire pour que la grandeur de sortie atteigne 10 % de sa variation totale ;
- Le temps de montée : c'est l'intervalle de temps qui correspond au passage de 10 % à 90 % de sa variation totale ;
- Le temps de retard à la chute ou délai à la chute : c'est le temps qu'il faut pour que la grandeur de sortie diminue, à partir de sa valeur initiale de 10 % de sa variation totale ;
- Le temps de chute : c'est l'intervalle de temps correspondant à la décroissance de la grandeur de sortie de 10 % à 90 % de sa variation totale.

11. Erreurs de mesure :

La valeur vraie des mesurandes n'est pas connue que dans le cas des grandeurs étalons : leur valeur est fixée par convention. Dans tous les autres cas, l'expérimentateur dispose d'un résultat (la mesure) exprimé en unité de mesurande fourni par la chaîne complète qui est censée représenter la valeur du mesurande. La marge entre la vraie valeur du mesurande et la mesure est appelée erreur de mesure. Cependant, une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc l'incertitude sur la valeur vraie.

On distingue deux grands types d'erreurs de mesure :

a) Erreurs systématiques (qui entachent chaque mesure) :

Ce sont des erreurs constantes et/ou des variations lentes par rapport à la durée des mesures. Pour un mesurande donné, elles introduisent systématiquement le même décalage. Elles sont liées par exemple à l'erreur de référence (décalage du zéro), mauvaise utilisation du capteur, exploitation incorrecte des données (écart de linéarité), Mauvaises conditions d'emploi, etc.

La réduction des erreurs systématiques passe souvent par le réétalonnage du capteur ou le choix d'un capteur mieux adapté.

b) Erreurs accidentelles ou aléatoires (qui n'entachent pas chaque mesure) :

On ne peut pas connaître les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de l'expérience sont inconnues même si certaines des causes peuvent être connues. Elles sont dues aux grandeurs d'influences, erreurs de lecture, de seuil, parasites (bruit de fond par agitation thermique, induction parasites dues aux rayonnements électromagnétiques, etc.), etc. Il faut remédier à toutes ces erreurs par le blindage, des méthodes de stabilisation, la réjection du bruit et le filtrage.

12. Caractéristiques statistiques d'un capteur :

Ces paramètres permettent de prendre en compte la notion d'erreurs de mesure qui peuvent survenir sur un capteur.

Les erreurs accidentelles entraînent une dispersion des résultats lors de mesures répétées.

Rappel : lorsque la mesure d'une même grandeur du mesurande a été répétée n fois, on définit à partir de ces n mesures :

- La valeur moyenne est par définition : $\langle m \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$ (1.3)
- Une indication de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart type σ autour de la valeur moyenne :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \langle m \rangle)^2}{n-1}} \quad (1.4)$$

1. Fidélité :

C'est le paramètre qui définit la qualité d'un capteur dont les erreurs accidentelles sont faibles. L'écart type obtenu sur une série de mesures est souvent considéré comme l'erreur de fidélité.

Une série de mesures effectuées avec un capteur est qualifiée de série fidèle si l'ensemble de résultats de la série est dans un intervalle entourant la valeur moyenne de « faible ampleur » [12].

2. Justesse :

C'est le paramètre qui caractérise la qualité d'un capteur dont les systématiques sont faibles. Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur vraie. Ainsi, si la valeur moyenne est proche de la valeur vraie, on dit que le capteur est juste.

3. Précision :

C'est le paramètre qui définit la qualité d'un appareil dont chaque mesure soit très proche de la valeur vraie du mesurande. Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur vraie et la valeur obtenue en sortie du capteur. Ainsi, un capteur précis aura à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse.

Fidélité + Justesse \Leftrightarrow Précision

2.6 Conditionneur associé :

Le conditionnement de la mesure consiste à rendre exploitable la mesure issue du capteur [10]. Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association capteur + conditionneur qui détermine le signal électrique et ses caractéristiques. On effectue une adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure complète. De la constitution du conditionneur dépend un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sa sensibilité, sa linéarité, son insensibilité à certaines grandeurs d'influences, etc.

1. Capteurs actifs :

Le capteur se comporte comme une source.

1.1 Type source de tension :

On peut adopter le modèle suivant pour la sortie du capteur auquel on vient connecter une impédance correspondant à l'impédance d'entrée du conditionneur.

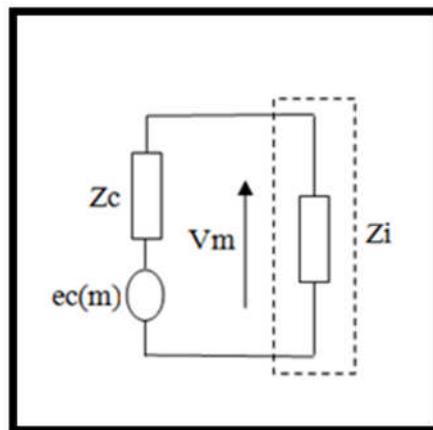


Figure 1.27 : Modèle du capteur source de tension.

On utilisera des dispositifs à forte impédance d'entrée de manière à obtenir une tension en sortie du conditionneur aussi proche que la tension en sortie du capteur. On pourra utiliser un montage suiveur (inverseur ou non), ou un amplificateur différentiel plus classiquement appelé amplificateur d'instrumentation (Voir ci-dessous).

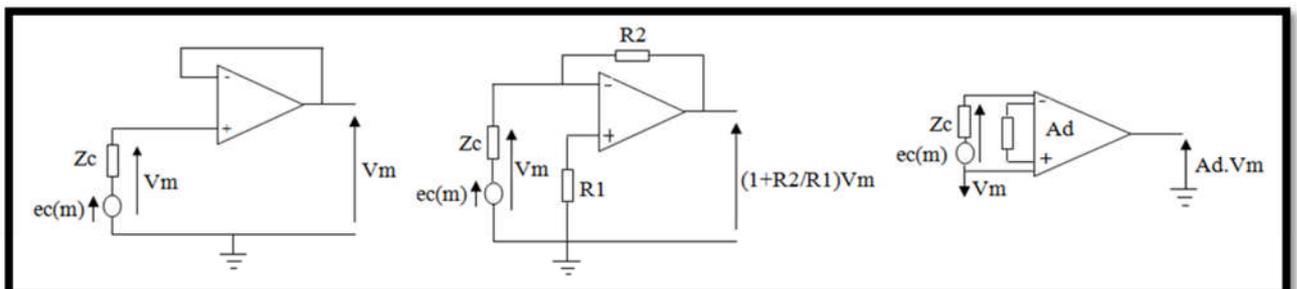


Figure 1.28 : Exemple de conditionneur.

1.2 Type source de courant :

Dans ce cas, le capteur peut se modéliser par une source de courant avec une impédance en parallèle.

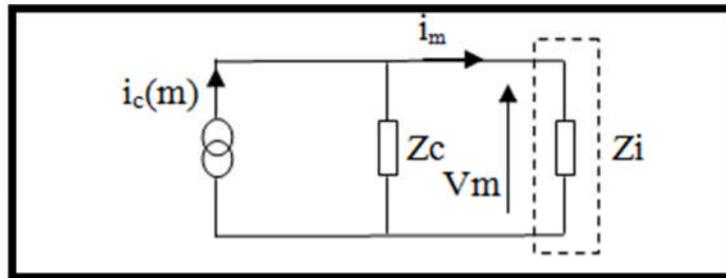


Figure 1.29 : Modèle du capteur type source de courant.

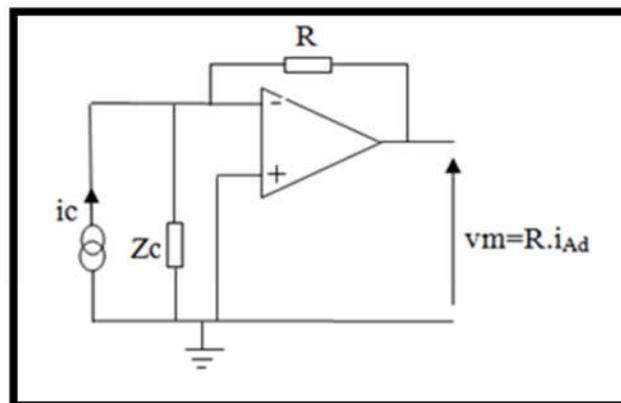


Figure 1.30 : Convertisseur courant tension.

1.3 Type source de charge :

Le capteur en tant que générateur présente une impédance interne capacitive. C'est le cas d'un cristal piézo-électrique. Il faut faire attention dans le cas où l'on vient brancher une impédance équivalente résistive à ses bornes. Cette résistance peut engendrer une décharge trop rapide de la capacité empêchant toute mesure.

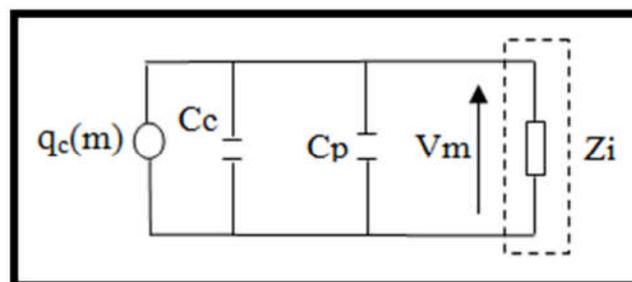


Figure 1.31: Modèle du capteur type source de charge.

Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un amplificateur de charge dont le principe est présenté ci-dessous.

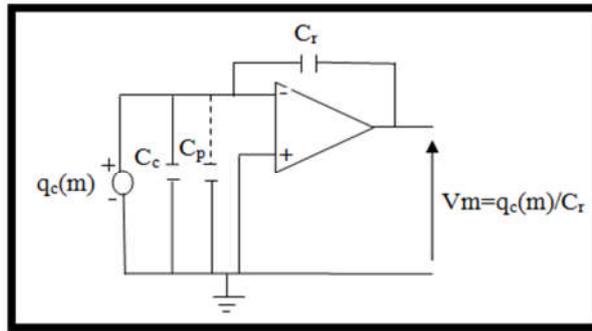


Figure 1.32 : Amplificateur de charge.

2. Capteurs passifs :

Ce capteur donne une image du mesurande par l'intermédiaire d'une impédance. On associe donc toujours au capteur une source externe de tension ou de courant.

Deux grands principes de conditionneurs peuvent être employés :

- Montage en pont : on récupère alors une tension proportionnelle au mesurande.
- Montage oscillant : la fréquence du signal de sortie est modulée par le mesurande.

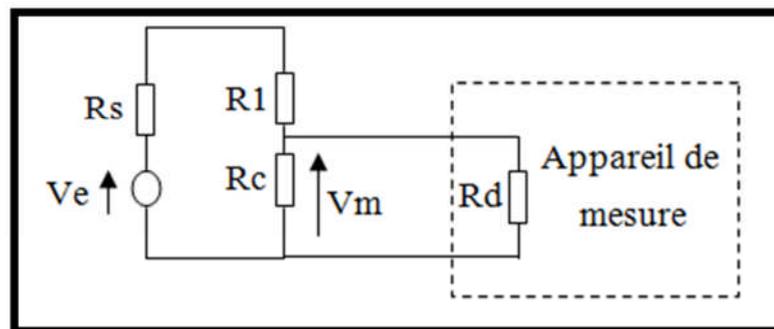


Figure 1.33 : Modèle du montage potentiométrique.

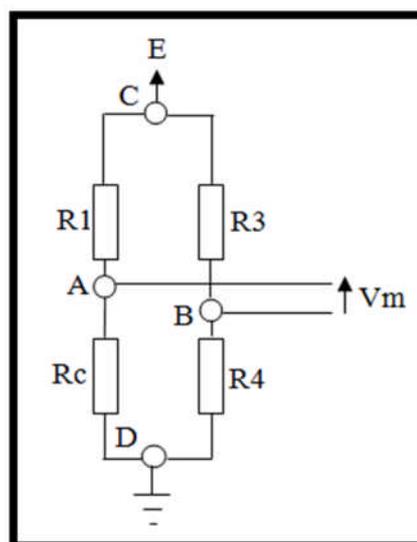


Figure 1.34 : Montage en pont.

II.2 Différents types des capteurs :

Les capteurs dans l'industrie peuvent être classés suivant leurs natures (actifs ou passifs) ou suivant le phénomène physique qui est à l'origine de leurs fonctionnements. On cite quelques exemples des capteurs les plus utilisés.

1. Capteurs d'accélération :

Un accéléromètre permet de mesurer l'accélération d'un point particulier dans un système en cours de test. Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique $\vec{F} = m \cdot \vec{\gamma}$. Plus précisément, il consiste en l'égalité entre la force d'inertie de la masse sismique du capteur et une force de rappel appliquée à cette masse.

2. Capteurs d'humidité :

La mesure d'humidité est difficile à mettre en œuvre. L'humidité dans l'air est mesurée généralement comme la fraction maximum d'eau qui peut être absorbée à une certaine température. Les techniques de détection les plus utilisées sont la détection résistive et la détection capacitive.

3. Capteurs de position :

Les capteurs de position sont des capteurs de contact. Ils peuvent être équipés d'un galet, d'une tige souple et d'une bille. L'information donnée par ce type de capteur est de type tout ou rien et peut être électrique ou pneumatique.

4. Capteurs de température :

De toutes les grandeurs physiques, la température est certainement l'une dont la mesure est la plus fréquente. La température détermine en effet de façon décisive les propriétés de la matière. Sa mesure n'est pas directe, mais à travers un phénomène associé tel que la variation de résistance d'un conducteur électrique, la dilatation d'un fluide ou l'émission d'un rayonnement thermique.

5. Capteurs de pression :

Dans tous les cas, les capteurs de pression peuvent se ramener au schéma synoptique ci-dessous. Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer a pour rôle de transformer celle-ci en grandeur physique mesurable.

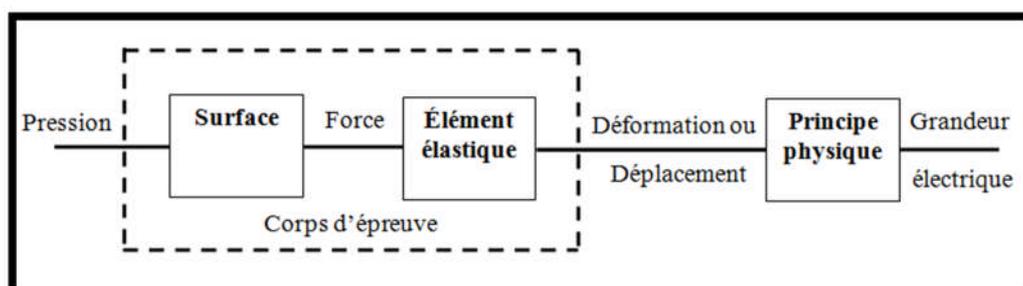


Figure 1.35 : Schéma de principe des capteurs de pression.

II.3 Différentes détections des capteurs :

La méthode de transduction est la technique qui permet d'associer à la grandeur physique captée, une grandeur électrique proportionnelle à la grandeur qu'on veut mesurer. Parmi les méthodes de détection les plus utilisées on trouve :

1. Détection résistive :

Les capteurs résistifs sont plus utilisés pour la mesure de la température (thermistances), mesure de déplacement (capteurs potentiométriques) ou pour la mesure de pression (jauge de contrainte). Ils sont basés sur la variation de la résistivité du matériau utilisé :

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (1.6)$$

2. Détection capacitive :

La détection capacitive est souvent utilisée dans les capteurs de déplacement dans lesquels la variation de la distance entre les deux armatures (d) et la variation de surface de la plaque (S) fait varier la valeur de la capacité. La valeur de la capacité est aussi fonction du type de diélectrique (ϵ_r) entre les armatures.

Les capteurs à détection capacitive sont généralement constitués d'un condensateur composé de deux armatures de même surface dont l'une des armatures est fixe et l'autre armature susceptible de se déplacer ou de se déformer sous l'action de la variation du mesurande.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \frac{\epsilon_d S}{d} \quad (1.7)$$

3. Détection inductive :

Utilisant leurs propriétés magnétiques, ils sont plus utilisés comme des capteurs de proximité (capteurs à courant de Foucault, etc.).

4. Détection piézoélectrique :

Les matériaux piézoélectriques, parce qu'ils permettent de convertir une contrainte mécanique en polarisation électrique donc en tension. Ils sont candidats naturels pour les applications basées sur la détection de pressions.

5. Détection piézorésistive :

Les matériaux piézorésistifs (métaux et semi-conducteurs) possèdent la particularité de convertir une contrainte mécanique en une variation de résistance. Ceci leur permet d'être utilisées dans les capteurs de pression ou d'accélération. Ce type de capteurs est caractérisé par une excellente linéarité et une faible impédance de sortie. Leur sensibilité à la température est par contre problématique.

