

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE
Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Mécanique

Thème :

Etude de l'influence des paramètres géométriques et des matériaux sur la réponse électromécanique des structures BAW.

Réalisé par :

Mr A.MERMITTE

Devant le jury :

A. SMAILI	Professeur	ENP	Président
S. RECHAK	Professeur	ENP	Rapporteur
A. ACHELI	Ingénieur de recherche	CDTA	Rapporteur
R. SERHANE	Attaché de recherche	CDTA	Rapporteur
M. TAZI	Maitre assistant	ENP	Examineur

Promotion : Juin 2013

REMERCIEMENTS

En premier lieu je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la force pour réaliser ce travail.

Ma profonde gratitude et sincère reconnaissance vont tout d'abord à Mr. ACHELI et Mr. SERHANE ainsi qu'au professeur RECHAK qui ont bien voulu m'encadrer. Je les remercie pour leur disponibilité, leur aide, et les précieux conseils qu'ils m'ont prodigués.

Je remercie les membres du jury Messieurs A. SMAILI ainsi que M. TAZI, Professeurs à l'ENP, pour l'honneur qu'ils me font de juger mon travail.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect et ma grande considération.

Je remercie tous les membres de l'équipe MEMS du centre de développement des technologies avancées pour m'avoir intégré dans leur équipe et pour leur aide.

DEDICACES

A la mémoire de mon frère Mohamed Nasredine

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi,
et qui consacrent leur vie au bien être et à la réussite de leurs enfants*

A mes deux sœurs et a mon cousin Sofiene

A ma très chère Saima

A toute ma famille

A tous mes amis (ies)

Qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de ce projet

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail

Toute ma reconnaissance

Et tout mon amour.

Amine.

ملخص

في هذه المخطوطة، نقدم دراسة تأثير الخصائص الهندسية و المواد على الإجابة الكهر ميكانيكية لدى الهياكل من نوع BAW باستخدام Comsol Multiphysics®. ولهذا، قمنا بدراستان: دراسة الغشاء البيزو كهربائي ثم دراسة الأقطاب. تحليل النتائج المحصل عليها، يساعدنا في إقامة علاقة بين اختبار المادة و اختبار الخصائص الهندسية، للحصول على التردد من ناحية السمك للغشاء، الذي يؤدي إلى القبول الكهربائي الأكبر للهيكلة نتيجة تردد معين.

الكلمات الرئيسية: دراسة، تأثير، الهندسية، المواد، الكهر ميكانيكية، الهياكل، الغشاء، البيزو كهربائي، الأقطاب، علاقة، التردد، السمك، القبول.

Résumé

Ce travail présente une étude de l'influence des paramètres géométriques et des matériaux sur la réponse électromécanique des structures BAW sous Comsol Multiphysics®.

Pour y parvenir, deux études ont été faites : l'étude de la couches piézoélectrique et l'étude des électrodes.

L'analyse des résultats obtenues nous a permis d'établir une correspondance entre le choix du matériau et de la géométrie afin d'obtenir une résonance en mode épaisseur qui induit à une admittance maximale du résonateur pour une fréquence d'excitation précise.

Mots clés: étude, influence, géométrique, matériaux, réponse, électromécanique, structure, BAW, Comsol, piézoélectrique, électrode, analyse, résonance, épaisseur, admittance, résonateur, fréquence.

Abstract

This work presents a study of the influence of geometrical parameters and the materials on the electro-mechanical response of the BAW structures in Comsol Multiphysics®.

To achieve this, two studies have been made: the study of piezoelectric layers and then the study of the electrodes.

The analysis of the obtained results allowed us to establish a correspondence between the choice of material and geometry in order to obtain a thickness resonance which induces to a maximum admittance of the resonator for a specific excitation frequency.

Keywords: study, influence, geometrical, parameters, materials, electromechanical, piezoelectric, layers, electrodes, correspondence, thickness, resonance, admittance, resonator, frequency.

Table des matières

Introduction générale.....1

Chapitre I : Introduction aux microsystèmes

I.1. Introduction..... 5

I.2. Définition d'un microsystème..... 5

I.3. Succès des microsystèmes..... 6

I.4. Domaine d'application des microsystèmes..... 6

 I.4.1. L'automobile..... 6

 I.4.2. Le spatial et l'avionique..... 7

 I.4.3. Les télécommunications..... 8

I.5. Notion de salle blanche..... 8

I.6. Conception des microsystèmes..... 9

I.7. Technologies de micro-fabrication des microsystèmes..... 9

I.8. Principe général de fabrication des microsystèmes..... 10

 I.8.1. Le nettoyage..... 11

 I.8.2. Le dépôt de la résine..... 11

 I.8.3. La lithographie..... 12

 I.8.4. La gravure..... 13

 I.8.5. Micro usinage de volume..... 13

 I.8.6. Micro usinage de surface..... 13

 I.8.7. Encapsulation (Packaging) en Microsystèmes..... 14

I.9. Matériaux utilisés en microsystèmes..... 14

 I.9.1. Le silicium..... 15

 I.9.2. Dérivés de silicium..... 15

I.10. Possibilité des logiciels..... 16

 I.10.1 Autres logiciels..... 17

I.11. Conclusion..... 18

Chapitre II : Généralités sur les résonateurs piézoélectriques

II.1. Introduction..... 20

II.2. Principe de fonctionnement d'un résonateur..... 20

II.3. Géométries et modes de vibration..... 22

II.4. Notion de piézoélectricité..... 22

II.5. Les matériaux piézoélectriques.....	24
II.6. Les résonateurs piézoélectriques	27
II.6.1. High Overtone Bulk Acoustic Resonators	27
II.6.2. Film Bulk Acoustic Resonators (FBAR)	28
II.6.2.1. Résonateur suspendu.....	28
II.6.2.2. Résonateur à gap d'air.....	29
II.6.2.3. Solidly mounted résonateur (SMR)	29
II.7. Réponse fréquentielle d'un résonateur piézoélectrique	31
II.8. Les filtres BAW	32
II.8.1. Les filtres à couplage électrique des résonateurs	33
II.8.2. Les filtres à couplage mécanique des résonateurs.....	33
II.8.3. Comparaison.....	34
II.9. Modélisation des résonateurs BAW	34
II.9.1. Modèle analytique 1D	34
II.9.2. Modèle par schéma électrique équivalent MBVD	35
II.9.3. Modèle de Mason	36
II.9.4. Modélisation par éléments finis (MEF)	38
II.10. Conclusion	39