CHAPITRE 2

ACCÉLÉROMÈTRE PIÉZORÉSISTIF ET TECHNOLOGIES DE MICRO USINAGE DES MEMS

I. Introduction :

Un accéléromètre mesure l'accélération subie par un objet. Cette accélération est exprimée en m/s^2 ou en nombre de "g" qui correspond à l'accélération de la pesanteur moyenne sur la terre ($1g = 9.8m/s^2$). Voici quelques ordres de grandeurs d'accélération pouvant être rencontrées [13] :

- 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.
- 100-2000g serait l'accélération subie par un objet lors du choc si vous le laissez tomber d'un mètre sur un sol dur.
- Enfin 10 000g est l'ordre de grandeur de l'accélération subie par une balle au départ d'un fusil.

Les capteurs d'accélération (les accéléromètres) convertissent cette grandeur mécanique en une grandeur qui peut être mesurée ou enregistrée (grandeur électrique). Ils mesurent une accélération selon une ou plusieurs directions. Cette accélération est mesurée de manière indirecte en mesurant [14]:

- Soit le déplacement de la masse sismique du capteur (quelques μm) ;
- Soit la force inertielle induite par l'accélération de la masse sismique du capteur.

Le premier accéléromètre sur silicium a été présenté en 1979 [13]. Par le passé, les accéléromètres étaient utilisés dans des domaines d'applications où le critère de coût passait au second plan (applications militaires, aérospatial). Aujourd'hui grâce aux techniques de micro-usinage (ce terme fait référence à la fabrication de structures micromécaniques à l'aide de techniques empruntées aux méthodes de fabrication microélectroniques) qui permettent de réduire considérablement les coûts de fabrication.

Les accéléromètres sont définis par les paramètres suivants : sensibilité, résolution, plage de fonctionnement, bande passante, sensibilité hors axe, offset, choc maximum toléré. Ces paramètres déterminent les domaines d'applications associés à chaque type d'accéléromètre.

Les accéléromètres sont présents dans de nombreux domaines d'application grand public et industriels, ils sont utilisés généralement [15] :

- 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 du médical. Il est intégré dans les pacemakers, qui servent à stimuler le cœur défaillant des patients par des impulsions électriques.
- dans le futur, on pense intégrer un accéléromètre dans les stylos pour sécuriser les signatures : enregistrement temps réel de la signature (tracé, vitesse, accélération).

L'accéléromètre détecte alors tout changement de rythme d'activité physique. Ainsi, quand le patient commence à courir, le pacemaker modifie les impulsions envoyées au cœur pour les adapter à l'intensité de l'effort physique.

II. Technologies de micro-usinage des MEMS :

La gravure est une opération permettant de micro-usiner le matériau afin d'obtenir des formes particulières telles que des membranes, des microleviers, des microponts, des microcavités, etc.

Le micro-usinage associé à la technologie de fabrication des circuits intégrés sur silicium permet une réduction des coûts, la miniaturisation des capteurs et une intégration monolithique des systèmes (structure mécanique et circuit électronique sur le même substrat).

La fabrication de la plupart des microsystèmes utilise un wafer de silicium comme substrat. Il existe plusieurs techniques pour fabriquer des structures mécaniques en silicium. Nous rappelons ici les deux techniques principales, totalement compatibles CMOS :

- Le micro-usinage en surface.
- Le micro-usinage en volume.

Ces deux techniques de gravures dites humides (la micro gravure est réalisée à l'aide des solutions chimiques qui peuvent dissoudre le silicium par réaction d'oxydo-réaction et de dissoudre les oxydes formés) entraînent la fabrication de structures différentes. Dans plusieurs cas, ces deux méthodes de fabrication peuvent être combinées pour créer des systèmes plus complexes.

II.1 Micro-usinage en surface (ou surface micromachining) :

Le micro-usinage en surface (Surface micromachining) est la technique de gravure sélective consistant à enlever sélectivement une des couches pré-déposée appelée couche sacrificielle (souvent des oxydes ou des résines). Le terme « surface » vient du fait que la gravure dans ce cas n'attaque pas le silicium du substrat qui n'est qu'un support.

Une illustration de cette gravure est donnée sur la figure (2.1). Le principe consiste d'abord à déposer sur le substrat une couche sacrificielle (souvent des oxydes ou des résines) qui sera enlevée par la suite. Une couche de matériau destinée à la réalisation de la partie mécanique, appelée couche structurelle (couche en polysilicium, métal, polymère ou isolants non oxydes tels que le nitrure de silicium), est ensuite déposée sur la couche sacrificielle. Finalement la couche sacrificielle est enlevée par micro-gravure pour laisser la partie mécanique suspendue. La couche sacrificielle est choisie en fonction de la couche qui constituera la structure mécanique [13].

Cette technique est utilisée pour la production de nombreux MEMS. Les capteurs ainsi obtenus sont le plus souvent basés sur la détection capacitive. La structure obtenue est insensible aux variations de température. Cette technique permet l'utilisation d'une électronique intégrée monolithique.

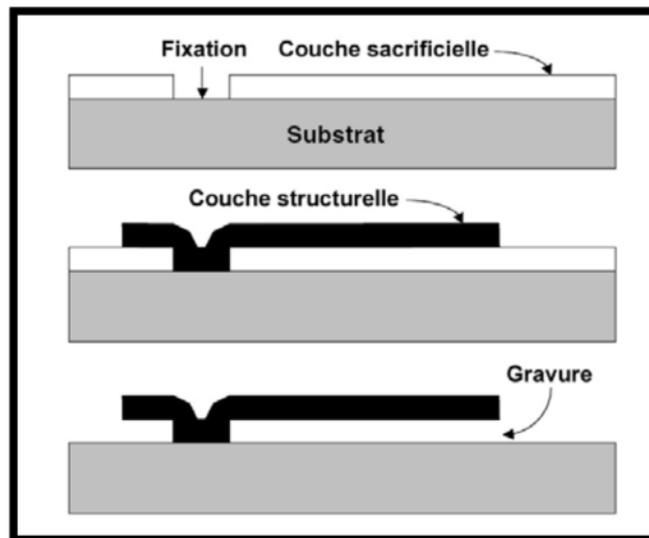


Figure 2.1 : Principe de la gravure en surface.

II.2 Le micro-usinage en volume (bulk micromachining) :

Le micro-usinage en volume est un procédé permettant de fabriquer des structures suspendues par gravure du substrat d'un circuit intégré [13]. Le terme « volume » vient du fait que la gravure profonde forme une cavité dans le volume du substrat (éventuellement sous des couches déposées). La gravure du substrat peut se faire par gravure sèche ou humide.

1. Gravure en volume sèche :

Elle est réalisée, généralement, en utilisant le PLASMA qui est un gaz très réactifs totalement ou partiellement ionisé composé d'un nombre égal de charges positives et négatives et de molécules non ionisées.

2. Gravure en volume humide :

Elle utilise généralement des solutions chimiques (par exemple : KOH, TMAH, EDP) qui peuvent dissoudre le silicium par réaction d'oxydoréduction et de dissoudre les oxydes formés.

Ces deux types de gravure peuvent avoir un caractère :

2.1. Gravure isotrope :

Dans la gravure isotrope, la vitesse d'attaque est approximativement constante dans toutes les directions cristallographiques. Dans ce cas, il est difficile de contrôler avec précision les dimensions latérales des motifs résultants. L'inconvénient majeur de cette technique est la gravure des zones situées sous le masque dans le cas où l'usinage latéral n'est pas souhaité. La figure (2.2) montre un exemple de motif réalisé par cette technique.

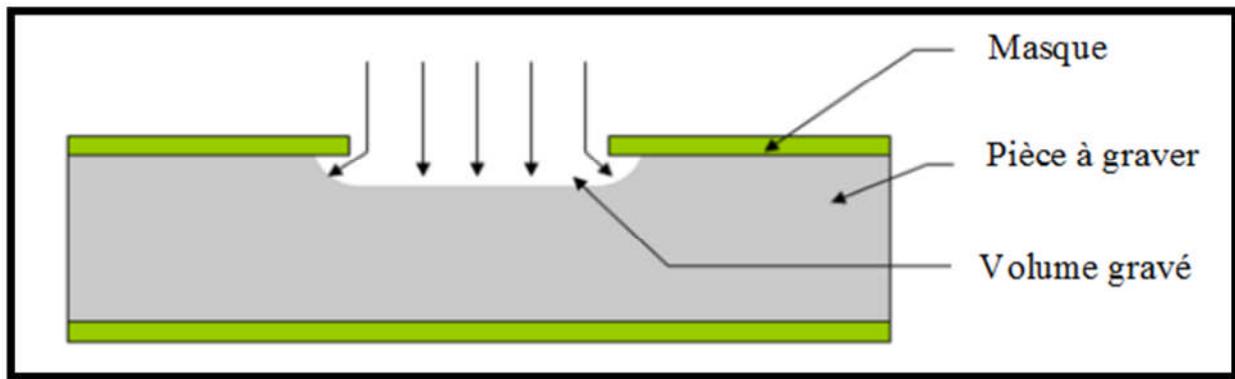


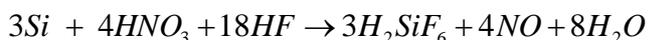
Figure 2.2 : Exemple de cavité obtenue par gravure isotrope.

La solution de gravure isotropique du Silicium est généralement un mélange de HF, HNO₃ et H₂O (ou bien CH₃COOH).

L'attaque chimique utilisée se fait dans une solution contenant HF, HNO₃ et H₂O (ou CH₃COOH).

L'acide nitrique et l'acide fluorhydrique servent respectivement à oxyder et à désoxyder la surface du silicium. L'eau et l'acide acétique jouent le rôle de modérateurs :

La réaction chimique régissant la gravure est :



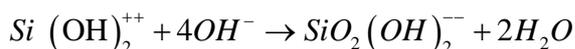
La gravure se fait généralement à la température ambiante.

2.2 Gravure anisotrope :

Dans le cas de la gravure anisotropique, la vitesse d'attaque dépend de la direction cristallographique (n'est pas la même suivant les différents plans cristallins).

Les solutions de gravure du silicium présentant un caractère anisotrope sont des hydroxydes : KOH, NaOH, CeOH, RbOH, NH₄OH, TMAH. Pour cette dernière, la réaction se déroulant est alors l'oxydation du silicium par les 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 dans la gravure anisotropie du silicium sont l'hydroxyde de potassium (KOH), le Tétraméthyl Ammonium Hydroxyde (TMAH) et l'Éthylène Diamine Pyrocatechol (EDP).

Dans ce type de gravure, la vitesse d'attaque des plans (100) est de l'ordre de 100 fois celle des plans (111) (Figure 2.3). L'explication généralement donnée de l'anisotropie est que

la vitesse de gravure pour un plan donné est déterminée par la densité d'atomes dans ce plan et par le nombre de liaisons Si-Si exposées à la solution ou restant à l'intérieur du matériau. On peut donc réaliser des cavités de formes diverses dont les faces sont délimitées par les plans cristallographiques (100) et (111).

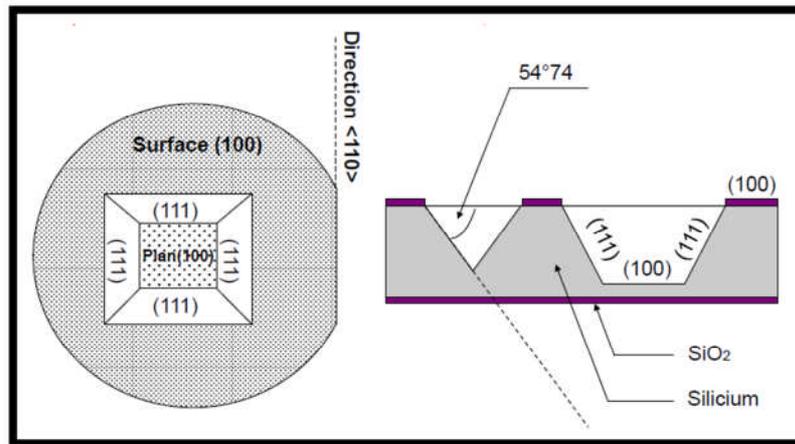


Figure 2.3: Exemple de cavité obtenue par gravure anisotrope.

Dans le cas de la gravure du Silicium, le masquage se fait dans la majorité des cas à l'aide d'une couche d'Oxyde de Silicium SiO_2 ou bien de Nitrure de Silicium Si_3N_4 .

III. Accéléromètre piézorésistif :

III.1. Principe général :

La masse sismique M est solidaire d'une lame de rappel élastique équipée de 2 ou 4 jauges piézorésistives montées dans un pont de Wheatstone. La flexion de la lame est traduite en déformation des jauges soit directement (cas des accéléromètres basse fréquence), soit indirectement en association avec un amplificateur mécanique (cas des accéléromètres moyenne fréquence ou de choc).

III.2. Principales caractéristiques métrologiques :

- Une sensibilité faible et sera idéal pour la mesure de **chocs longue durée**.
- Influence de la température (gamme de température d'utilisation $<130^\circ\text{C}$).
- Dimensions est faibles
- Etendue de Mesure est large
- Résistance aux chocs est moyenne
- Bande Passante de 0 à quelques centaines de Hz.
- Variation du coefficient d'amortissement ($\zeta \cong 1$: régime critique, $\zeta > 1$: régime aperiodique, $\zeta < 1$: régime periodique).
- Une puissance de sortie faible (de l'ordre de 1.10^{-4} W).
- Facile à conditionner (pont de jauges) et es correspond à la surcharge mécanique d'une tolérance faible (fragile).

III.3. Les jauges piézorésistives :

1. Définition :

Les **piézorésistances** sont des résistances variables de changer la conductibilité d'un matériau dû à une contrainte mécanique que l'on entraîne une variation de résistance. Ces résistances sont couplées avec un pont de Wheatstone. En 1935, le terme de piézorésistance apparaît dans l'article de **John W. Cookson** qui distingue le changement de la conductivité avec les contraintes et le changement total de résistance.

Les jauges piézorésistives de déformation seront essentielles de comprendre le mécanisme de l'effet piézorésistif dans le cas du silicium monocristallin avant de nous intéresser au cas du poly-silicium pour réaliser des capteurs mettant à profit l'effet piézorésistif, matériaux que nous utilisons pour former les jauges de contraintes intégrées au sein du capteur. Le principe de piézorésistivité est identique pour le germanium et d'autres matériaux.

Les premières applications commerciales de ces jauges virent le jour à la fin des années 1950 avec leur utilisation dans des capteurs de pression.

2. Principe général :

L'effet piézorésistif est un principe de détection largement utilisé, notamment pour la détection de déformations et également de forces par l'intermédiaire de corps d'épreuve pour lesquels on pourra relier la force exercée sur le corps à la déformation subie par celui-ci. Le principe de base est simple, un corps piézorésistif subissant une déformation, consécutive à l'application d'une contrainte sur ce dernier, verra sa résistance modifiée. Il est, aujourd'hui, largement utilisé dans le domaine des MEMS pour diverses applications liées à la détection (accéléromètre, gyromètres, capteurs de pression ou de force, capteur de débits ou encore capteurs chimiques ou biologiques [16]). La jauge piézorésistive est collée sur la structure (micropoutres) dont elle subie la déformation.

La résistance d'un corps parallélépipédique (jauge piézorésistance) de l'épaisseur e et de largeur l et de longueur L et de sa résistivité ρ à pour expression :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.9)$$

Après dérivation de cette expression, il vient :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (2.10)$$

Sachant que $\Delta L/L$ par définition la déformation ε , et que $\Delta A/A = -2\nu\varepsilon$ dans le cas d'un matériau isotrope sous contrainte dans son domaine élastique, avec ν le coefficient de Poisson, la relation (2.10) devient :

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu)\varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.11)$$

La résistance d'un corps soumis à une contrainte peut être modifiée par suite de modifications géométriques dont le terme correspondant est proportionnel à $(1+2\nu)$ ou alors d'un changement de résistivité $(\Delta\rho/\rho)$. Cependant, la plupart des corps soumis à une contrainte voient uniquement une évolution de leurs dimensions et la variation de résistance associée sera trop faible pour pouvoir servir à la transduction de la contrainte mécanique en un signal électrique. Par définition stricte, le terme piézorésistif fait référence aux corps qui verront une modification de leur résistivité suite à une contrainte.

Leur sensibilité à la déformation peut être caractérisée par le facteur de jauge G défini par la relation suivante :

$$G = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

Les déformations longitudinales et transversales sont souvent présentes en même temps dans le matériau même si l'une d'elles pourra être largement favorisée. Le changement total de la résistance est la somme des variations sous déformations longitudinales et transverses.

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_l + \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_t = G_l \cdot \varepsilon_l + G_t \cdot \varepsilon_t \quad (2.13)$$

Où G_l et G_t sont respectivement les facteurs de jauge longitudinal et transversal, ε_l et ε_t sont respectivement les déformations longitudinal et transversal.

III.4. La détection piézorésistive :

Le principe fondamental de la dynamique permet d'établir une relation entre les trois grandeurs que sont force, masse et accélération ($F = m.a$ où m est la masse). L'interaction entre la force et l'accélération est réciproque. La majorité des accéléromètres fonctionne sur ce principe. On mesure l'accélération en mesurant la force exercée sur un corps d'épreuve, ou encore la déformation que cette dernière engendre sur une structure. La détection piézorésistive est une technique utilisée pour transformer l'action de l'accélération sur le capteur en signal électrique.

Les premiers accéléromètres utilisent la détection piézorésistive qui utilise aujourd'hui encore dans certains capteurs commercialisés. Hokuriku commercialise depuis 1993 [13] le plus petit accéléromètre à détection piézorésistive trois-axes.

Les microsystèmes à détection piézorésistive sont fabriqués exclusivement en utilisant le procédé de gravure en volume (bulk micromachining). Tirant profit de la maturité de la technologie de fabrication des capteurs de pression, les accéléromètres à détection piézorésistive, micro-usinés en volume, ont été développés dans les années 80, ils sont aujourd'hui en production de masse.

Le corps d'épreuve est une poutre suspendue ou une masse suspendue, on mesure ici la déformation de la structure lors de l'accélération à travers la variation de résistance d'un élément piézorésistif placé à l'encastrement de la poutre (lieu où la contrainte est maximale),

ce principe est illustré à la figure (2.6). L'accéléromètre à détection piézorésistive utilise les jauges piézorésistives en silicium monocristallin ou polycristallin. La résistance des jauges piézorésistives change avec l'application d'une contrainte.

Ce type de dispositif est relativement simple et peut être facilement intégré dans une configuration de type pont résistif (pont de Wheatstone) permettant ainsi l'utilisation d'une électronique simple. Les accéléromètres ainsi conçus sont utilisés généralement pour la mesure de chocs ou d'accélération de forte amplitude (100000 g par exemple). Les accéléromètres à détection piézorésistif peuvent être sensibles aux trois axes.

L'inconvénient majeur de ce type de détection est la dérive de la valeur des résistances en fonction de la température (la valeur de la résistance dépend de la température), on se trouve ainsi avec un offset et une sensibilité non calibrés (nécessité d'un circuit d'étalonnage et de compensation). Néanmoins de telles structures peuvent fonctionner à hautes températures (>100 °C). Dans ces systèmes le bruit est important à basse fréquence.

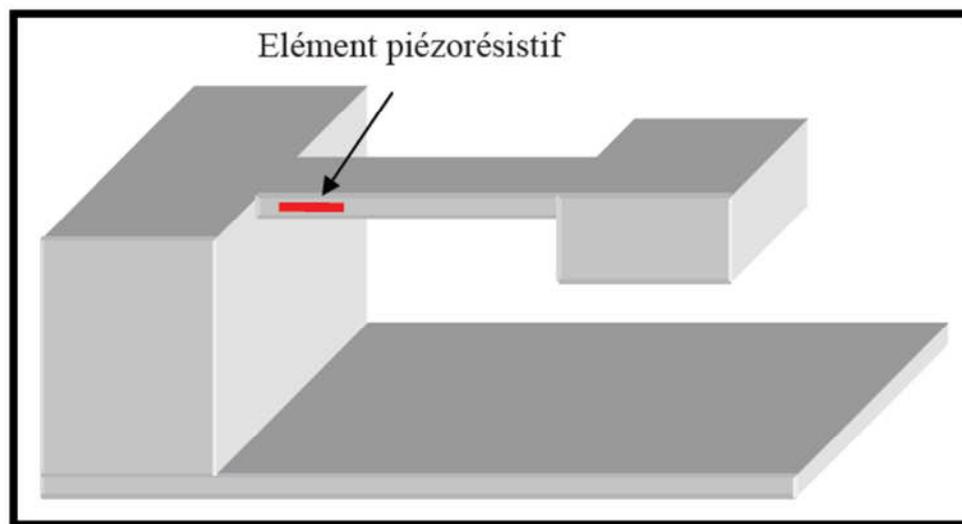


Figure 2.4 : Principe de fonctionnement d'un accéléromètre à détection piézorésistive.

III.5. Comparaison avec les autres types d'accéléromètres [11]:

Le domaine d'application des accéléromètres piézorésistifs s'insère est largement évolué par rapport à des autres accéléromètres.

III.5.1. Avantages des accéléromètres piézorésistifs :

- S'agissant de capteurs essentiellement résistifs et de faible impédance, ils sont peu sensible aux parasites extérieurs et aux ambiances perturbées.
- Le matériel de mesure associé peut être d'usage courant à gain faible.
- La liaison électrique étant assurée par un câble à 4 conducteurs, blindé et isolé, n'est pas le siège de phénomènes triboélectriques comme avec certains câbles coaxiaux.
- Le passage de la composante continue, outre l'aptitude à mesurer des accélérations statiques ou à très basse fréquence, facilite les étalonnages et les tests avec des systèmes produisant des accélérations continues.
- Pas de risque de décalage de zéro important après des chocs rapides.

- Faibles influence du couple de serrage sur le zéro et la sensibilité.
- Puissance délivrée importante
- Miniaturisation possible.

III.5.2. Inconvénients des accéléromètres piézorésistifs :

- Surcharge admissible plus faible que pour les accéléromètres piézoélectriques.
- Difficulté de réaliser des capteurs à très faible étendue de mesure.
- Précision et sensibilité plus faibles.
- Nécessité d'une source d'alimentation.
- L'aptitude à transmettre la composante continue fait apparaître des dérives de zéro d'origines mécanique et thermique qui ne sont pas perceptibles sur les capteurs piézoélectriques.

CHAPITRE 3

LA THÉORIE DE LA PIÉZORÉSISTIVITÉ

I. Introduction :

Dans ce chapitre, Nous allons donner une rapide description de la piézorésistivité dans le silicium monocristallin. Nous aborderons, ensuite, l'étude de la piézorésistivité dans le silicium polycristallin. En effet, ce dernier constitue le matériau de base des jauges de contraintes intégrées dans notre capteur.

La **piézorésistivité** est la propriété que possède d'un matériau lorsque celui-ci est soumis à des contraintes mécaniques (des déformations) à changer de conductivité électrique. Cette propriété physique fut découverte par Sir Lord Kelvin en 1856 dans le cas des métaux et mise en évidence un siècle plus tard, en 1954, par C.S. Smith [17] pour les semi-conducteurs dopés tels que le silicium ou le germanium monocristallin. La variation de résistance électrique d'un barreau de silicium, par exemple, est majoritairement due aux contraintes et donc aux déformations appliquées au réseau cristallin agissant sur la structure de bande, par rapport à la variation géométrique du barreau. En 1910, **Woldemar. Voigt** formalise l'expression tensorielle des contraintes et des déformations dans un cristal ainsi que l'expression tensorielle généralisée de la **loi de Hooke**. Dès 1954, Charles S. Smith mesure des coefficients piézorésistifs «exceptionnellement grands» sur le silicium et germanium.

II. Notion de résistivité électrique :

Considérons un fil métallique de longueur l et de section droite S , parcouru par un courant continu d'intensité I . D'après la loi d'Ohm, la différence de potentiel V apparaissant entre les bornes du fil vaut :

$$V = R \cdot I \quad (3.1)$$

Où V est la tension aux bornes du fil et R est la résistance du fil.

La résistance dépend de l et S du matériau constituant le fil, mais ne dépend ni du courant I , ni de la tension V .

Pour caractériser la conduction électrique du fil, il est utile d'introduire une quantité physique propre au matériau, c'est-à-dire une quantité qui ne dépend pas de la géométrie du fil. Cette quantité est la résistivité électrique ρ , elle apparaît dans la relation entre le champ électrique \vec{E} en un point du matériau et la densité du courant électrique en ce même point :

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J} \quad (3.2)$$

Cette relation, appelée loi d'Ohm locale, est souvent exprimée en termes de la conductivité électrique σ^{el} .

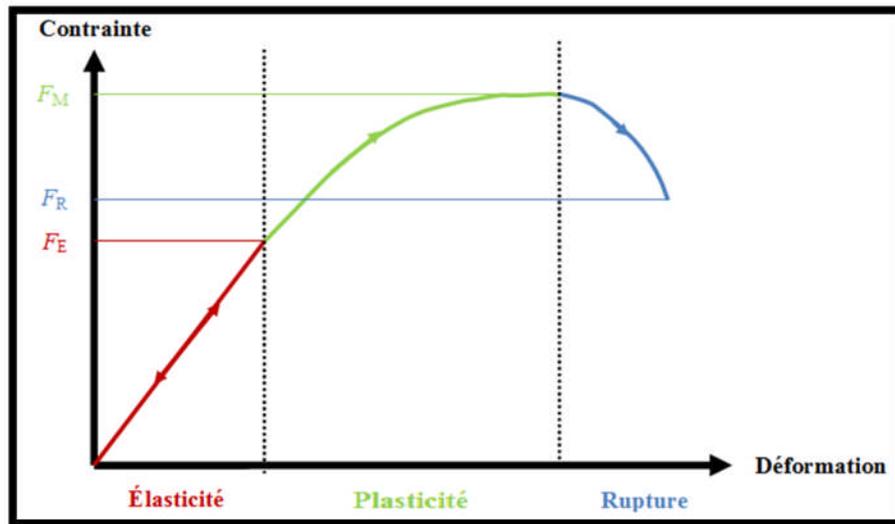
$$\rho = \sigma^{el-1} \Rightarrow \vec{J} = \sigma^{el} \cdot \vec{E} \quad (3.3)$$

Rappelons que la densité de courant J est un vecteur : son intensité mesure la quantité de charges électriques traversant, par unité de temps, une section droite du fil métallique ; J est parallèle à la vitesse des charges. Ainsi,

$$|\vec{J}| = \frac{I}{S} \quad (3.4)$$

III. Relation entre contrainte et déformation- loi de Hooke - :

Lorsqu'un corps est soumis à des contraintes externes, celui-ci subit des déformations qui dépendent de l'intensité de ces contraintes. Si ces dernières sont faibles, on observe expérimentalement que les déformations sont proportionnelles aux tensions appliquées. La constante de proportionnalité est une caractéristique du matériau et du type de déformation subi par celui-ci.



III.1 Définitions :

1. Élasticité :

Propriété qu'a un corps, après avoir été déformé par une charge, de reprendre sa forme initiale lorsque la charge est enlevée.

2. Limite élastique :

C'est la contrainte maximum que peut supporter un matériau sans danger de déformation permanente.

3. Module de Young (élasticité) :

C'est la constante de proportionnalité entre la contrainte qu'un matériau subit et sa déformation unitaire s'ils sont dans le même sens. C'est une constante propre à chaque matériau.

4. Plasticité :

Propriété qu'a un corps de conserver partiellement les déformations produites par une charge lorsque celle-ci est enlevée. La déformation plastique se produit quand la contrainte dépasse la limite d'élasticité.

III.2 Loi de Hooke :

La déformation d'un élément de volume ΔV sous un état de tension quelconque est la superposition de deux déformations : l'allongement et le cisaillement.

1. Allongement :

Une tension normale unique produit deux effets :

Un allongement spécifique :

$$\varepsilon = \Delta L/L \text{ avec } \Delta L = L' - L \quad (3.5)$$

Une contraction latérale :

$$\Delta d = d' - d \quad (3.6)$$

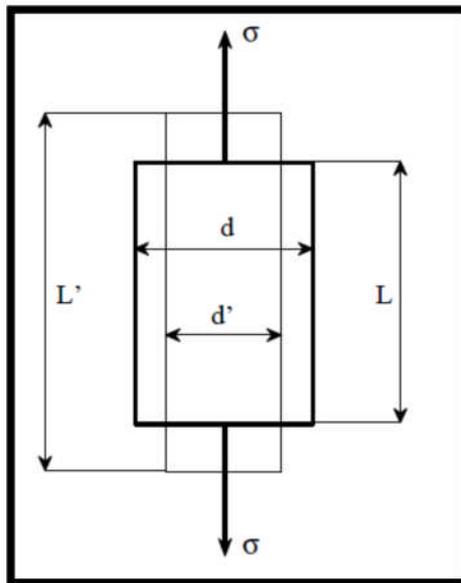


Figure 3.1 : Allongement (déformation) sous contraintes uni-axiales.

Dans la limite de proportionnalité, l'allongement spécifique et la contraction latérale sont proportionnels à la tension s ; c'est le premier aspect de la loi de HOOKE. Ce dernier traduit le fait que dans le domaine des petites déformations, celles-ci sont proportionnelles à la contrainte uni-axiale c'est-à-dire détermine la déformation parallèle dans le sens de la contrainte :

$$\varepsilon_{//} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} = \frac{1}{E} \cdot \sigma \quad (3.7)$$

Où $\varepsilon_{//}$ est la déformation parallèle (ou la déformation longitudinale en traction), E est le module de Young (ou Module d'élasticité longitudinal) et s'exprime en Pa (ou $N.m^2$). Lorsque le module de Young est très élevé, le matériau est dit rigide.

Le coefficient de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Il lie la déformation de la contrainte principale à la déformation perpendiculaire :

$$\frac{\Delta d}{d} = \varepsilon_{\perp} = -\nu \cdot \varepsilon_{//} \quad (3.8)$$

Où ν est coefficient de Poisson (sans unité).

Dans le domaine élastique, ν est généralement voisin de 0.3 [11].

Avec l'intérêt de ces coefficients, on peut obtenir une représentation quantitative de l'anisotropie des propriétés mécaniques du matériau.

2. Cisaillement :

La déformation produite par les tensions τ résultant d'un couple de forces tangentielles est le cisaillement pur (figure 3.2).

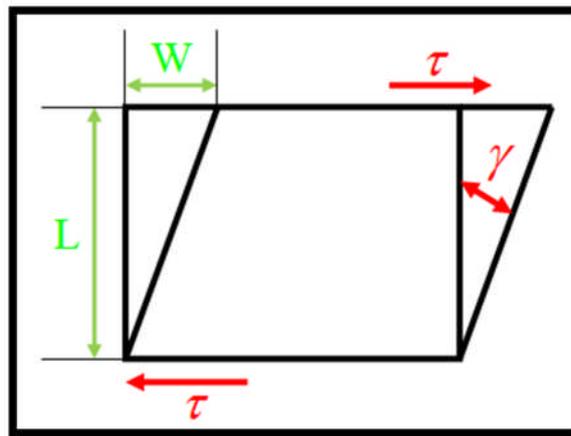


Figure 3.2: Déformation en cisaillement.

Elle se traduit par une déformation angulaire dont l'angle γ est proportionnel à τ ; c'est le second aspect de la loi de HOOKE :

$$\tau = G \cdot \gamma \quad \text{avec} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{W}{L} = \tan \theta \approx \theta \quad (3.9)$$

Où τ est la contrainte en cisaillement, G est le module en cisaillement ou module de COULOMB (N.m^{-2}), γ est la déformation en cisaillement.

III.3 Généralisation de la Loi de Hooke -Tenseur d'élasticité- :

Dans le cadre de la théorie de l'élasticité linéaire, la déformation dépend linéairement des contraintes mécaniques. Les différents coefficients qui relient la déformation à la contrainte sont appelés modules d'élasticité (ou rigidités) ou compliances du matériau. Ces coefficients forment des tenseurs de rang 4, comprenant dans le cas général 81 composantes

[18]. Comme les tenseurs de déformation et de contraintes sont des tenseurs symétriques du second rang :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}_0 \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}_0 \quad (3.11)$$

Où σ_{ij} est le tenseur des contraintes et ε_{ij} est le tenseur des déformations. Les explications de ces tenseurs sont trouvées dans Annexe B. La loi de HOOKE Généralisée s'écrit :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (3.12)$$

Où C_{ijkl} sont les coefficients du tenseur d'élasticité, appelés modules d'élasticité ou de rigidités, et S_{ijkl} sont les coefficients du tenseur inverse (matrice souplesse), appelés compliances élastiques.

Loi de Hooke consiste dans le domaine élastique des déformations proportionnelles aux contraintes. Lorsqu'une propriété relie des tenseurs de rang 2 symétrique (ce qui est le cas de la piézorésistivité et de l'élasticité) [18] alors :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} = \sigma_{ji} &\Rightarrow C_{ijkl} = C_{jikl} \\ \varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk} &\Rightarrow C_{ijkl} = C_{ijlk} \end{aligned} \quad \text{Où } i, j, k, l = 1, 2, 3 \text{ idem pour le tenseur } S_{ijkl} .$$

On obtient, par conséquent, un tenseur de rang 4 ainsi fréquemment représentés par une six contraintes (matrice de rang 2) et 6 déformations (matrice de rang 2) indépendantes et d'une matrice de rigidité de (6x6) :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}_0 \quad (3.13)$$

Et matrice inverse de (6x6) :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix}_0 \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Symétrie des matrices caractéristiques :

Énergie de déformation volumique élémentaire est :

$$dw = \sigma_i d\varepsilon_i = C_{ij} d\varepsilon_j \quad (3.15)$$

Énergie de déformation devient :

$$w = \frac{1}{2} C_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j \quad \text{alors} \quad \frac{\partial w}{\partial \varepsilon_i} = C_{ij} \varepsilon_j = \sigma_i \quad \text{donc} :$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_i} = C_{ij} \quad (3.16)$$

La matrice souplesse $[S]$ est une matrice inverse de celle de rigidité d'où :

$$[S] = [C]^{-1} \quad (3.17)$$

Comme le Silicium a une structure cubique, les matrices S et C ne possède que trois coefficients indépendants (figure 4.3); ils s'écrivent alors :

$$C_{mn} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \quad \text{et idem pour } S_{mn} \quad (3.18)$$

Les notations C_{mn} et S_{mn} sont donnés pour le silicium qui appartient à classe cubique m3m.