Chapitre III : Etude harmonique d'un résonateur FBAR sous Comsol Multiphysics®

III.1. Introduction	41
III.2. Fonctionnement du résonateur de type FBAR	41
III.3. Etude harmonique d'un résonateur piézoélectrique (FBAR)	42
III.4. Définition du corps d'épreuve	42
III.5. Analyse du comportement dynamique d'une membrane piézoélectrique sous Comsol Multiphysics® V 4.3a.	43
III.5.1. Présentation du logiciel Comsol Multiphysics® V 4.3a.	43
III.5.2. Considérations à prendre lors d'une simulation.....	44
III.5.3 Modélisation et simulation de la membrane (3D)	45
III.5.3.1 Choix du module « Dispositif Piézoélectrique » et du type d'analyse	45
III.5.3.2. Géométrie du modèle.....	47
III.5.3.4. Conditions aux frontières et chargement de la structure	47
III.5.3.5. Maillage de la structure	48

III.6. Exploitation des résultats.....	49
III.7. Etude de la membrane piézoélectrique	50
III.7.1. Influence de la dimension latérale	50
III.7.2. Influence de l'épaisseur de la couche piézoélectrique	52
III.7.3. Influence du matériau piézoélectrique	54
III.8. Etude de l'influence des électrodes sur la réponse de la structure	55
III.8.1. Influence du matériau des électrodes	55
III.8.2. influence de l'épaisseur des électrodes	56
III.9. Conclusion.....	57
Conclusion générale et perspectives.....	59
Références bibliographiques.....	61
Annexes.....	65

LISTE DES FIGURES

		Page
Fig.I.1	Application des microsystèmes dans le domaine de l'automobile	7
Fig.I.2	Application des microsystèmes dans les satellites et dans l'avionique	7
Fig.I.3	Application des microsystèmes dans la téléphonie mobile	8
Fig.I.4	Photo à l'intérieur d'une salle blanche	8
Fig.I.5	Les étapes de fabrication en microélectroniques.....	10
Fig.I.6	Les étapes technologiques de fabrication des microsystèmes	10
Fig.I.7	Méthode de centrifugation par moyen d'une tournette	12
Fig.I.8	Procédé de lithographie	12
Fig.I.9	Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de volume	13
Fig.I.10	Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de surface	14
Fig.I.11	Lot de wafer.....	15
Fig.II.1	L'analogie mécano-électrique	21
Fig.II.2	La réponse électrique d'un résonateur	22
Fig.II.3	Résonateur à quartz	23
Fig.II.4	Résonateur HBAR	27
Fig.II.5	Résonateur suspendu.....	28
Fig.II.6	Résonateur à gap d'air.....	29
Fig.II.7	Résonateur SMR.....	30
Fig.II.8	Réponse simulée en fréquence d'un résonateur piézoélectrique.....	31
Fig.II.9	Filtres à couplage électrique de résonateurs.....	33
Fig.II.10	Les filtres à couplage mécanique de résonateurs.....	33
Fig.II.11	Modèle électrique BVD.....	36
Fig.II.12	Blocs de modélisation dans le modèle de Mason pour une couche piézoélectrique et non piézoélectrique.....	37
Fig.II.13	Modèle de Mason pour la capacité MIM d'un résonateur BAW.....	37
Fig.III.1	Fonctionnement d'un FBAR	41
Fig.III.2	Comportement du résonateur FBAR	42
Fig.III.3a	Vue en coupe d'un résonateur FBAR	42
Fig.III.3b	Vue de dessus représentant l'encastrement	43
Fig.III.4	Sélection de la dimension d'espace	45
Fig.III.5	Choix du module dispositifs piézoélectrique (pzd).....	46
Fig. III.6	Choix du type d'étude	46

Fig. III.7	Discrétisation de la structure	47
Fig.III.8a	Encastrement de la structure	47
Fig.III.8b	chargement électrique de la structure	47
Fig. III.9	Maillage de la structure	48
Fig.III.10	Allure de l'admittance électrique	49
Fig.III.11	Profil de déplacement a la résonance et a l'anti résonance	50
Fig.III.12	Vue de face du profil de déplacement en résonance	50
Fig.III.13	Influence de la dimension latérale sur le domaine fréquentiel	51
Fig.III.14	: Influence de l'épaisseur de la couche piézoélectrique sur l'admittance électrique du résonateur.....	52
Fig.III.15	La fréquence de résonance en fonction de l'épaisseur	53
Fig.III.16	Influence du matériau sur les modes de résonances	54
Fig.III.17	Influence du matériau des électrodes sur les modes de résonances	55
Fig.III.18	Influence de la masse volumique des électrodes sur la fréquence de résonance ...	55
Fig.III.19	Influence du matériau des électrodes sur les modes de résonances (pour l'Al).....	56
Fig.III.20	Influence de l'épaisseur des électrodes sur la fréquence de résonance pour quatre matériaux.....	57

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau I.1	Sources de contamination et leurs effets	11
Tableau I.2	Propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes	16
Tableau I.3	Performances des différents logiciels suivants les types d'applications.....	17
Tableau II.1	Propriétés des matériaux piézoélectriques	26

Liste des abreviations

Baw: Bulk acoustic wave.

MEMS: Micro Electro Mechanical systems.

CDTA : Centre de Développement des Technologies Avancées.

FBAR: film bulk acoustic resonator.

IT: Information Technology.

MST: Micro System Technology.

MMT: Micro Machining Technology.

IC: Integrated Circuit.

CAO: Conception assistée par ordinateur.

PZT : Titane Zirconate de Plomb.

ZnO: Oxyde de Zinc.

HBAR: High overtone Bulk Acoustic Resonators.

FBAR : Film Bulk Acoustic Resonators.

SMR: Solidly mounted resonator.

CRF: Coupled Resonator Filter.

SCF: Stacked Cristal Filter.

MBVD: Modified Butterworth Van-Dyke.

EDP: Equations aux dérivées partielles.

Introduction générale

Introduction générale

Les travaux de ce mémoire s'inscrivent dans le cadre d'un programme de recherche et de développement de l'équipe MEMS « Systèmes Micro-électromécanique » du centre de développement des technologies avancées "CDTA". Ce programme a pour objectif essentiel la réalisation de microsystèmes en passant par de simples concepts composés de structures simples (des pointes, des poutres, des ponts ou bien encore des membranes) appelées corps d'épreuves. Cette phase est un passage obligatoire pour :

- Appréhender ultérieurement le comportement mécanique de microsystèmes plus complexes lorsqu'ils sont soumis à des perturbations externes.
- La maîtrise d'un procédé technologique (il s'agit de briques de base incontournables) mais surtout pour des études mécaniques rigoureuses avant d'aborder la conception de structures plus élaborées.