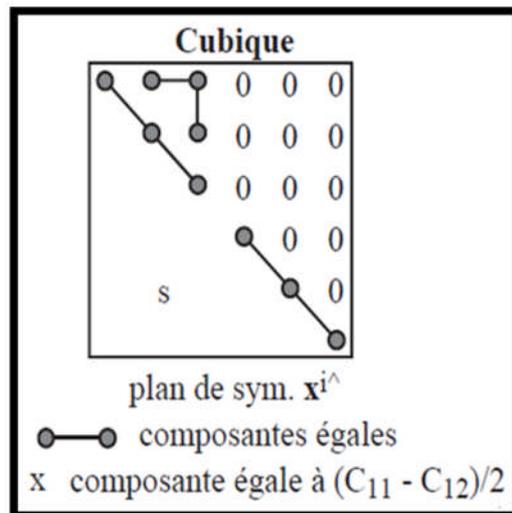


Figure 3.3 : Expression du tenseur d'élasticité pour un cube symétrique.

VI. La piézorésistivité dans le cas du silicium monocristallin :

1. Coefficients piézorésistifs :

Expliciter le phénomène piézorésistif revient à déterminer le changement de la résistance électrique dans un corps en fonction des contraintes mécaniques qu'il subit. Le tenseur des contraintes σ_{ij} est définie (dans l'annexe B) par :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}_0 \quad (3.19)$$

Où σ_i sont les contraintes normales et τ_i les contraintes dites tangentielles ou de cisaillement.

Dans le cas d'un matériau anisotrope cristallin comme le silicium, le champ électrique E peut être relié à la densité de courant J par le biais d'un tenseur 3x3 nommé tenseur de résistivité électrique. Du fait des symétries existantes dans le cristal, les éléments de ce tenseur sont dégénérés de telle sorte que celui-ci soit symétrique :

$$E_i = \rho_{ij} \cdot J_j \quad \text{et} \quad \rho_{ij} = \sigma_{ij}^{el^{-1}} \quad \text{avec} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.20)$$

Où σ_{ij}^{el} est la conductivité, E est le champ électrique ; J la densité de courant et ρ_{ij} le tenseur de résistivité.

Ou en écriture matricielle :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_6 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

La conductivité σ_{ij}^{el} joue simplement la propriété inverse de la résistivité. Lorsqu'on mesure les variations de conductivité sous l'effet d'une contrainte, on parle de la piézoconductivité.

Pour un cristal du silicium de type cubique ne subissant aucune contrainte mécanique, la résistivité suivant les axes $\langle 100 \rangle$ est la même et les termes non diagonaux du tenseur de résistivité sont nuls tels que $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_0$ et $\rho_4 = \rho_5 = \rho_6 = 0$ alors :

$$E_i = \rho_0 \cdot J_j \quad \text{ou bien :} \quad \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_0 & \rho_4 \\ 0 & 0 & \rho_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

Les composantes du tenseur de résistivité peuvent être exprimées en introduisant la valeur de la résistivité ρ_0 correspondant au cas où les contraintes mécaniques sont nulles :

$$\begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_0 \\ \rho_0 \\ \rho_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Dans un semi-conducteur du type silicium d'orientation (100), la variation de résistivité soumis à une contrainte est fonction du coefficient piézorésistif π et s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta\rho_{ij} / \rho_0 = \pi_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (3.24)$$

Avec $\Delta\rho_{ij} = \rho_{ij} - \rho_0$ où :

- ρ_{ij} et ρ_0 sont les composantes du tenseur de résistivité du silicium contraint et non contraint ;
- π_{ijkl} sont les coefficients de piézorésistivité ;
- σ_{kl} sont les éléments de la matrice de contrainte.

Les six composantes $\Delta\rho_i$ peuvent à leur tour s'exprimer en fonction des six composantes des contraintes mécaniques (σ_i et τ_i) en utilisant un tenseur 6x6 regroupant les différents coefficients piézorésistifs π_{ij} . Les deux tenseurs de résistivité ρ_{ij} et des contraintes σ_{kl} sont des tenseurs symétriques et pour une structure cristalline comme le silicium, ce tenseur est une matrice 6x6 symétrique où seulement trois coefficients piézorésistifs différents interviennent.

$$\frac{1}{\rho_0} \begin{pmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

π_{11} : Il permet de relier la densité de courant et le champ électrique qui sont colinéaires à la contrainte s'exerçant parallèlement à eux.

π_{12} : La densité de courant et le champ électrique étant toujours colinéaires, cette composante détermine l'effet provoqué, sur la résistivité du matériau, par l'application d'une contrainte perpendiculaire aux lignes de champ.

π_{44} : Ce coefficient, quant à lui représente l'effet piézorésistif dû à l'exercice d'une contrainte de cisaillement quant le courant et le champ électrique sont perpendiculaire l'un à l'autre.

Les coefficients piézorésistifs π_{ij} sont exprimés en Pa-1. Ils varient en fonction de la température, du type de dopage, de la dose implantée et peuvent être selon les cas positifs ou négatifs. Le tableau suivant donne les valeurs de ces coefficients pour le silicium monocristallin dans un repère tel que les axes sont orientés suivant les directions <100>. On définit alors les facteurs π_l et π_t les coefficients piézorésistifs longitudinal et transversal.

Tableau 3.1: Coefficients piézorésistifs pour le silicium monocristallin.

	$\pi_{11} (10^{-12} Pa^{-1})$	$\pi_{12} (10^{-12} Pa^{-1})$	$\pi_{44} (10^{-12} Pa^{-1})$
Dopage P ($1.5 \times 10^{15} / cm^3$)	+67,1	-10,8	+1408
Dopage N ($4 \times 10^{14} / cm^3$)	-1042	+544	-138

La loi d'ohm généralisée dans un repère (o x y z) lié aux axes cristallographiques [100] d'un matériau semi-conducteur s'écrit en notation tensorielle.

$$E_i = \rho_{ij} \cdot J_j + \pi_{ijkl} \cdot \rho_{ij} \cdot \sigma_{kl} \cdot J_j \quad (3.26)$$

Avec i, j, k et l variant de 1 à 3.

Où π_{ijkl} est le tenseur de piézorésistivité du matériau, ρ_{ij} est le tenseur de résistivité, σ_{kl} est le tenseur des contraintes.

Les trois composantes du champ électrique E s'écrivent donc comme suit :

$$\begin{cases} E_x = \rho_0 \cdot J_x + \rho_0 \cdot \pi_{11} \cdot \sigma_x \cdot J_x + \rho_0 \cdot \pi_{12} \cdot (\sigma_y + \sigma_z) \cdot J_x + \rho_0 \cdot \pi_{44} \cdot (J_y \cdot \tau_{xy} + J_z \cdot \tau_{xy}) \\ E_y = \rho_0 \cdot J_y + \rho_0 \cdot \pi_{11} \cdot \sigma_y \cdot J_y + \rho_0 \cdot \pi_{12} \cdot (\sigma_x + \sigma_z) \cdot J_y + \rho_0 \cdot \pi_{44} \cdot (J_x \cdot \tau_{xy} + J_z \cdot \tau_{yz}) \\ E_z = \rho_0 \cdot J_z + \rho_0 \cdot \pi_{11} \cdot \sigma_z \cdot J_z + \rho_0 \cdot \pi_{12} \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \cdot J_z + \rho_0 \cdot \pi_{44} \cdot (J_x \cdot \tau_{xz} + J_y \cdot \tau_{yz}) \end{cases} \quad (3.27)$$

Dans ces trois équations :

- Le premier terme représente simplement la loi d'Ohm dans le cas d'un conducteur ne subissant aucune contrainte mécanique ;
- Le deuxième met en évidence le phénomène de piézorésistivité dit de premier ordre ;
- Les deux derniers termes donnent une description physique complète en tenant compte des contraintes de cisaillement.

Jusqu'à présent, pour toutes les équations précédemment décrites, nous nous plaçons dans un repère dont les axes étaient confondus avec les axes <100> du cristal de silicium. Dans de nombreux cas, il peut être souhaitable et plus simple d'exprimer les coefficients piézorésistifs suivant une direction quelconque de l'espace. Ceci nous amène à définir les facteurs piézorésistifs longitudinal et transversal (notés π_l et π_t). Le facteur piézorésistif longitudinal sera relié aux contraintes ayant la même direction que le flux électrique alors que le facteur piézorésistif transversal sera relié aux contraintes perpendiculaires. Sans donner les développements mathématiques détaillés, les expressions de ces deux facteurs piézorésistifs sont les suivantes [19, 20]:

$$\begin{cases} \pi_l = \pi_{11} + 2 \cdot (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \cdot (l_1^2 \cdot m_1^2 + l_1^2 \cdot n_1^2 + m_1^2 \cdot n_1^2) \\ \pi_t = \pi_{12} - (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \cdot (l_1^2 \cdot l_2^2 + m_1^2 \cdot m_2^2 + n_1^2 \cdot n_2^2) \end{cases} \quad (3.28)$$

Où l_i , m_i et n_i sont les cosinus directeurs du nouveau système de coordonnées. Il peut être utile, dans cet exposé, de définir ce que sont exactement les cosinus directeurs. Les cosinus directeurs représentent les coordonnées des vecteurs unitaires <100> du réseau cristallin dans la nouvelle base vectorielle définie. Ainsi un vecteur (x y z) se référant à la base vectorielle du réseau cristallin aura comme coordonnées (x^* y^* z^*) dans la nouvelle base suivant l'équation ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 & m_1 & n_1 \\ I_2 & m_2 & n_2 \\ I_2 & m_3 & n_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Le Tableau 3.2 donne la valeur des coefficients longitudinal et transversal pour différentes combinaisons de directions dans le réseau cristallin.

Tableau 3.2 : Coefficients longitudinal et transversal pour différentes directions.

Direction longitudinale	π_l	Direction transversale	π_t
[1 0 0]	π_{11}	[0 1 0]	π_{12}
[0 0 1]	π_{11}	[1 1 0]	π_{12}
[1 1 1]	$\frac{1}{3} \cdot (\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44})$	[1 1 0]	$\frac{1}{3} \cdot (\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$
[1 1 0]	$\frac{1}{2} \cdot (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	[1 1 1]	$\frac{1}{3} \cdot (\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$
[1 1 0]	$\frac{1}{2} \cdot (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	[0 0 1]	π_{12}
[1 1 0]	$\frac{1}{2} \cdot (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	[1 1 0]	$\frac{1}{2} \cdot (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$

Dans un matériau semi-conducteur de type silicium, lorsque les contraintes constantes dans tout le matériau, on peut alors définir la variation relative de résistance par la relation suivante :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_l \cdot \sigma_l + \pi_t \cdot \sigma_t \quad (3.30)$$

Avec σ_l et σ_t les composantes longitudinales et transversales de la contrainte par rapport au flux de courant.

2. Facteurs de jauge :

Alors que les coefficients piézorésistifs longitudinal et transversal expriment la variation de résistivité électrique en fonction des contraintes mécaniques, les facteurs de jauge (qui sont des facteurs sans unité [19]) l'expriment en fonction des déformations du conducteur en tenant compte des considérations géométriques. Les déformations suivant les différentes directions de l'espace étant liées, il convient de discerner trois cas suivant que les contraintes mécaniques sont triaxiales, planaires ou uni-axiales. La définition des facteurs de jauge s'appuie sur l'expression fondamentale donnant la résistance électrique R d'un conducteur en fonction de sa géométrie et de sa résistivité ρ comme le montre la figure suivante :

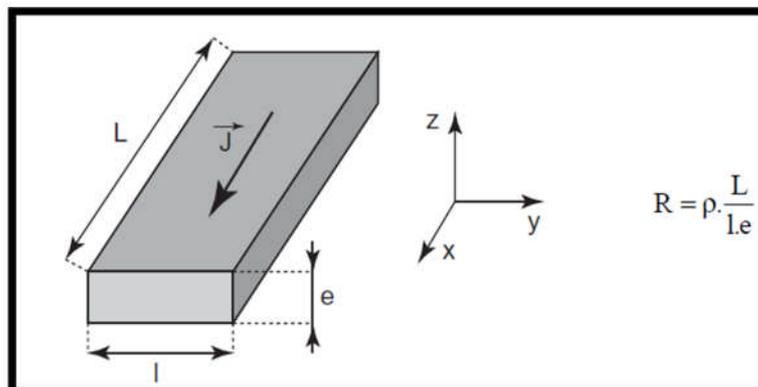


Figure 3.4: Système d'axes utilisé pour le calcul de la résistance électrique des jauges de contrainte.

Dans ce qui suit, nous considérerons toujours la direction x comme étant la direction longitudinale définie par la direction du flux électrique J, direction qui est confondue avec l'axe principal de la jauge. Les directions y et z seront donc les directions dites transversales.

2.1. Facteurs de jauge dans le cas des contraintes triaxiales :

Nous allons ici nous intéresser dans le cas où les contraintes mécaniques peuvent prendre des configurations quelconques, c'est-à-dire avoir des composantes non nulles quelle que soit la direction de l'espace. En considérant un matériau isotrope (cas du polysilicium), les déformations et les contraintes mécaniques sont liées par la relation vectorielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

Où E est le module d'Young et ν est le coefficient de Poisson du matériau isotrope considéré. Les contraintes mécaniques peuvent au même titre être exprimées en fonction des déformations comme ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} = \frac{E}{(\nu+1)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

En considérant le système d'axes spécifié sur la Figure 24, la variation de résistance électrique de la jauge piézorésistive peut s'exprimer de la manière suivante en fonction des contraintes mécaniques et des déformations :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta e}{e} \\ &= \pi_l \cdot \sigma_x + \pi_t \cdot (\sigma_y + \sigma_z) + \varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z \end{aligned} \quad (3.33)$$

Soit encore en regroupant les termes relatifs aux déformations longitudinales et transversales :

$$\frac{\Delta R}{R} = G_{long} \cdot \varepsilon_x + G_{trans} \cdot (\varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (3.34)$$

Où G_{long} et G_{trans} sont les facteurs de jauge piézorésistifs longitudinal et transversal dans le cas de contraintes triaxiales. On peut montrer que ces facteurs de jauge sont tels que :

$$G_{long} = \frac{E \cdot [(1-\nu) \cdot \pi_l + 2 \cdot \nu \cdot \pi_t]}{(\nu+1) \cdot (1-2\nu)} + 1 \quad (3.35)$$

$$G_{trans} = \frac{E \cdot [\nu \cdot \pi_l + \pi_t]}{(\nu+1) \cdot (1-2\nu)} - 1 \quad (3.36)$$

2.2. Facteurs de jauge dans le cas des contraintes planes :

Le cas des contraintes planes implique que toutes les contraintes mécaniques ne faisant pas partie du plan considéré (ici le plan (Oxy)) sont nulles, soit encore :

$$\sigma_z = 0 \quad (3.37)$$

Notons que les contraintes transversales seront donc, dans ce cas, celles prenant forme suivant la direction y. Le raisonnement est exactement le même si nous substituons le plan (Oxy) par le plan (Oxz) et les contraintes transversales suivant l'axe y par celles suivant l'axe z (la direction longitudinale considérée étant toujours la direction x).

Les contraintes planes sont notablement utilisées dans la théorie des plaques afin d'obtenir des solutions analytiques décrivant le comportement mécanique de différentes structures, comme par exemple les membranes, dans le cas de petites déflexions.

En considérant toujours le matériau comme isotrope, il est possible d'obtenir le système d'équations suivant à partir de la relation donnant les déformations mécaniques en fonction des contraintes :

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x) \\ \varepsilon_z = -\frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \end{cases} \quad (3.38)$$

La variation de résistivité électrique peut alors s'écrire telle que :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [(\pi_x + \nu \cdot \pi_y) \cdot \varepsilon_x + (\pi_y + \nu \cdot \pi_x) \cdot \varepsilon_y] \quad (3.39)$$

En prenant en compte les variations géométriques de la jauge, la variation relative de résistance électrique peut alors s'écrire sous la forme :

$$\frac{\Delta R}{R} = G_{plong} \cdot \varepsilon_x + G_{ptrans} \cdot \varepsilon_y \quad (3.40)$$

Où G_{plong} et G_{ptrans} sont les facteurs de jauge piézorésistifs planaires longitudinal et transversal définis tels que :

$$G_{plong} = \frac{\pi_l + \nu \cdot \pi_t}{1-\nu^2} \cdot E + \frac{1}{1-\nu} \quad (3.41)$$

$$G_{ptrans} = \frac{\pi_t + \nu \cdot \pi_l}{1-\nu^2} \cdot E + \frac{1-2 \cdot \nu}{1-\nu} \quad (3.42)$$

2.3. Facteurs de jauge dans le cas des contraintes uniaxiales :

Dans le cas des contraintes uniaxiales, ces dernières sont non nulles dans une seule et unique direction de l'espace qui peut être, suivant les cas, longitudinal ou transversal par rapport à l'axe de la jauge piézorésistive. Notons que nous considérons ici la direction y comme étant la direction transversale. Le raisonnement est exactement le même si nous considérons la direction z. Les contraintes étant uni-axiales, les déformations suivant les différentes directions de l'espace sont liées par la relation suivante :

$$\varepsilon_x = -\nu\varepsilon_y = -\nu\varepsilon_z \Leftrightarrow \frac{\Delta L}{L} = -\nu \frac{\Delta e}{e} = -\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (3.43)$$

a. Cas des contraintes longitudinales :

Cas d'une contrainte uniaxiale selon l'axe de la longueur de la résistance.

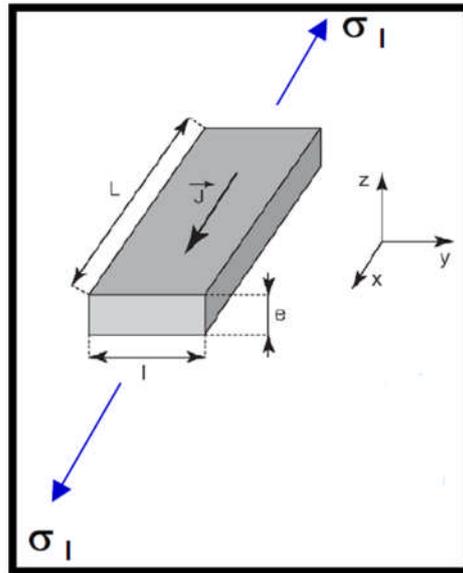


Figure 3.5: Cas des contraintes longitudinales applicables au cas d'une poutre.

Dans le cas où les contraintes mécaniques sont longitudinales (dans la direction x), la variation relative de résistance électrique peut s'exprimer comme :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta e}{e} \\ &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon_l [1 + 2\nu] = [\pi_l \cdot E + 1 + 2\nu] \cdot \varepsilon_x \end{aligned} \quad (3.44)$$

Dans cette dernière équation, nous pouvons déduire l'expression du facteur de jauge piézorésistif uni-axial longitudinal :

$$G_l = \pi_l \cdot E + 1 + 2 \cdot \nu \quad (3.45)$$

b. Cas des contraintes transversales :

Cas d'une contrainte uniaxiale perpendiculaire à l'axe de la longueur de la résistance.

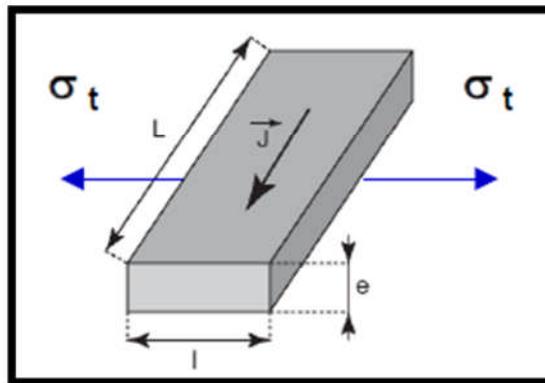


Figure 3.6: Cas des contraintes transversales applicables au cas d'une poutre.

Dans le cas où les contraintes mécaniques sont transversales (ici dans la direction y), la variation relative de résistance électrique peut alors s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta e}{e} \\ &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon_y [-\nu - 1 + \nu] = [\pi_t \cdot E - 1] \cdot \varepsilon_y \end{aligned} \quad (3.46)$$

Nous pouvons déduire le facteur de jauge piézorésistif uniaxial transversal :

$$G_t = \pi_t \cdot E - 1 \quad (3.47)$$

Les facteurs de jauge piézorésistifs uni-axiaux sont les facteurs de jauge les plus largement employés. Il n'est pas rare d'omettre l'adjectif « uni-axiaux » lorsque l'on se réfère à ceux-ci.

V. La piézorésistivité dans le silicium polycristallin :

Contrairement au silicium monocristallin, silicium polycristallin ne possède pas de structure cristalline propre. Il est déposé à basse pression et haute température. Il est formé d'un agglomérat de grains présentant chacun une direction cristallographique particulière. Les propriétés piézorésistives du poly-silicium sont de ce fait, mal appréhendées mathématiquement, même si cet effet est bien observé. De plus, les phénomènes de conduction au niveau des joints de grains semblent apporter une grande influence sur la résistivité globale d'un conducteur formé de polycristallin.

Les coefficients piézorésistifs longitudinal et transversal du silicium polycristallin peuvent s'exprimer simplement en moyennant ceux du silicium monocristallin sur toutes les directions possibles de l'espace. Notons que l'orientation des grains est ici supposée purement aléatoire et uniformément répartie. Les valeurs des coefficients piézorésistifs ont été ici estimées en effectuant une intégration par la méthode de Monte-Carlo sous Matlab [21].

$$\begin{cases} \langle \pi_l \rangle = \pi_{11} + 0,504.(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \\ \langle \pi_t \rangle = \pi_{12} - 0,238.(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \end{cases} \quad (3.48)$$

En ce qui concerne les facteurs de jauge piézorésistifs uni-axiaux explicités (voir annexes), leur expression dans le cas du poly-silicium est la suivante [21] :

$$\langle G_l \rangle = 1 + E. \langle \pi_l \rangle + 2. \langle \nu \rangle \quad \text{et} \quad \langle G_t \rangle = E. \langle \pi_t \rangle - 1 \quad (3.49)$$

Où $\langle G_l \rangle$ et $\langle G_t \rangle$ désignent respectivement les facteurs de jauge longitudinale et transversale et $\langle \pi_l \rangle$ et $\langle \pi_t \rangle$ respectivement les coefficients piézorésistifs longitudinal et transversal du silicium polycristallin en moyenne.

L'expression du facteur de jauge longitudinal fait intervenir la valeur du coefficient de Poisson du silicium moyennée sur toutes les directions de l'espace.

Il est maintenant possible de donner les valeurs numériques approchées des facteurs de jauge piézorésistifs dans le cas du poly-silicium en utilisant les données présentées dans le Tableau 3.1. Ces valeurs sont répertoriées dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3: Facteurs de jauge piézorésistifs uni-axiaux dans le cas du poly-silicium pour deux types de dopage différents.

	G_l (sans unité)	G_t (sans unité)
Dopage P ($1.5 \times 10^{15} / cm^3$)	+131,2	-58,68
Dopage N ($4 \times 10^{14} / cm^3$)	-53,50	+34,02

Ces formules prédisent des facteurs de jauge qui ont des valeurs absolues largement plus hautes que celles mesurées expérimentalement. Il semblerait que cet écart soit principalement dû au fait que la théorie ici présentée ne prend pas en compte les phénomènes physiques prenant naissance au niveau des joints de grains.

CHAPITRE 4

ETUDE ET SIMULATION D'UN ACCÉLÉROMÈTRE À DÉTECTION PIÉZORÉSISTIVE

I. Introduction :

Le principe fondamental de la dynamique permet d'établir une relation entre les trois grandeurs que sont force, masse et accélération. Les accéléromètres ont le deuxième plus grand volume de vente après les capteurs de pression, font tous appel à cette relation pour convertir l'accélération en force. La force est ensuite convertie en une grandeur électrique exploitable. Les principes physiques de conversion force-grandeur électrique sont nombreux et pratiquement tous ceux permettant la mesure d'une force peuvent être exploités pour la mesure d'une accélération.

Ces dernières années, les progrès des microtechnologies ont permis le développement d'accéléromètres intégrés de plus en plus performants. Est présenté ici le principe d'un accéléromètre silicium micro-usiné dont le principe de conversion utilise l'effet piézorésistif. Généralement, les accéléromètres piézorésistifs sont constitués d'une masse sismique suspendue avec un ou plusieurs poutres (1 ou 4 poutres) flexibles ; des jauges piézorésistives sont diffusés sur chaque poutre (souvent deux jauges) montées dans un pont de Wheatstone. La flexion de la poutre est traduite en déformation des jauges soit directement, soit indirectement en association avec un amplificateur mécanique. Les accéléromètres piézorésistifs se trouvent, principalement, dans nombreux téléphones mobiles (iPhone 4, iPhone 3GS), les systèmes d'analyse des vibrations, crash-test, les systèmes de navigation etc.

Dans ce chapitre, notre travail consiste à étudier et à développer un accéléromètre à détection piézorésistive ayant des sensibilités uniformes. Ce capteur, constitué d'une masse sismique lourde accrochée à quatre longues micropoutres, permet d'obtenir des sensibilités élevées. Une analyse statique de la distribution des contraintes longitudinales dans les micropoutres a été exécutée afin de déterminer les positions optimales des piézorésistances sur les quatre micropoutres.

II. Etude de la structure proposée :

II.1 Comportement statique de la structure:

Un accéléromètre piézorésistif ayant des sensibilités uniformes a été développé en utilisant la technologie MEMS. Ce capteur, constitué d'une masse sismique lourde et quatre longues micropoutres, permettent d'obtenir des sensibilités importantes.

1. Structure proposée :

Une configuration de flexion a été proposée afin de répondre à ces caractéristiques essentielles (figure 4.1). La structure est réalisée en silicium micro-usiné où une masse sismique centrale est suspendue à un bâti par quatre poutres flexibles identiques de masses négligeables.

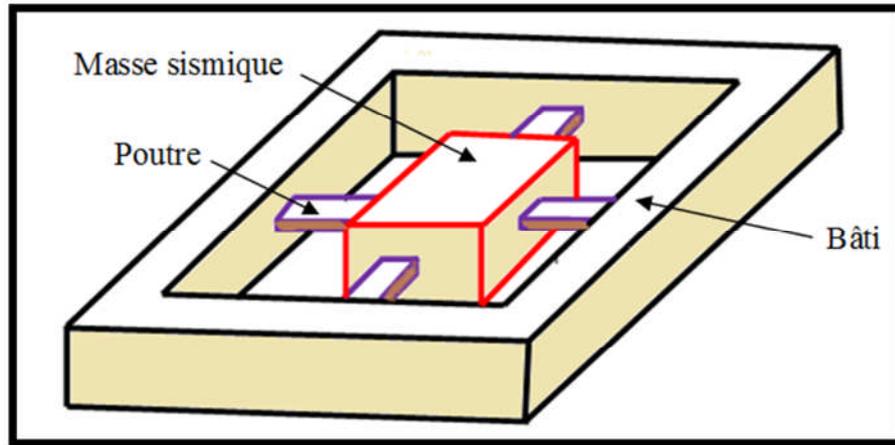


Figure 4.1 : Structure de l'accéléromètre.

2. Les paramètres de conception :

Le tableau (4.1), donne les dimensions des paramètres de la structure proposée :

Tableau 4.1: Dimensions des paramètres de la structure.

Paramètres	Longueur (L), Largeur (l), épaisseur (e)
Masse sismique	400x400x200 (μm)
Poutres	500x20x10 (μm)

Considérons deux poutres de même axe. Soit L la longueur de ces poutres et \vec{P} le poids de la masse sismique. Tout se passe comme si ce couple de poutres était soumis à la force $\vec{F} = \vec{P}/2$; le reste du poids étant supporté par l'autre couple de poutres (voir figure 4.2). Chaque couple de poutres se déformant sous l'action de la force $\vec{F} = \vec{P}/2$ appliquée en son milieu (voir figure 4.2).

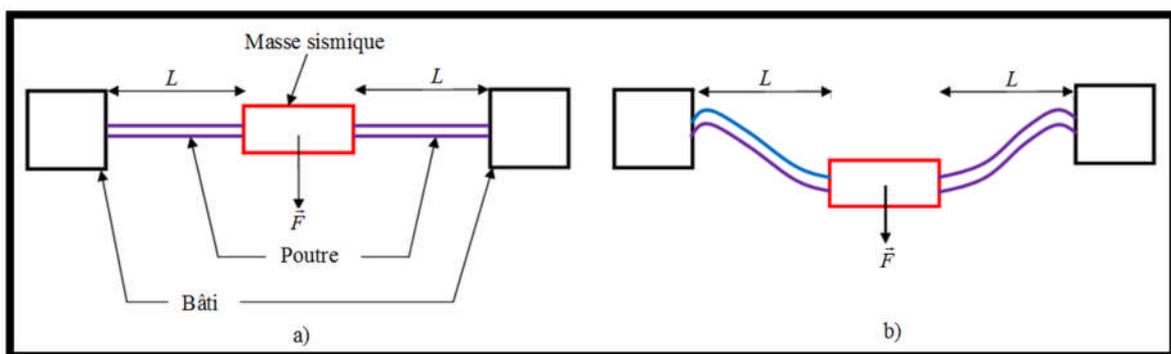


Figure 4.2 : Schéma simplifié a) Application de la force dans un couple de poutres b) Schéma de la déformation des poutres.

Sous l'action de la force appliquée, une distribution de contraintes prend naissance dans les poutres déformées (voir figure (4.3) où est représentée la contrainte σ_{yy}).

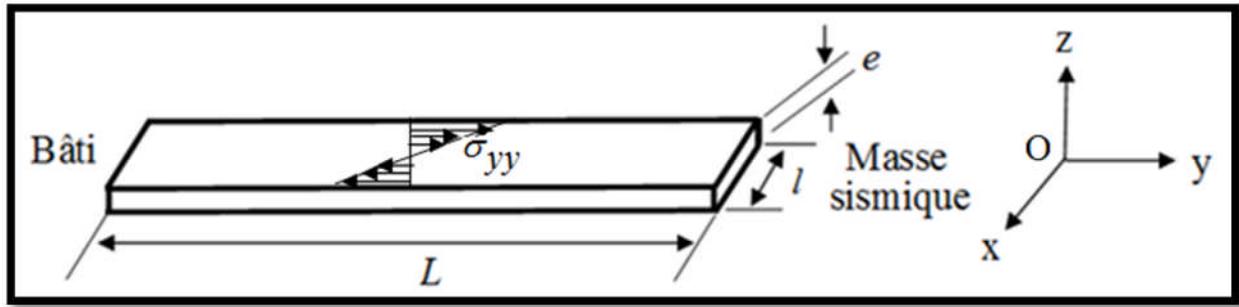


Figure 4.3 : Contraintes dans une des poutres.

Chaque poutre est de largeur l (direction Ox), de longueur L (direction Oy) et d'épaisseur e (direction Oz) comme le montre la même figure (4.3).

Le matériau constituant la structure est le polysilicium qui correspond à des propriétés suivantes :

- Module d'Young $E=169$ GPa ;
- Densité massique $d_i=2330$ Kg/m³.

D'après les paramètres du tableau (4.1) et les propriétés physiques du matériau utilisé, on peut calculer la valeur de la masse sismique par l'équation suivante:

$$m = \rho_s \cdot S = 74.56 \mu g \quad \text{avec } \rho_s = d_i \cdot e \text{ et } S = L^2$$

d_i : la densité du poly-silicium, e : l'épaisseur de la masse sismique, S : la surface de la masse, ρ_s : la masse par unité de surface.

La flèche maximale prise par les poutres (c'est-à-dire le déplacement selon z de leur extrémité en $y = L$) est donnée à l'équilibre par :

$$z(L) = \frac{FL^3}{2Ele^3} \quad (4.1)$$

En remarquant que : $z(G) = z(L) = z_{\max}$

Où G est le centre de gravité de la masse sismique.

À la surface d'une poutre, on a : $z = e/2$. Le moment quadratique I est par définition :

$$I = \int_{-l/2}^{+l/2} \int_{-e/2}^{+e/2} z^2 dz dx = \frac{le^3}{12} \quad (4.1)$$

On donne, relativement au schéma équivalent de la figure (4.3) le moment de flexion pour $0 \leq y \leq L$ défini par :

$$M_f = F(L - 2y)/4 \quad (4.2)$$

On en déduit la contrainte σ_{yy} et la déformation $\varepsilon_{//,+}$ à la surface de la poutre à la distance y du bâti :

$$\sigma_{yy}(y) = \frac{e}{2} \frac{M_f(y)}{I} = \frac{3F(L-2y)}{2le^2} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{//,+}(y) = \frac{\sigma_{yy}(y)}{E} = \frac{3F(L-2y)}{2le^2E} \quad (4.3)$$

La masse sismique offre une force pour une accélération de 1g :

$$F = m.a = 731.4 \cdot 10^{-6} \text{ N/g} \quad (4.4)$$

On peut calculer théoriquement la flèche maximale prise par les poutres (en $y=L$) d'après l'équation (4.4) en utilisant les dimensions de la structure on a :

$$z_{\max} = \frac{FL^3}{2ELe^3} = 13.52 \mu\text{m} \quad (4.5)$$

II.2 Principe de fonctionnement :

On se propose de mesurer l'accélération subie par la masse sismique, ici l'accélération de pesanteur, en utilisant sur chacune des poutres des jauges de contrainte alors situées à la surface des poutres.

Sur la face supérieure de chaque poutre, on diffuse deux jauges de contrainte alignées sur la direction Oy de la longueur de la poutre (voir figure (4.3)) : une à proximité du bâti (jauge de type P) et une à proximité de la masse sismique (jauge de type N) (voir figure (4.4)). On suppose que les jauges ont des valeurs identiques mais il y a quatre de type P et quatre de type N.