Nous sommes intéressés précisément au cours de ce travail à la modélisation et à la simulation du comportement d'un résonateur piézoélectrique de type FBAR « film bulk acoustic wave ».

En effet, la simulation du comportement électromécanique d'un résonateur FBAR par éléments finis à l'aide du logiciel de simulation Comsol Multiphysics® «V4.3a » nous permettra d'élaborer une feuille de route à suivre afin d'optimiser et d'orienter le choix des paramètres géométrique et des matériaux parmi une large gamme, afin que le composant conçu puisse répondre aux exigences fonctionnelles souhaitées.

Pour accomplir nos objectifs, nous avons organisé notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre passe en revue les systèmes micro électromécaniques (MEMS). On présente également leurs domaines d'applications et les différentes étapes technologiques de fabrications au niveau des salles blanches. De plus, nous citons quelques outils qui servent à la modélisation des microsystèmes.

Le deuxième chapitre est constitué de deux parties, la première est une présentation générale de la piézoélectricité. Nous aborderons les différents types de résonateurs piézoélectriques, mais tous fonctionnent sur le même principe : l'excitation d'une onde mécanique au sein d'un film de matériau piézoélectrique. Nous citerons les différents matériaux utilisés comme couche piézoélectrique. Nous présenterons ensuite une comparaison entre les différentes topologies et structures pour la conception de résonateurs

piézoélectriques. La lecture de ce chapitre permettra de comprendre la physique de l'effet piézoélectrique et l'application de cet effet à la réalisation des résonateurs piézoélectriques hautes fréquences.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons les modèles de calcul des résonateurs piézoélectriques et les circuits équivalents permettant de les décrire. Ces modèles sont tous basés sur une modélisation unidimensionnelle de la piézoélectricité ce qui leur confère une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation. Ce chapitre nous permet de prendre connaissance des modèles théoriques qui régissent le comportement des résonateurs piézoélectriques.

Dans le troisième chapitre, nous procéderons à la simulation du comportement dynamique d'un résonateur piézoélectrique dans son environnement. Nous analyserons en premiers l'influence des paramètres géométriques et du matériau de la couche piézoélectrique isolée des électrodes sur la réponse fréquentiel de la structure du résonateur, ensuite nous procéderons à l'étude de l'influence des paramètres géométriques et des matériaux des électrodes sur la réponse fréquentielle du résonateur piézoélectrique. L'analyse des résultats obtenus nous permettra d'établir une procédure afin de faire correspondre le choix du matériau au choix des paramètres géométriques pour la réalisation d'un résonateur fonctionnant aux conditions souhaitées.

Enfin, la conclusion générale fait la synthèse de cette étude, et revient sur les résultats obtenus.

Chapitre I

Introduction aux microsystemes

I.1. Introduction

La dénomination MEMS est une abréviation anglaise de « Micro Electro Mechanical Systems ». Elle désigne un micro dispositif électromécanique qui englobe tout système disposant une partie électronique et intégrant une fonction mécanique dont l'ensemble est à l'échelle micrométrique [cm, 0.1µm]. L'idée de réalisation des dispositifs à petite échelle, est attribuée au physicien prix Nobel (1965) Richard Feynman. Avec sa célèbre phrase prononcée dans une conférence en 1959 "There is a Plenty of Room at the Bottom" ; il y a tout un monde en bas d'échelle [1].

Cette discipline est relativement jeune, elle est apparue à la fin des années soixante-dix. Actuellement, l'industrie des microsystèmes est en forte expansion avec des prévisions de marchés et de retombés économiques importantes dans de multiples secteurs (automobile, IT (technologie de l'information) périphériques, process control, médicale, aérospatiale, environnementale, etc.). Le marché a atteint 11,5 Md\$ en 2004 et devrait atteindre 24 Md\$ en 2009. Soit une croissance de 16 % par an selon Sean Neylon [2].

On trouve ces composants au quotidien dans les différents équipements qu'on utilise. Les voitures modernes utilisent le plus grand nombre de produits incluant les MEMS (capteurs de pression, accéléromètres, etc.). Au niveau du volume de composants produits, la première place revient à la production des têtes d'imprimantes à jet d'encre et aux têtes de lecture-écriture. Au niveau médical il existe une panoplie de dispositifs réalisés pour le diagnostic. On peut citer les puces ADN et les puces d'analyses des protéines [3].

Le domaine des télécommunications représente aussi une très grande part du marché.

I.2. Définition d'un microsysteme

Un microsysteme est un composant micrométrique destiné à manipuler ou détecter des paramètres physiques dans son environnement. Ce concept est défini de différentes manières. En Europe, le "MST" (Micro System Technologie) est un dispositif miniaturisé avec capteurs et/ou actionneurs, doté d'une électronique pour le traitement d'information. Au Japon, le "MMT" (Micro Machining Technology) est défini comme un dispositif réalisant des tâches complexes à l'échelle microscopique. Enfin, il est défini comme MEMS au Etats-Unis, et désigne des systèmes miniaturisés électromécaniques fabriqués en technologie microélectronique (fabrication IC, Integrated Circuit) [4-6].

Ces notions ont beaucoup évoluées vue les orientations des microsystèmes et les applications utilisant les phénomènes physiques : thermique, magnétique, fluide, optique, etc. Aujourd'hui diverses notions existent:

- Microsystèmes : Capteurs/Actionneurs.
- MOEMS : Microsystèmes optiques "Micro Opto ElectroMechanical System".
- RF-MEMS : Commutateur RF, composants passifs variables, résonateurs, filtres antennes, etc...
- BioMEMS [7]: Puce ADN, microréacteur chimique, micro valve/micro pompe, etc.

I.3. Succès des microsystèmes

Les microsystèmes sont intégrés dans diverses applications, avec un grand succès économique dont on trouve des MEMS pour les airbags, têtes d'imprimante à jet d'encre, écrans géant, etc. De plus, ils sont intégrés sur des puces de quelques millimètres carrés, et sont connues comme étant: robustes, fiables, utiles pour la détection et sont produit à faible coût. Le succès des microsystèmes est dû aux atouts qu'ils procurent :

- La réduction de la taille, du poids et de la consommation d'énergie.
- L'amélioration des performances (vitesse de détection, sensibilité)
- La découverte de nouvelles propriétés et fonctionnalités.