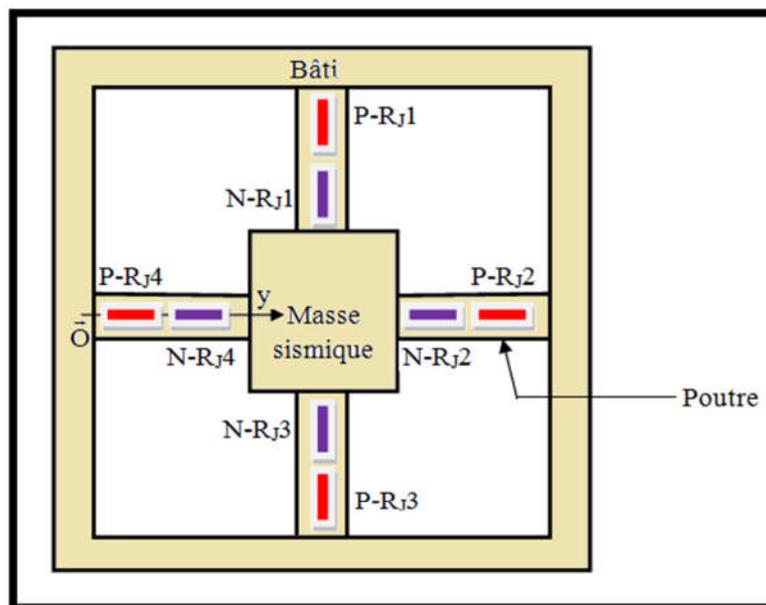


Figure 4.4 : Implantation des jauges de contrainte.

Les quatre poutres sont équipées de la même façon. Chaque deux jauges proches du bâti (jauge de type P) de deux poutres dans le même alignement sont connectées en série pour former la résistance R_1 et les deux jauges proches de la masse sismique (jauge de type N) montées en série pour former la résistance R_2 . La même façon avec les deux poutres perpendiculaires aux précédentes pour former respectivement les résistances R_3 (jauge de type P) et R_4 (jauge de type N) .

Les quatre jauges sont définies par :

$$R_1 = P-R_{J1} + P-R_{J3} \quad (4.6)$$

$$R_2 = N-R_{J1} + N-R_{J3} \quad (4.7)$$

$$R_3 = P-R_{J2} + P-R_{J4} \quad (4.8)$$

$$R_4 = N-R_{J2} + N-R_{J4} \quad (4.9)$$

Les variations de chaque résistance des jauges R_1 , R_2 , R_3 et R_4 sont données par les relations suivantes :

$$\Delta R_1 = P-\Delta R_{J1} + P-\Delta R_{J3} \quad (4.10)$$

$$\Delta R_2 = N-\Delta R_{J1} + N-\Delta R_{J3} \quad (4.10)$$

$$\Delta R_3 = P-\Delta R_{J2} + P-\Delta R_{J4} \quad (4.11)$$

$$\Delta R_4 = N-\Delta R_{J2} + N-\Delta R_{J4} \quad (4.12)$$

Dans le cas d'une contrainte longitudinale, la variation totale de la résistance est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = G_i \cdot \varepsilon = G_i \cdot \frac{\sigma_i^i}{E} \quad (4.13)$$

Où G_i est le facteur de jauge de polysilicium de type P ($G_i = +131,2$) et de type N ($G_i = -53,50$), $E=169GPa$ est le module d'Young du poly-silicium, ε est l'allongement relatif.

La sensibilité électronique est donnée par :

$$S = \frac{V_{mes}}{a} = \frac{\Delta R_i}{R_i} \cdot V_g \quad (4.14)$$

Où a est l'accélération, V_{mes} et V_g sont, respectivement, la tension mesurée et la tension d'entrée.

La contrainte longitudinale σ_l^i dans l'équation (4.13) est obtenue à partir de l'analyse de la contrainte en utilisant le logiciel ANSYS. C'est les contraintes à la surface des micropoutres.

III. Simulation et l'étude de sensibilité à l'aide du logiciel ANSYS :

La simulation par éléments finis (FEM) ont été menées à l'aide du logiciel ANSYS. Nous avons cependant considéré une structure à matériau homogène (un seul matériau de densité et de module d'Young équivalent). En étudiant la répartition des contraintes, les piézorésistances sont placées de telle sorte à éliminer les sensibilités transversales et d'obtenir des sensibilités maximales. En considérant que la masse sismique est chargée au milieu par une accélération sous forme d'une force, les conditions aux limites ont été appliquées.

III.1 Simulation :

La figure (4.5) montre la génération du maillage pour l'analyse par la méthode des éléments finis.

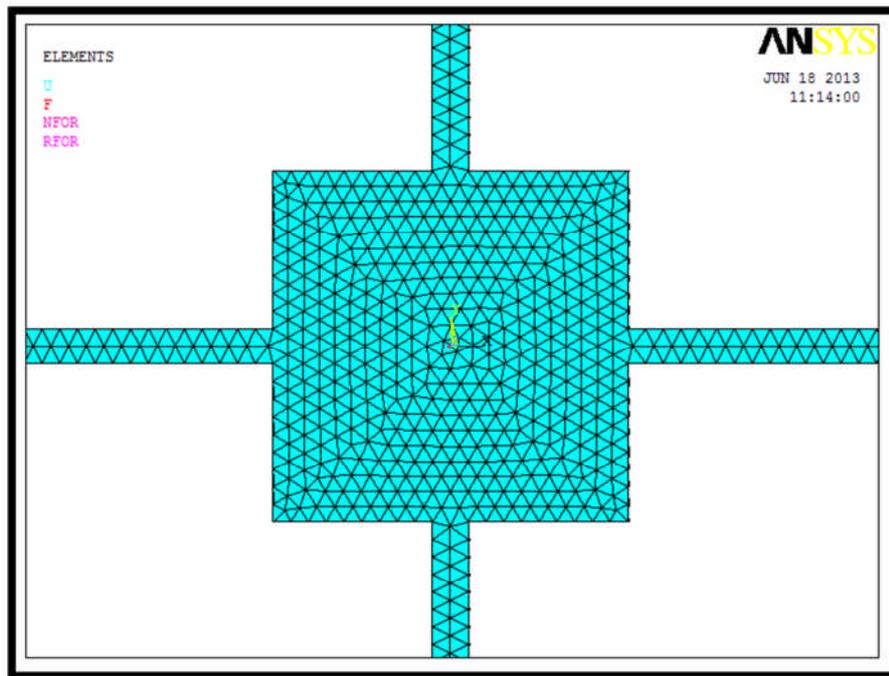


Figure 4.5 : La génération du maillage pour la méthode FEM.

L'application de l'FEA (Finite Element Analysis) pour analyser la distribution des contraintes dans les micropoutres en flexion.

La distribution des contraintes, à la surface de la structure de la micropoutre, provoquée par l'application de l'accélération suivant z, est représentée sur la figure (4.6). Le principe de détection du capteur est basé sur la caractéristique de la piézorésistance de type p et n. Lorsque le capteur est soumis à une contrainte de traction, la piézorésistance de type n diminue et augmente dans le cas d'une piézorésistance de type p.

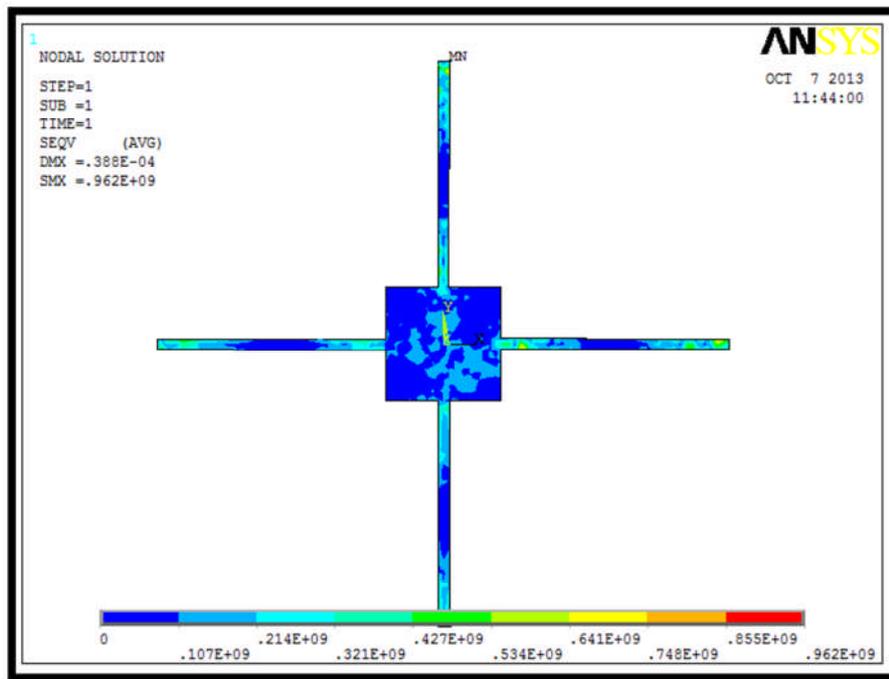


Figure 4.6 : La distribution des contraintes dans les micropoutres dans le cas d'une accélération de 1g suivant z.

Les figures (4.7) et (4.8) illustrent la déformation et le déplacement de la structure lorsqu'elle subit une accélération suivant Z.

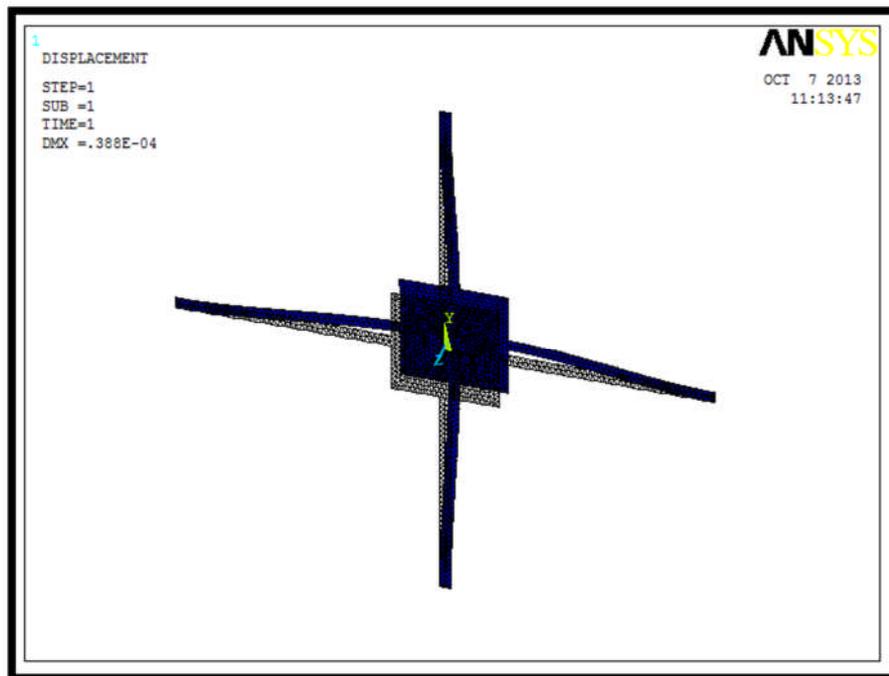


Figure 4.7 : Déformation de la structure causée par une accélération de 1g suivant z.

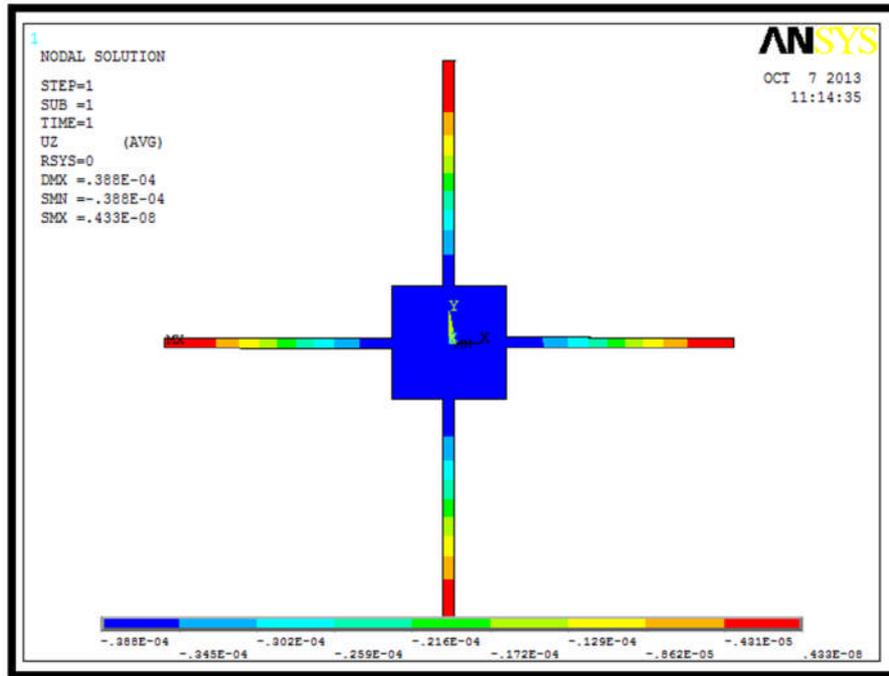


Figure 4.8 : Déplacement causé par l'accélération de 1g suivant z.

IV.2 Etude de la sensibilité :

La sensibilité est un paramètre important. Elle est directement liée, d'une part à la variation des piézorésistances en fonction des contraintes longitudinales calculées et analysées par ANSYS, et d'autre part au conditionneur associé c'est-à-dire au pont de Wheatstone utilisé.

Les résistances ainsi constituées sont montées en pont de Wheatstone complet (figure 4.9), en remplaçant les quatre résistances du pont par quatre jauges de contraintes identique en valeur mais de nature différente, deux piézorésistances de type n et les autres de type p dans la surface des poutres.

Ce type de montage permet, de faire une rejection de la tension d'alimentation, ce qui lui donne une sensibilité très élevée. D'autre part, il permet la compensation de la dérive thermique entre les piézorésistances dans le cas où il n'y a pas un gradient de température. Il permet aussi la compensation de tous les phénomènes parasites qui peuvent intervenir dans la structure [22].

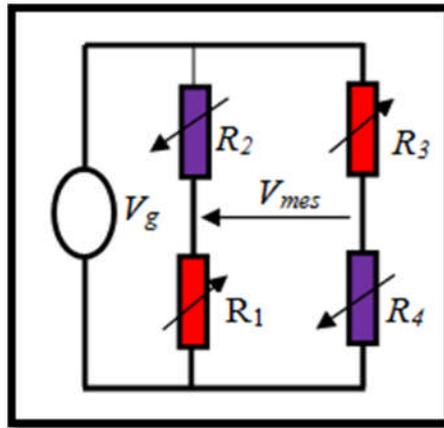


Figure 4.9 : Montage de conditionnement : Pont de Wheatstone complet pour calculer la tension de sortie.

A l'absence de l'accélération, le pont est équilibré et la tension de sortie est nulle. Dans ce cas on a :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = 1K\Omega \quad (4.15)$$

Si on applique une accélération, le pont va se déséquilibrer et les piézorésistances R_1 et R_3 de type p vont augmenter; R_2 et R_4 de type n vont diminuer :

$$R_1 = R + \Delta R_1 \quad (4.16)$$

$$R_2 = R - \Delta R_2 \quad (4.16)$$

$$R_3 = R + \Delta R_3 \quad (4.17)$$

$$R_4 = R - \Delta R_4 \quad (4.18)$$

Et la tension de sortie est donc :

$$V_{mes} = \frac{V_g}{4.R} \cdot (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4) \quad (4.19)$$

D'après les résultats de la simulation des contraintes longitudinales, et les équations (4.13), (4.19), on peut calculer et tracer la sensibilité du capteur et la tension de sortie en fonction de l'accélération appliquée suivant z.

On suppose que la tension d'entrée est : $V_g = 5v$.

La figure (4.10) représente la sensibilité $\Delta R_i/R_i$ du capteur pour des accélérations appliquées suivant l'axe z.