I.4. Domaine d'application des microsystèmes

Les microsystèmes s'imposent dans les domaines où leurs caractéristiques ont un réel avantage. Parmi les domaines d'application touchés par les microsystèmes, nous citons les domaines suivants:

I.4.1. L'automobile :

Ce secteur est le plus grand domaine d'application des microsystèmes [8]. Les applications automobiles profitent des avantages des microsystèmes en termes de coût et d'intégration et également en termes de taille et d'encombrement ainsi que la possibilité d'être interrogés à distance (cas des capteurs de pression dans les roues avec communication radiofréquences). La figure I.1 montre l'intégration de microsystèmes et des capteurs dans un modèle de voiture.

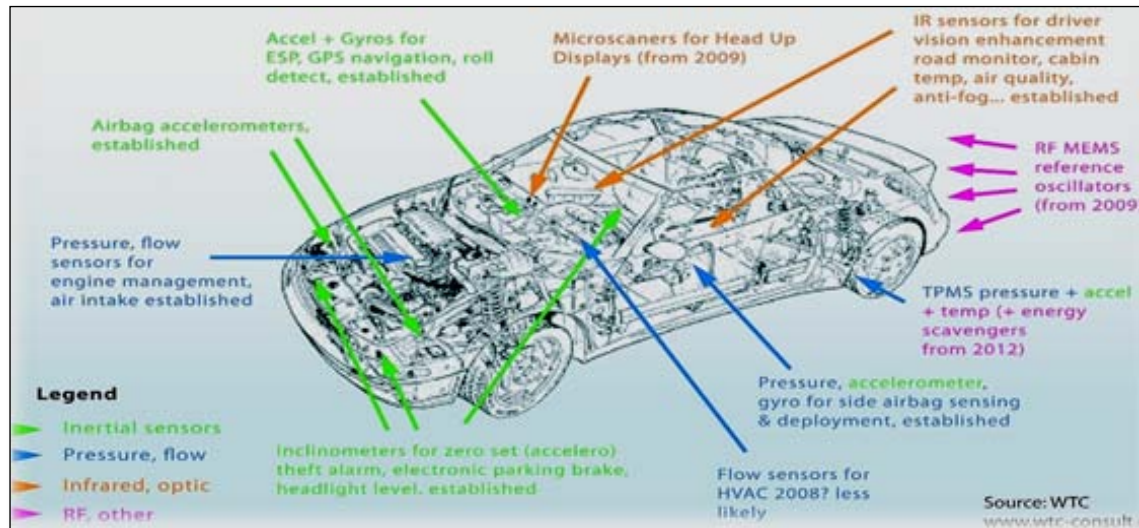


Figure I.1 Application des microsystèmes dans le domaine de l’automobile [8]

I.4.2. Le spatial et l’avionique

La figure I.2 montre les applications des microsystèmes dans les microsatellites [8], qui sont listées ci-dessous.

- Mesure inertielle, accéléromètre, gyroscope,
- Stabilisation: capteur de terre, capteur d’étoile, ...
- Propulsion: micro propulseur, ...etc

En profitant des très petites dimensions des microsystèmes, il est possible d’intégrer un réseau de capteurs distribués, afin de mesurer la pression et le flux d’air en tout point, ainsi que les contraintes dans les matériaux ou de la température.

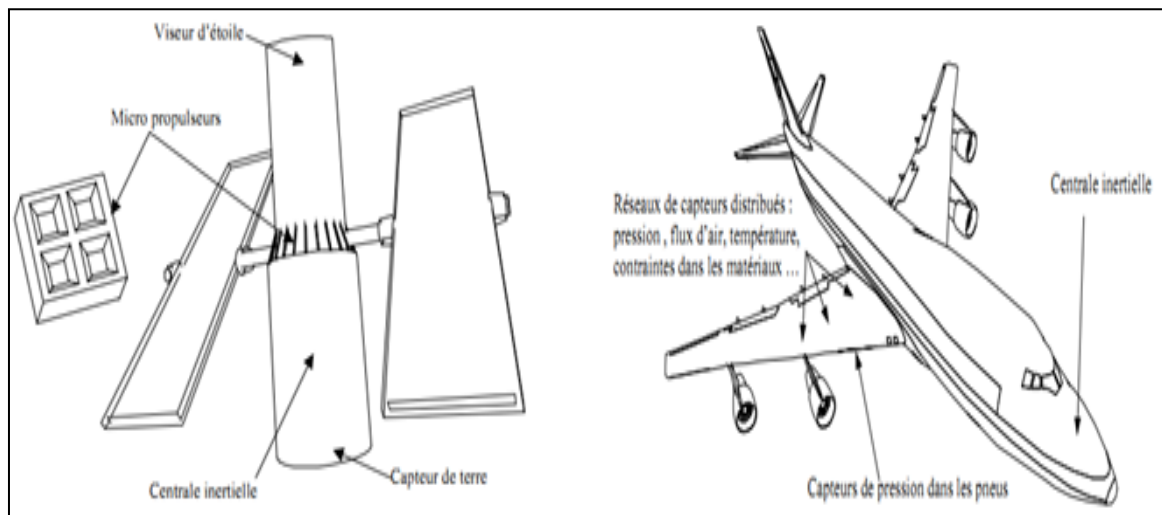


Figure I.2 : Application des microsystèmes dans les satellites et dans l’avionique[8]

I.4.3. Les télécommunications :

Le besoin dans les applications de radioguidage ou encore dans la téléphonie cellulaire, est devenu de plus en plus important, mais les bandes de fréquence allouées par canal sont de plus en plus proches les unes des autres. Pour ces raisons, une montée en fréquence, avec des coefficients de qualité toujours plus grands est devenue incontournable.