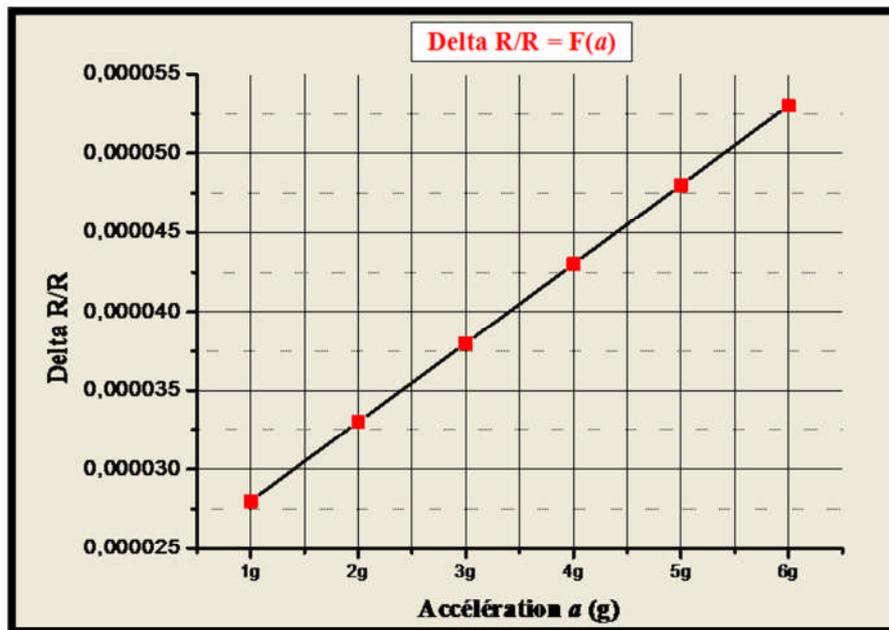


Figure 4.10 : Sensibilité en fonction de l'accélération suivant z.

La figure (4.11) représente la tension de sortie en fonction de l'accélération.

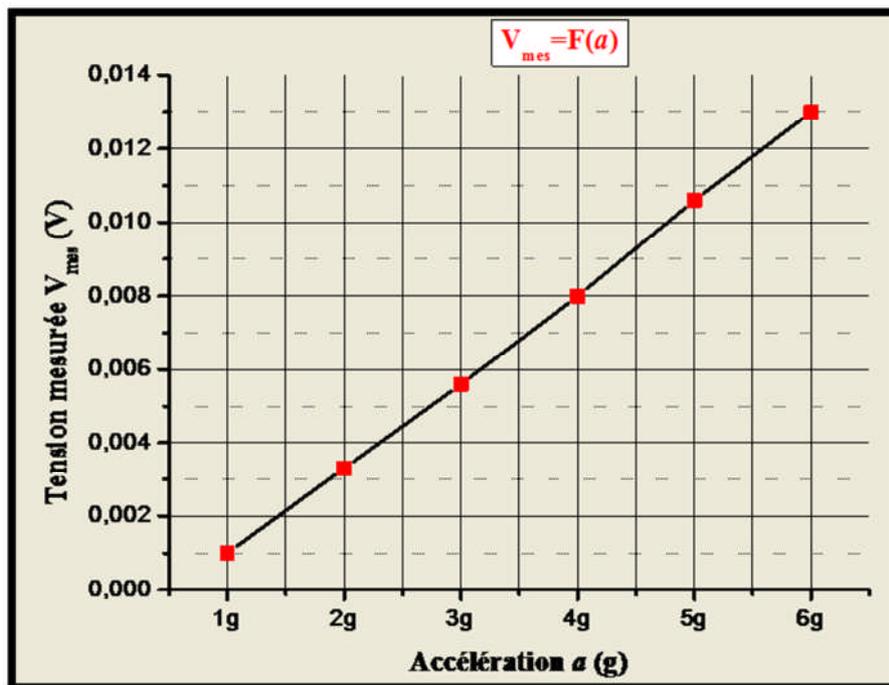


Figure 4.11 : Tension de sortie en fonction de l'accélération suivant z.

En analysant la figure représentant la sensibilité, nous avons constaté que la détection de l'accélération suivant z est sensible par l'accéléromètre de notre modèle. Nous avons également constaté que la sensibilité à l'accélération de ce capteur suivant z est linéaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale:

L'objectif de ce mémoire a consisté à faire la synthèse des accéléromètres microélectroniques en utilisant la technologie MEMS. Le travail consistait également, à modéliser le comportement statique de la structure de notre accéléromètre et déterminer leurs réponses statiques ainsi que leurs limites physiques.

Après un état de l'art sur la recherche bibliographie des MEMS, leurs applications et les différents types de transductions MEMS utilisés pour la mesure de l'accélération, nous avons choisis une transduction piézorésistive pour convertir le phénomène physique (une accélération) vers un signal électrique. Ceci a été fait pour des raisons de simplicité et de linéarité de la réponse.

Dans le troisième chapitre, nous avons fait une étude théorique de la piézorésistivité, avec une présentation des modèles de jauges piézorésistives en silicium monocristallin et en polycristallin. Il convenait d'utiliser un modèle simplifié ayant un paramètre unique appelé facteur de jauge G . Ce modèle lie la variation relative de résistance des jauges à l'allongement relatif qu'elles subissent. Cela nous conduit à rechercher l'expression des contraintes mécaniques dans la structure soumise à l'action d'une force ponctuelle appliquée aux milieux de la masse sismique.

Dans le quatrième chapitre, l'objectif a été la mesure de l'accélération verticale en utilisant la détection piézorésistive, par les variations de résistances de jauges de contraintes implantées sur les surfaces des poutres. Il s'agit de mesurer la déformation et les contraintes au niveau des poutres, qui sont fixées par une masse sismique d'un côté et l'autre par le bâti.

Nous avons proposé un conditionneur électronique pour la transformation de la déformation de la structure causée par l'accélération en un signal électrique. Ce circuit est composé d'un pont de Wheatstone à quatre jauges de contraintes. Une analyse par éléments finis sous ANSYS de la répartition des contraintes nous a permis de localiser les jauges, de calculer et tracer la sensibilité et la tension de sortie en fonction de l'accélération. Le tracé graphique a montré que la sensibilité à l'accélération est parfaitement linéaire.

ANNEXES

Annexe A : Les autres méthodes de transduction des accéléromètres

La majorité des accéléromètres fonctionne sur principe fondamental de la dynamique. Il existe différentes techniques pour mesurer le déplacement du corps d'épreuve. Il existe aussi différentes techniques pour transformer l'action de l'accélération sur le capteur en signal électrique.

1. La détection capacitive :

La détection capacitive est la méthode la plus utilisée à ce jour pour les accéléromètres. Le "corps d'épreuve" (terme désignant la partie du capteur sensible à l'accélération, le terme "masse sismique" est aussi employé) est une armature mobile. Ce condensateur est donc formé d'une armature fixe et une armature mobile susceptible de se déplacer sous l'action d'une force liée à l'accélération qu'on veut mesurer.

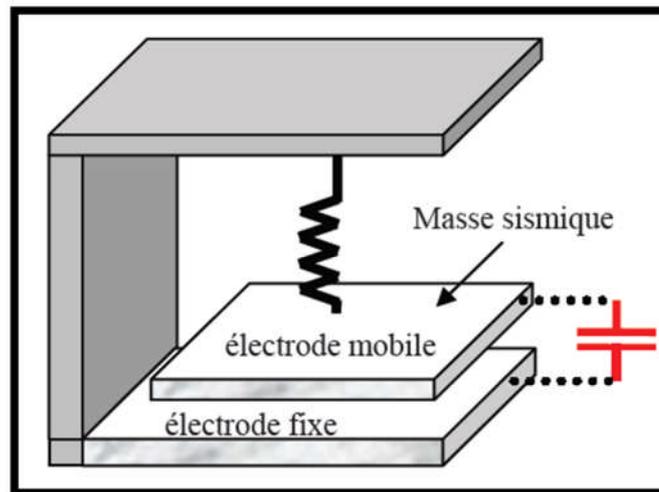


Figure A.1 : Principe de l'accéléromètre à détection capacitive.

Les structures capacitives possèdent les avantages suivants : une faible sensibilité aux variations de température, une grande sensibilité, une bonne réponse statique et une bonne performance en termes de bruit. De plus il est possible d'utiliser un retour de force sur les poutres à l'aide d'une force électrostatique. Ceci permet d'augmenter la robustesse du système face à des chocs élevés ou des vibrations de très grande amplitude, d'augmenter la linéarité et la stabilité, d'améliorer la réponse en fréquence, et enfin d'élargir la bande passante. L'utilisation d'une force électrostatique procure également un moyen de pratiquer le test automatique du capteur.

De par leur nature capacitive, ces structures sont sensibles aux interférences électromagnétiques. Le conditionnement de l'électronique devient ainsi plus complexe. Du fait de petites variations de capacité lors du fonctionnement, une électronique performante est exigée pour obtenir une bonne résolution. La variation de capacité en réponse aux accélérations est quant à elle non linéaire et il est nécessaire d'utiliser des architectures de pont capacitif différentiel.

3. La détection à base de piézojonction de transistor :

Les effets des contraintes mécaniques sur le comportement des transistors ont été longuement étudiés car des contraintes sur les circuits électroniques pouvaient naître lors de l'encapsulation.

La piézosensibilité des transistors bipolaires peut être utilisée à la place des jauges piézorésistives pour la mesure du signal. La contrainte imposée entraîne une repopulation des électrons dans le canal du transistor et modifie ainsi la mobilité des électrons.

L'utilisation des transistors, à la place de piézorésistances, comme élément sensible permet de réduire considérablement la taille de l'élément de transduction. Comparée à la détection piézorésistive, cette approche a l'avantage de réduire considérablement la puissance consommée, ce qui représente un atout pour certaines applications (applications médicales, notamment).

4. La détection piézoélectrique :

Un corps piézoélectrique est un corps ayant la propriété de présenter une différence de potentiel à ses bornes lorsqu'il est soumis à une contrainte, et réciproquement. Les matériaux utilisés sont le plus souvent le ZnO ou le PZT (Piezoelectric lead Zirconate Titanate). La propriété inverse de la piézoélectricité est utilisée pour effectuer une contre réaction sur la structure. On peut ainsi utiliser, pour ce type de capteur, un seul élément piézoélectrique (dans ce cas on échantillonne le temps et on le partage entre l'actionnement et la mesure) ou alors deux éléments piézoélectrique (ici les deux éléments forment un sandwich, l'un servant à l'actionnement et l'autre à la mesure). L'avantage de ce type de détection est une transduction à puissance consommée nulle (les variations de contraintes produisant un potentiel).

Les accéléromètres à détection piézoélectrique utilisent les deux types de gravure bulk micromachining et surface micromachining.

La détection piézoélectrique est utilisée pour des applications hautes fréquences (exemple : 98kHz de fréquence de résonance). La figure (2.7) présente un exemple d'accéléromètre à détection piézoélectrique.

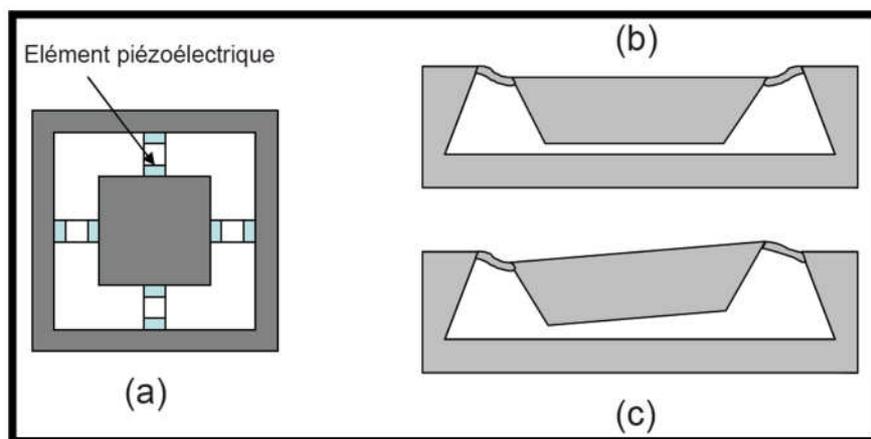


Figure A.2: Exemple d'accéléromètre trois axes à détection piézoélectrique (a) vue de dessus de la structure, (b) accélération verticale, (c) accélération latérale.

5. La détection à effet tunnel :

Développé par les chercheurs du JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena), les accéléromètres à effet tunnel (Electron Tunneling Accelerometer) exploitent l'effet utilisé dans les microscopes à effet tunnel. Cet effet se produit entre deux électrodes métalliques si la barrière isolante entre elles est suffisamment faible pour permettre une pénétration d'électrons. Un courant (1 à 2 nA) est imposé entre une pointe attachée à la structure mobile et une électrode fixe [14], l'espace les séparant étant de l'ordre de quelques angströms. On asservit la position de la pointe à l'aide d'une force électrostatique. Lors de l'accélération on mesure la tension nécessaire (pour générer la force électrostatique) au maintien à la même position de la pointe tunnel de manière à garder le courant de tunnel constant.

Néanmoins, à ce jour la technologie conventionnelle de fabrication ne permet pas d'exploiter tout le potentiel de ce type de capteur. En effet, le système final occupe trop de surface. De plus ce type de micro-capteur n'est pas compatible "full-CMOS" ; pour les accéléromètres sensibles verticalement, il nécessite un usinage des deux faces sur plusieurs wafers et un assemblage de ces wafers. Enfin ces accéléromètres ont un bruit en basse fréquence élevé.

6. La détection à structures résonantes :

Le principe consiste à mesurer la variation de la fréquence de résonance (due à l'accélération) d'une structure en oscillation.

Les premiers accéléromètres basés sur ce type de détection ont été présentés en 1990, les premiers accéléromètres résonnant étaient micro-usinés dans du quartz. Généralement, les accéléromètres micro-usinés dans le silicium transfèrent la force inertielle de la masse d'épreuve à une force axiale sur la structure résonante, modifiant ainsi sa fréquence de résonance.

Pour faire osciller le corps d'épreuve, les techniques d'actionnement sont nombreuses : piézoélectrique, thermique, optothermique.

L'avantage de ce type de détection est que la mesure est directement digitale. Cette mesure par la résonance permet de plus un test simple du fonctionnement de la structure mécanique. Selon le dispositif conçu, il est possible de mesurer les accélérations verticales ou latérales. Le capteur est constitué d'un résonateur et d'une masse sismique mobile (latéralement ou verticalement). Le résonateur est un pont suspendu mis en oscillation thermiquement.

7. La détection optique :

L'association de l'optique et du micromachining, exploitant les avantages des deux domaines, conduit à des capteurs miniatures insensibles au bruit d'interférence électromagnétique avec une réponse à l'accélération très linéaire. Un autre avantage de ce type de capteur est de permettre la mesure à distance (la source de lumière et le photo-détecteur peuvent se trouver loin de la zone à mesurer).

Les inconvénients de ces capteurs sont la nécessité d'une source lumineuse externe stable, l'exigence d'un alignement parfait des fibres optiques et un coût encore trop élevé.

Aujourd'hui, excepté pour quelques capteurs de pressions pour des applications hautes températures, aucun capteur MEMS à fibre optique n'est compétitif sur le marché. Ces capteurs sont principalement destinés à des fonctionnements en environnement hostile (hautes températures, hautes interférences électromagnétiques ...).

8. La 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 séparant 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 d'autant plus important que la distance à la masse est faible. Le flux dépend de l'accélération, 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. Il est basé sur le principe du transfert de chaleur par convection, d'une résistance chauffante vers des thermistances (ou des thermocouples) placées de part et d'autre de l'élément chauffant. Les trois structures sont suspendues sur des ponts (ici pas de masse mobile contrairement à tous les autres types de détection décrits plus haut, donc plus de robustesse, de fiabilité). La figure (2.8) décrit cet accéléromètre. La résistance chauffante crée une distribution symétrique de la température. Lorsqu'une accélération est appliquée, la distribution devient asymétrique et les détecteurs latéraux permettent de mesurer la différence de température.

La cavité dans le silicium permet d'isoler thermiquement la résistance chauffante, occasionnant ainsi une diminution de l'énergie consommée. La fréquence de coupure de ces accéléromètres convectifs est de l'ordre de quelques centaines de hertz. Pour augmenter la bande passante (qui dépend de la constante thermique) il faut réduire les dimensions de la cavité, augmenter la pression et changer la nature du gaz.

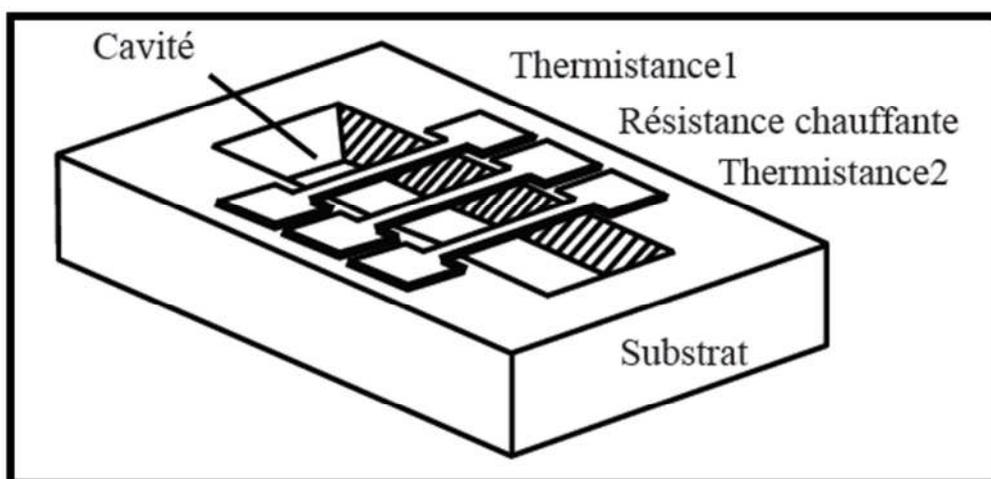


Figure A.3 : Accéléromètre à détection thermique.