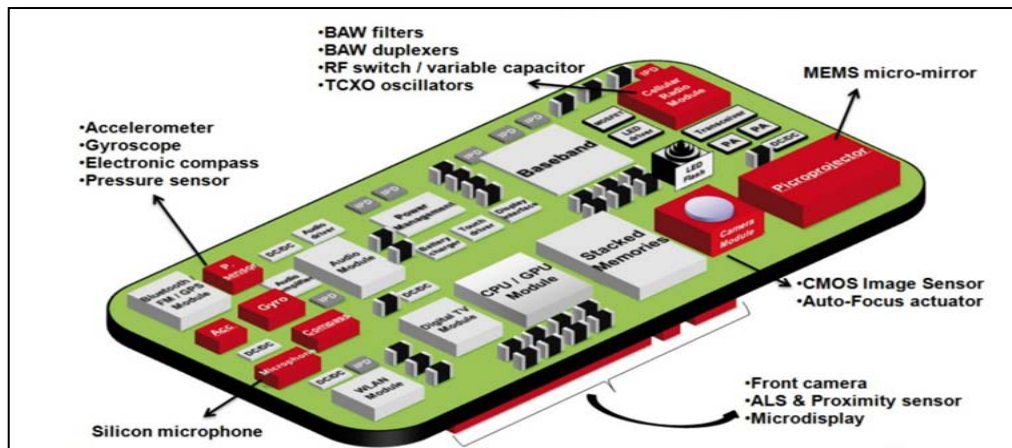


Figure I.3 : Application des microsystèmes dans la téléphonie mobile[8]

I.5. Notion de salle blanche

La salle blanche (fig. I.4) représente l’atelier de fabrication des microstructures MEMS. Elle est conditionnée (la température est de 20°C et un flux d’air filtré en légère surpression permettant l’élimination ininterrompue des poussières et des gaz qui s’introduisent). En effet, une poussière de taille micrométrique a tendance à être adsorbée sur la surface des supports de fabrication des MEMS.



Figure I.4 : Photo à l’intérieur d’une salle blanche[8]

La salle blanche est identifiée par une classe qui est entre 100 et 10000. Par contre celle de la microélectronique est entre 1 et 10. La classe représente le nombre de poussières dont la taille est inférieure à 4 μm , contenues dans un volume égal à un pouce-cube (un pouce = 2,54 cm).

I.6. Conception des microsystèmes

La conception des microsystèmes suit le flot suivant :

- Le dessin du masque et la conception au niveau du plan ou schéma : ce sont les éditeurs de plans et les outils de vérification de règles de dessin.
- La simulation de procédé technologique: les simulateurs de procédé semi-conducteur et les simulateurs de gravure (Intellisuite, etc).
- La simulation de composant : les simulateurs Eléments Finis (Solidworks, Comsol, etc.)
- Vérification et mesures : validation de la simulation
- Analyse et contrôle de la conception (Optimisation)

Devant le panel d'outils dédiés à la conception des microsystèmes, il est nécessaire que ces outils puissent être couplés par transferts de données (importation/exportation).

I.7. Technologies de micro-fabrication des microsystèmes

La technologie de fabrication MEMS est issue de la technologie microélectronique (fig. I.5) [5-7]. Les techniques de cette dernière, peuvent être classées principalement en trois catégories :

- techniques additives (dépôts de couches minces, épitaxie, ... etc.),
- techniques de transfert de motifs (photolithographie).
- techniques soustractives (gravure humide et sèche, RIE (relative ion etching), ...etc.

La différence qui existe entre la fabrication MEMS et celle de la microélectronique réside dans les matériaux utilisés.

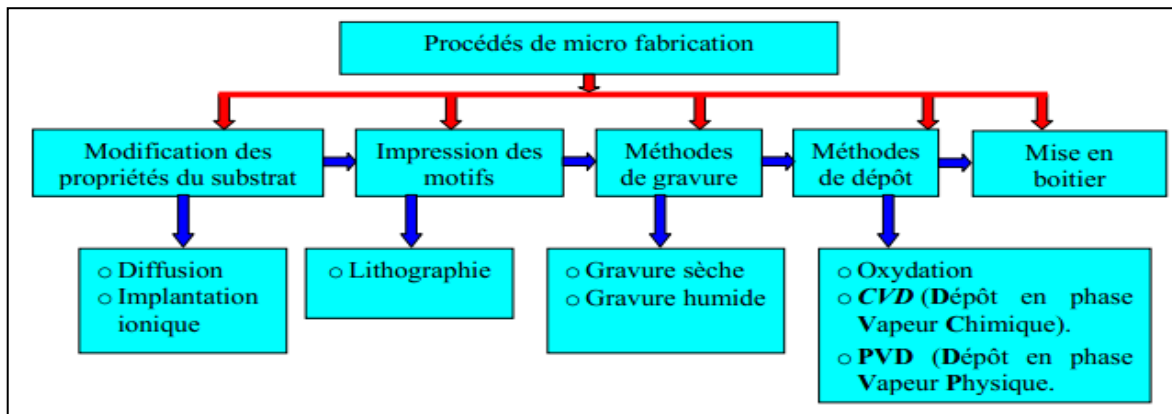


Figure I.5: Les étapes de fabrication en microélectroniques[8]

La fabrication des MEMS permet la réalisation de microstructures de types : (cantilever (poutre), pont et membrane minces). Les principales méthodes de fabrication sont: le micro-usinage de surface et le micro-usinage en volume. Il existe d'autres procédés utilisés pour la fabrication de MEMS, tels que :

- les technologies (lithographie, électrodéposition par bain d'électrolytes et moulage) [9].
- le micro-usinage par électroérosion.

I.8. Principe général de fabrication des microsystèmes

Le principe de fabrication repose sur une série d'étapes technologiques (fig. I.6). La réalisation de structures sur ou dans un substrat passe par le dépôt de couches qui vont servir soit de masque de gravure ou de structures [10].

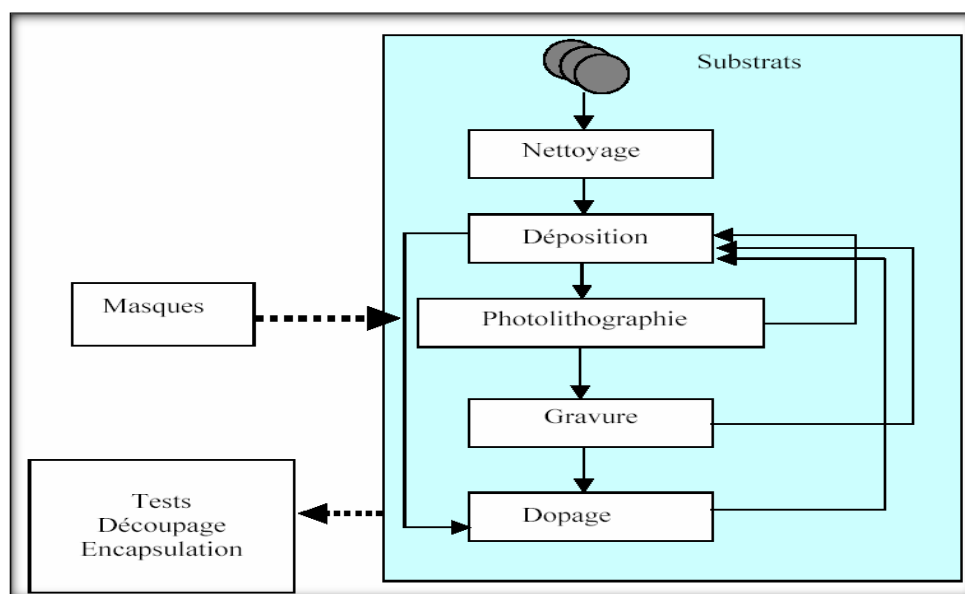


Figure I.6 : Les étapes technologiques de fabrication des microsystèmes[8].

I.8.1. Le nettoyage

Cette opération est nécessaire pour enlever tout ce qui n'est pas du silicium. Le tableau I.1 indique les sources de contamination et leurs effets [11].

Tableau I.1 : Sources de contamination et leurs effets[8]

Contamination	Sources	Effets
Organique	Traces de résine, équipement, humains, lubrifiant...	Courant de fuite, comportement bizarre des gravures sèche
Ions métalliques	Produits chimique contenant : Na^+ , K^+ , Ca^{+2}	durée de vie faible
Particules	Produits chimiques, eau, gaz, équipements, humains...	Courts-circuits, tentions de claquage faible dans les isolants,...
Atomique	Produits chimiques : Au, Fe, Cr, Cu, etc.	Courts-circuits, mauvaise performances,

I.8.2. Le dépôt de la résine

Cette étape consiste à déposer des films minces de résines (typiquement μm 2 d'épaisseur) par centrifugation, sur le substrat de base fixé sur une tournette (fig. I.7). Généralement, on commence par le dépôt d'un promoteur d'adhérence HMDS (l'hexamethyldisilazane) sur la surface afin d'améliorer l'adhérence résine/substrat [11].

L'application du HMDS peut s'effectuer à froid ou à chaud dans la fabrication des microsystèmes, on utilise deux types de résines en fonction du résultat attendu :

- **Résine positive**

L'étape de développement conduit à l'élimination de la résine insolée au travers du masque, découvrant ainsi des ouvertures vers le substrat qui dessinent la structure en négatif ;

- **Résine négative**

L'étape de développement conduit à l'élimination de la résine non insolée (non exposée à l'UV), laissant ainsi la résine polymérisée sur le substrat qui dessine la structure en positif. Elle est plus difficile à utiliser, sert souvent de structure mécanique (résine épaisse nommée SU-8).

Remarque:

Le choix des vitesses de rotation et l'épaisseur de la résine sont donnés par le constructeur de la résine. Plus elles sont fines, plus la précision de la lithographie sera grande, mais moins elles résisteront pendant les étapes de fabrication.

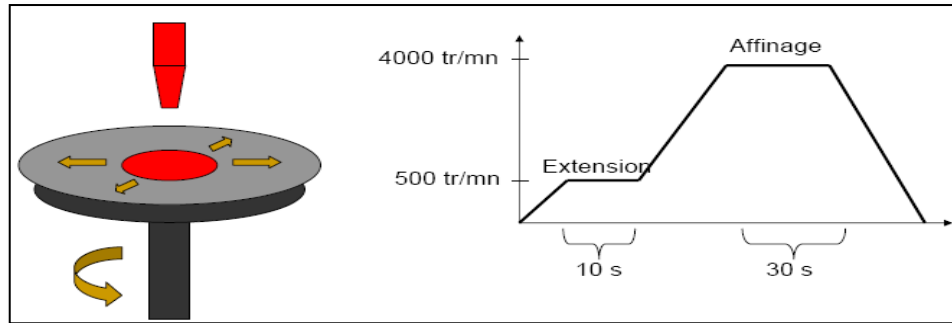


Figure I.7 : Méthode de centrifugation par moyen d'une tournette[11]

I.8.3. La lithographie

On distingue plusieurs familles de techniques de lithographie (fig.I.8) en fonction de la longueur d'onde de la source du rayonnement utilisé : source à rayons X, source à électrons, source à faisceau d'ions, source de lumière visible, UV, etc. Evidemment plus la longueur d'onde est faible, plus la précision est grande.

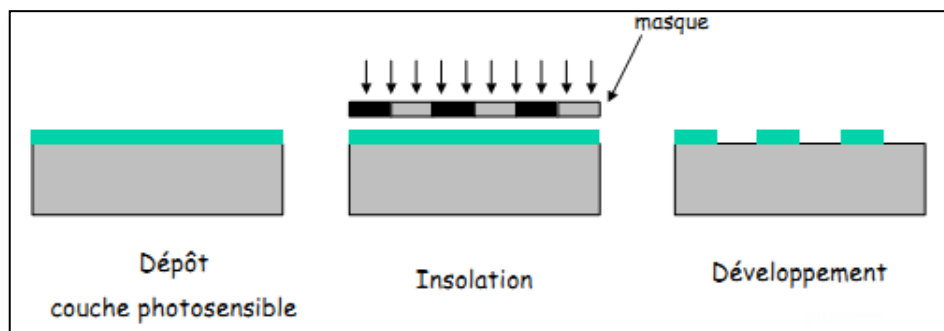


Figure I.8 : Procédé de lithographie[10]

Cette technique permet d'insoler la résine à travers un masque afin de dessiner la structure ou un élément de la structure à réaliser, puis passer au développement de la résine insolée avec un solvant.

Les masques utilisés sont en général des plaques de quartz sur lesquelles un dépôt de chrome formant le motif a été réalisé, dans la plupart des cas, à l'aide d'un faisceau d'électrons avec une précision de l'ordre de la fraction de micron.

De ce fait, il n'est a priori pas possible de fabriquer un objet avec une précision géométrique supérieure à celle du masque.

I.8.4. La gravure

Les microstructures sont formées directement à partir d'une gravure humide ou sèche du substrat en silicium ou autre. Ce procédé permet l'enlèvement de matière aux endroits qui sont restés exposés après l'étape de photolithographie, de manière sélective d'un matériau et de manière isotrope ou anisotrope. Les principales méthodes de fabrication en microsystèmes sont les techniques de gravure en usinage en volume et en surface.