Annexe B : Tenseur de déformation et contrainte

1. Tenseur des contraintes :

Une contrainte mécanique représente une force F_n exerçant sur un matériau par unité de surface s . Elle est exprimée en Pa ou N/m^2 dans le système international. On définit la contrainte de traction ou de compression, suivant le sens de cette force, telle que :

$$\sigma = \frac{F_n}{s} \quad (\text{B.1})$$

Où F_n est la force appliquée, s est la surface exercée par la force et σ est une contrainte mécanique.

Si la force F_t s'exerce parallèlement à la surface S (Figure B.1), on définit la contrainte τ de cisaillement telle que :

$$\tau = \frac{F_t}{S} \quad (\text{B.2})$$

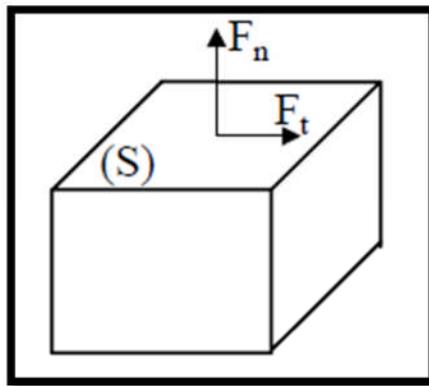


Figure B.1 : Définition des contraintes.

Pour représenter l'état général de contrainte en un point donné d'un matériau, on utilise le formalisme tensoriel. Le tenseur de contrainte, noté σ_{ij} , est représenté à l'état général de rang 2 et s'écrit dans une base des axes cristallographiques notée 0 :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}_0 \quad (\text{B.3})$$

Les contraintes de type σ_{ii} sont appelées contraintes normales alors que les contraintes de type σ_{ij} avec $i \neq j$ sont des contraintes de cisaillement (tangentes). L'état général de contrainte autour d'un point M, représenté un élément cubique infinitésimal est donné sur la figure B.2.

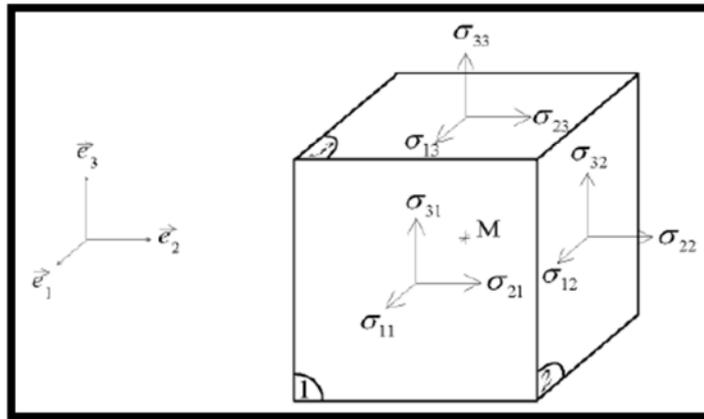


Figure B.2 : Définition des composantes du tenseur des contraintes mécaniques.

Le tenseur des contraintes σ_{ij} est symétrique ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$) à l'équilibre donc il possède six composantes indépendantes.

2. Tenseur des déformations :

La déformation est la modification que subit un corps sous l'effet de la force (sous l'effet d'une contrainte mécanique) qu'il subit. Elle est le rapport de la variation Δl d'une dimension à la valeur initiale l de cette dimension :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{B.4})$$

Cette déformation ne se fait pas uniquement dans la direction de la contrainte. Dans le cas d'une déformation disparaît en même temps que la force produite, On a une déformation élastique.

Sous l'action d'une contrainte de traction, un cube d'arête L s'allonge pendant que sa section diminue (figure B.3).

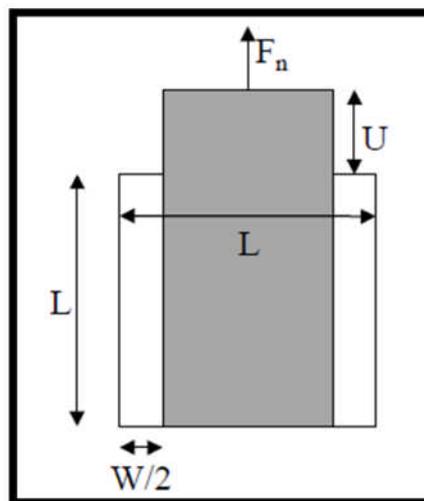


Figure B.3 : Déformation d'un matériau sous contrainte uni-axiale.

On définit dans ces conditions la déformation longitudinale en traction ε_n telle que :

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{//} = \frac{U}{L} \quad (\text{B.5})$$

Et la déformation latérale ε_l telle que :

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{\perp} = \frac{-W}{L} \quad (\text{B.6})$$

Dans le cas d'une contrainte de cisaillement appliquée, on définit la déformation en cisaillement ε_c comme étant le rapport du déplacement latéral W et de la longueur de l'arête L (figure B.4).

$$\varepsilon_c = \frac{W}{L} = \tan \theta \approx \theta \quad (\text{B.7})$$

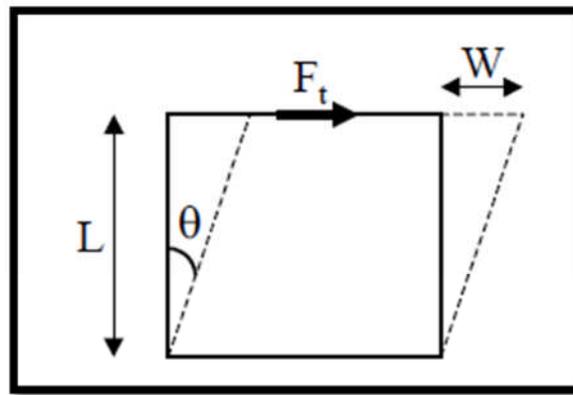


Figure B.4 : Déformation en cisaillement.

Les déformations représentent les variations de géométrie d'un segment donné suivant toute les directions. Elles s'expriment sans unité et sont représentées par un tenseur symétrique de rang 2 (et possèdent par conséquent six composantes indépendantes) :

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}_0 \quad (\text{B.8})$$

Les déformations ne dépendent donc pas seulement de l'intensité et du type de contrainte, mais également des propriétés mécaniques du matériau qui se déforme.

Annexe C : Les jauges métalliques et les jauges en couches épaisses

1. Les jauges métalliques :

1.1 Généralité :

La résistivité de la plupart des métaux décroît quand la pression à laquelle ils sont soumis augmente. En fait, c'est la diminution du volume et donc des distances interatomiques, entraînée par la pression qui est à l'origine de la décroissance de ρ . En effet, la résistivité du métal est due, en particulier, à la diffusion des électrons libres par les atomes du réseau. La probabilité de diffusion est d'autant plus élevée que l'amplitude des oscillations des atomes est grande. Une réduction de la maille du réseau cristallin, en rapprochant les atomes, entraîne un accroissement de leurs forces de liaison et par conséquent une diminution de l'amplitude de leurs oscillations : la probabilité de diffusion des électrons libres diminuant, il en est de même de la résistivité.

La variation de la résistivité s'exprime dans les jauges métalliques par la relation de Bridgman :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = C \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad \text{où } V = S \cdot nl \quad (\text{C.1})$$

Où C est la constante de Boltzmann et V est le volume.

Dans le cas général, une jauge est constituée d'une grille formée par un conducteur filiforme de résistivité ρ , section S longueur nl , l étant la longueur d'un brin et n leur nombre ; n généralement compris entre 10 et 20 pour les jauges métalliques et égal à 1 pour les jauges semi-conductrices. Il en résulte que la jauge subit une déformation $\Delta l/l$ identique dans la direction parallèle aux brins.

La résistance de la jauge peut se définir de la façon suivante :

$$R = \rho \frac{nl}{S} \quad (\text{C.2})$$

Après dérivation de cette expression, il vient :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (\text{C.3})$$

Dans les jauges métalliques, la déformation longitudinale du fil entraîne une variation de ses dimensions transversales : cotés a et b dans le cas d'une section rectangulaire, diamètre d pour une section circulaire :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{\Delta b} = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.4})$$

Où ν est le coefficient de Poisson.

Il en résulte, puisque $S = a.b$ ou $S = \frac{\pi}{4}.d^2$ alors :

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.5})$$

Les déformations transversales et longitudinales sont proportionnelles.

Les jauges métalliques sont disponibles dans le commerce sous forme de patches qui peuvent être appliqués directement sur les surfaces dont on veut évaluer la déformation.

Il y a deux types de jauges métalliques :

- **Jauges à fil (figure C.1.a) :**

Le diamètre du fil est de l'ordre de $20 \mu\text{m}$ et l'épaisseur du support d'environ 0.1mm pour le papier et de 0.3 mm pour le plastique (polyimide ou époxyde).

- **Jauges à trame pelliculaire (figure C.1.b) :**

Elles sont réalisées selon les procédés de fabrication des circuits imprimés, ce qui permet :

- Une réduction des dimensions autorisant des mesures plus ponctuelles lorsqu'il y a un gradient de déformation.
- Une optimisation du dessin de la jauge avec un particulier un élargissement des parties transversales diminuant leur résistance et par cela, la contribution des déformations transversales.
- Un accroissement de la surface latérale des brins, à résistance constante, assurant un meilleur contact thermique avec la structure et une évacuation plus facile de l'énergie joule du courant de mesure.
- Une épaisseur de la trame et du support plus faible (20 à $35 \mu\text{m}$ au total) réduisant l'erreur due à la distance grille- surface de la structure de la structure, notamment dans le cas des mesures en flexion.

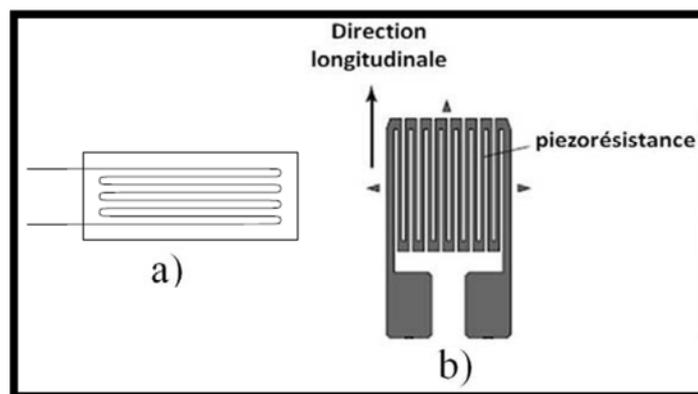


Figure C.1 : Types de jauges métalliques : a) jauge à fil ; b) jauge à trame pelliculaire.

Dans le cas des capteurs micro-usinés ou issus des procédés de fabrication de microsystèmes, la taille des systèmes ne permet pas le report de jauge par collage ou toute autre méthode d'assemblage. Les jauges de déformation sont alors fabriquées directement sur des structures mécaniques telles que des membranes ou des micropoutres. Les

piézorésistances métalliques, par exemple, sont déposées par évaporation ou pulvérisation puis structurées par photolithographie.

1.2 Caractéristiques principales des jauges métalliques :

a. Résistance :

La résistivité ρ des alliages utilisés doit être suffisamment élevée pour que les valeurs de résistance recherchées (100 à 5000 Ω) puissent être obtenues sans longueur de fil excessive, aboutissant à des dimensions exagérées de la jauge, et sans réduction trop importante de la section qui imposerait une diminution du courant de mesure et donc de la sensibilité.

b. Facteur de jauge :

Les valeurs les plus courantes du facteur de jauge sont voisines de 2 ± 0.1 à l'exception de l'alliage Isoélastique et du platine-tungstène qui ont un facteur de jauge respectivement voisin de 3,5 et 4,1.

La variation relative de la longueur du support dans les jauges métalliques se traduit par l'application d'un effort F sur le support métallique en induisant une variation relative de la résistance qui définit par la relation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = K.\varepsilon \quad (C.6)$$

2. Les jauges en couches épaisses :

Les résistances et piézorésistances en couche épaisses sont des matériaux polyphasés constitués de grains d'oxydes conducteurs (RuO₂ et WO₃ sont particulièrement utilisés), à hauteur de 10 à 15% massique, dispersés dans une phase vitreuse d'oxydes isolants (B₂O₃, SiO₂, PbO). La microstructure constituée des grains d'oxydes conducteurs noyés dans la phase vitreuse diélectrique est très complexe. Les propriétés diélectriques de la phase vitreuse sont modifiées au niveau des zones intergranulaires, suite à des interactions avec la phase conductrice.

Dans le cas de la réalisation de piézorésistances en couches épaisses, le choix de la composition est dicté par l'optimisation du facteur de jauge (GF) tout en maintenant un coefficient en température (CTR) faible. Ce choix est d'autant plus difficile que les phénomènes de transport au niveau des résistances en couches épaisses, incluant le phénomène de piézorésistivité sont encore mal compris contrairement au cas des métaux et semi-conducteurs. Cependant, les transports de charges sont globalement imputés à trois phénomènes de conduction : la conduction métallique entre les grains conducteurs en contact direct, la conduction par effet tunnel pour les particules séparées d'une distance voisine de 1nm et la conduction par sauts d'électrons qui reste valable pour des barrières vitreuses allant jusqu'à 10nm.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographie :

Bibliographie :

[1] **David Peyrou** « Etude Théorique Et Expérimentale Des Techniques D'assemblage Et De Mise En Boitier Pour L'intégration De Microsystèmes Radio-Frequences » Thèse de Doctorat- Université Paul Sabatier de TOULOUSE.

[2] <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

[3] **Olivier. FRANCAIS.** « Qu'est ce qu'un MEMS ? ». Groupe ESIEE.
<http://www.esiee.fr/~francaio>.

[4] **O. Français, T. Bourouina** « Les microsystèmes : Introduction » Ecole nationale supérieure Electronique, Informatique et Radiocommunication, Université de Bordeaux.

[5] **Alain Foucaran** « Cours Capteurs Et Microsystèmes » Université Montpellier II.

[6] **Farès. Tounsi.** « Microphone électrodynamique MEMS en technologie CMOS : étude, modélisation et réalisation ». Thèse de Doctorat-Institut Polytechnique de Grenoble.

[7] **Riadh. Lakhmi.** « Etude de micropoutres sérigraphiées pour des applications capteurs ». Thèse de Doctorat- l'Université Bordeaux I.

[8] **David. BOUYGE.** « Systèmes lasers impulsionnels compacts et dispositifs hyperfréquences accordables bases sur l'intégration de composant MEMS ». Thèse de Doctorat- l'Université de Limoges. Octobre 2007.

[9] MEMS clearinghouse/what is MEMS technology? <http://www.memsnet.org/mems/what is.html>.

[10] **Olivier. Français** « Capteurs et électronique associée (partie II : acquisition des données) » 2000.

[11] **G. Asch, coll** « Les capteurs en instrumentation industrielle » 6^e édition Dunod / Bordas, Paris, 1982.

[12] **Michel. Lavabre, Fabrice. Baudoin.** « Capteur : Principes et utilisations DUT-BTS Ecoles d'ingénieurs ». Cours et exercices résolus. 2^e édition revue, corrigée et augmentée.

[13] **Aboubacar Chaehoi** « Conception et Modélisation de MEMS monolithique CMOS en technologie FSBM : Application aux accéléromètres » Thèse de Doctorat – Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc – 2005.

[14] **Allian. Tech** « Généralités sur les accéléromètres ». Des experts en mesures dynamiques. 2010.
http://www.alliantech.compdfcoin_des_expertsgeneralite_sur_accelerometrie.pdf.

[15] Épreuve commune de tipe- Partie D. Titre : Les micro-accéléromètres.
<http://pcsi-si.perso.sfr.fr/accelerometre.pdf>

- [16] **Riadh. LAKHMI.** « Etude de micropoutres sérigraphiées pour des applications capteurs ». Thèse de doctorat-Université Bordeaux I. Spécialité : ELECTRONIQUE.
- [17] **C.S. Smith** “Piezoresistance effect in Germanium and Silicon” Physical Review, Vol.94, n°1, p.42, April 1954.
- [18] **Florent. Rochette** « Étude et caractérisation de l’influence des contraintes mécaniques sur les propriétés du transport électronique dans les architectures MOS avancées » Thèse de doctorat- Institut National Polytechnique De Grenoble, 26 septembre 2008.
- [19] D.A. Johns, K. Martin, "Analog Integrated Circuit Design", John Wiley & Sons, 1996.
- [20] R. Gregorian, G.C. Temes, "Analog MOS Integrated Circuits for Signal Processing", John Wiley & Sons, 1986.
- [21] **Fabien Parrain** « Capteur intégré tactile d’empreintes digitales à microstructures piézorésistives » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 02 décembre 2002.
- [22] **N. TIEN ANH, T. DUC TAN** “A Tree-Axis Piezoresistive Accelerometer with Uniform Axial Sensitivities” Cau Giay, Ha Noi, Viet Nam, Copyright © 2011 IEEE.