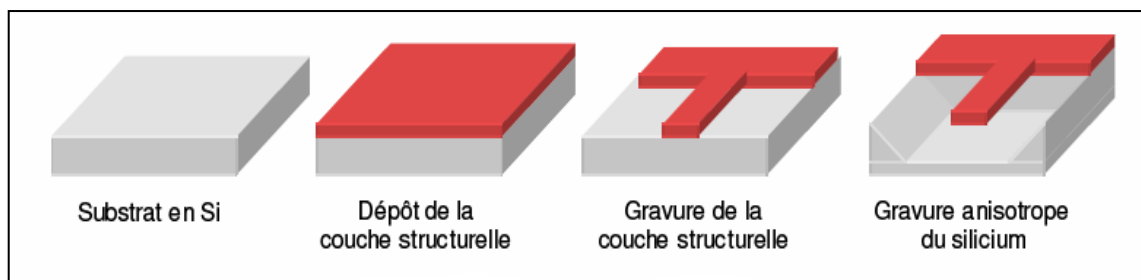


Figure I.9 : Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de volume[10]

I.8.5. Micro usinage de volume

Le Micro usinage de volume permet de réaliser des structures passives ou actives dans le volume du substrat utilisé. Les premières microstructures (capteurs/ actionneurs) ont été réalisés par ce procédé, basé sur les techniques de fabrication en microélectronique [14].

Le concept général est un usinage sélectif des structures dans le substrat, qui peut être réalisé par gravure sèche ou humide. Diverses structures (fig.I.9) peuvent être réalisées tels que les poutres, les ponts et les membranes [12].

Ce procédé permet d'avoir de grands et de larges dispositifs homogènes, qui ont des structures uniformes, ce qui permet d'éviter les problèmes de fissures ou de forces capillaires. De plus, il est peu coûteux et bien maîtrisé.

I.8.6. Micro usinage de surface

Cette technique a été mise en œuvre exclusivement pour la fabrication des MEMS, et vient par opposition au micro usinage de volume. Les microstructures sont réalisées sur la surface du substrat, considéré dans ce cas comme une plateforme du dispositif à réaliser [5, 6].

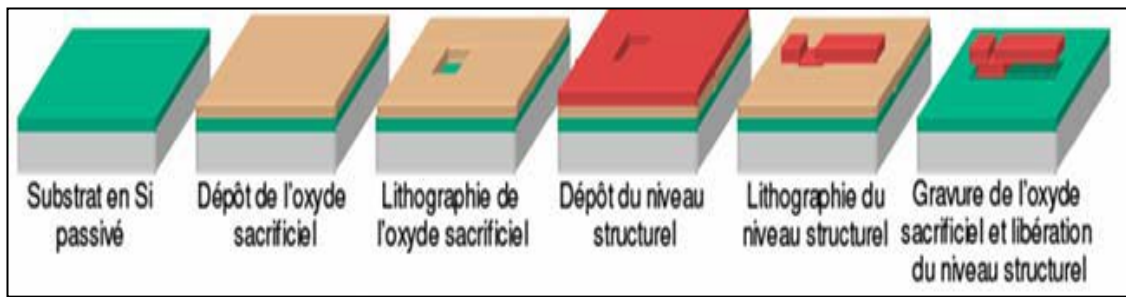


Figure I.10 : Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de surface[10]

Le principe consiste en un empilement des couches sacrificielles disposées au dessus du substrat (fig.I.10), suivant le motif à imprimer, puis supprimées à la fin du processus de fabrication par gravure sélective [13].

Le silicium, le dioxyde de silicium SiO_2 et le polysilicium sont les plus utilisées dans cette technique. Le SiO_2 est utilisé comme couche sacrificielle et le polysilicium pour la structure mécanique. Cette disposition est justifiée par le fait que :

- Le SiO_2 est de même nature mécanique que le silicium, la gravure humide par HF permet de dissoudre complètement le dioxyde sans aucune influence sur la couche de polysilicium.
- La possibilité de dopage du polysilicium et le dioxyde pendant et après les divers techniques de fabrication. Cette méthode est efficace pour obtenir des structures mobiles fines de type cantilever et pont. Elle est dépendante des techniques et des équipements de dépôts de couches minces.

I.8.7. Encapsulation (Packaging) en Microsystèmes

La mise en boîtier est une étape cruciale dans la technologie des microsystèmes. Elle consiste à assembler les différents composants (fabriqués séparément) pour former le dispositif final. Elle permet de protéger la partie sensible sans l'isoler complètement de l'environnement extérieur (ou de mesure), contrairement à la fabrication des Circuits intégrés où le boîtier isole le circuit. Il existe deux techniques spécialement développées pour les microsystèmes, l'assemblage ou le collage par diffusion et par soudage anodique.

I.9. Matériaux utilisés en microsystèmes

Les microsystèmes sont réalisés avec diverses variétés de matériaux comprenant les verres, les céramiques, les polymères, les métaux, et divers autres alliages [5-7]. Le choix du matériau utilisé est basé sur les propriétés électriques, physiques et mécaniques mises

en œuvre dans l'orientation du microsysteme à réaliser. En RF/MEMS, c'est la résistivité du matériau qui est recherché. En MOEMS c'est la transparence du matériau, vis-à-vis des longueurs d'ondes utilisées en télécommunications, qui est le critère de base. Pour les BioMEMS, la comptabilité du matériau avec son environnement est exigée.

I.9.1. Le silicium

Le silicium est le matériau de base en microsystèmes. Il est obtenu par sciage d'un lingot cylindrique de silicium tiré par le procédé de Czochralski [14]. Il est livré sous la forme d'un wafer (fig.I.11) circulaire [15] où le diamètre peut atteindre plus de 300mm et l'épaisseur varie entre 180 μ m et 450 μ m. Il est considéré comme une plateforme qui permet d'intégrer les fonctions électroniques et mécaniques, etc [16]. Ce choix repose sur diverses raisons :

- Il est disponible, bien connu (utilisé en microélectronique).
- Ses propriétés physiques et mécaniques sont intéressantes pour de nombreuses applications.
- Il possède un coefficient de piézorésistivité important, un module d'Young, lui procurant une bonne élasticité qui est utile pour les parties mécaniques.
- Son usinabilité est à faible coût et bien maîtrisée. De plus, il est l'un des rares matériaux qui puisse être fabriqué sous forme de monocristal de façon économique.



Figure I.11: Lot de wafer

I.9.2. Dérivés de silicium

Ils existent d'autres matériaux pouvant être utilisés comme substrat tels que : les polymères et plastiques, les métaux, les céramiques, le quartz et les verres [5,6,15]. Ils sont considérés comme plateforme des microsystèmes, lorsque ceux-ci sont réalisés sur la surface des wafers de base. Dans ce cas, les propriétés du matériau ne sont pas importantes (reste la comptabilité avec l'environnement et l'équipement utilisé).

Les propriétés du matériau sont importantes lorsque les dispositifs sont formés dans le substrat lui-même. Suivant l'application visée, le matériau est choisi en conséquence :

- Le quartz et les verres sont utilisés dans les capteurs/actionneurs. Ceci grâce à l'effet piézoélectrique qui domine dans ce type de matériau.
- Les verres et les polymères sont utilisés dans les applications biomédicales. Ceux-ci en plus qu'ils soient biocompatibles, ils sont maniables et transparent. Ils peuvent être choisis pour d'autres considérations tels que le coût du matériau et les matériels utilisés pour la fabrication.

Les MEMS sont fondés sur les technologies de type « film mince » [17]. Le tableau ci-dessous montre les propriétés physiques de quelques matériaux utilisés en microsystèmes [16].

Tableau I.2: Propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes

Propriétés	Silicium	SiO ₂	Poly- Si	Quartz	Al	Si ₃ Ni ₄
Module d'Young (GPa)	190	73	160	107	70	323
Coefficient de Poisson	0.22	0.17	≈0.2	0.16	0.33	0.25
Densité (g/cm ³)	2.3	2.3	2.331	2.6	2.7	3.1
Stress (GPa)	7	8.4	variable	9	0.17	14
Dilatation thermique (10/K)	2.3	0.55	2.8	0.55	24	3
Conductivité thermique à 300K (W cm ⁻¹ . K-1)	1.57	0.014	0.028	0.0138	2.37	0.19
Température de fusion (°C)	1415	1700	1400	1610	660	1800

Remarque :

Le choix du substrat repose sur divers critères et contraintes :

- Le matériau utilisé pour des produits ciblés (tels que les commutateurs qui sont généralement, fabriqués sur un substrat en silicium, en quartz ou en verre).
- Le coût, la technologie utilisée et les contraintes électriques, mécaniques et thermiques.

I.10. Possibilité des logiciels

En simulations, les logiciels de CAO dédiés aux microsystèmes permettent [18] :

- D'isoler les microstructures hybrides ou monolithiques en tenant compte des conditions aux frontières, du flux des efforts appliqués sur les microstructures idéales, etc.
- D'établir une discrétisation des microstructures et de faire un choix du calculateur (Solver) à utiliser en tenant compte de leur composition (homogène ou hétérogène) et de leurs tailles
- D'importer et exporter des modèles de microstructures afin d'étudier leur comportement en régime dynamique et /ou statique sous un environnement de CAO adéquat (tableau I.3).

Le tableau I.3 résume les possibilités qu'offrent différents logiciels pour modéliser et simuler le comportement de différentes structures mécaniques.

Tableau I.3 : Performances des différents logiciels suivants les types d'applications.

Software	Application	Application													Mean stress σ_0	$\sigma_0(x,y,z)$	Initial deformation ϵ_0	Thermal deformation ϵ_{th}	
		Static	Modal analysis	Time dependent	Harmonic response	Parametric	Transatory quasi-static	Large deformation	Linear bukling	Elastoplasticity	Multiphysics	Electrostatic	Piezoelectric	Thermal					
COMSOL	Solid	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Shell	☺	☺	☺	☺	☺	☺				☺	☺	☺	☺					
ANSYS	Solid	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺				☺
	Shell	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺		☺	☺	☺	☺	☺				☺
COVENTOR	Solid	☺	☺		☺	☺	☺	☺	☺			☺	☺	☺	☺				☺
	Shell	☺	☺		☺		☺	☺				☺			☺				☺
ABAQUS	Solid	☺	☺		☺		☺	☺	☺	☺		☺	☺	☺	☺				☺
	Shell	☺	☺		☺		☺	☺	☺			☺			☺				☺

I.10.1 Autres logiciels

D'autres logiciels peuvent être utilisés dans le cadre de la conception des microsystèmes. On trouve le logiciel SolidWorks® qui est utilisé dans plusieurs domaines tels que : le développement de produits MEMS destinés à une large gamme d'applications (systèmes sans fil, capteurs de pression, capteurs chimiques et biologiques, etc.) [19] . Il offre des fonctionnalités de conception novatrices ayant fait leurs preuves en production telles que :

- la définition de caractéristiques inférieures au micron

- l'analyse par éléments finis (thermique, cinématique, électrostatique et flux, ...)
- la gestion de configuration pour la visualisation et l'analyse de plusieurs permutations de conception à l'aide de familles de pièces et de configurations d'assemblages
- la Réutilisation de conceptions permettant d'exploiter les conceptions 2D et 3D développées précédemment
- la conception de tout type de produit depuis les systèmes micro électromécaniques jusqu'aux systèmes hybrides à grande échelle et plus complexe.

I.11. Conclusion

Dans cette partie, nous avons établis une étude bibliographique sur les microsystèmes. Ce qui nous a permis de connaître :

- La notion de microsystème et leurs domaines d'application. Les microsystèmes connaissent et vont connaître un développement considérable de part leurs applications qui intéressent de nombreux secteurs de l'activité industrielle (l'automobile, télécommunications, aéronautique, spatial, etc.).
- Les matériaux mis en jeu, dont le silicium est le matériau de base.
- Les logiciels de modélisation et de calcul par la méthode des éléments finis utilisés dans le monde de la miniaturisation (domaine pluridisciplinaire), marquant la présence de nombreux phénomènes (mécanique, électronique, matériaux, etc.).
- La notion de salle blanche et les technologies de fabrication des microstructures MEMS.

Généralement, les équipements de fabrication microélectronique suffisent pour la réalisation de la majorité des dispositifs MEMS. Les étapes clé sont la lithographie, les dépôts de couches minces et les gravures (sèche et humide).

L'opposition de la technologie microélectronique et celle des microsystèmes réside dans les matériaux utilisés, d'où la nécessité d'ajout d'étapes de libérations des structures mécaniques mobiles déformables et la mise en boîtier (packaging). Les méthodes de fabrication les plus utilisées sont :

- L'usinage de surface qui est bien maîtrisée en technologie microélectronique, permettant la fabrication de microstructure à faible coût.
- L'usinage de volume assure la réalisation des structures minces et complexes mais exige la présence de moyen de gravure profonde "LIGA", (voir annexe A) et le dépôt de matériaux.

Chapitre II

Généralités sur les résonateurs piézoélectriques

II.1. Introduction

Ce présent chapitre est constitué de deux parties distinctes. Dans la première partie, nous donnons successivement la définition des résonateurs piézoélectrique, leurs principes de fonctionnement et leurs principaux paramètres. De plus, il consiste à rappeler les différents types de résonateurs micro-usinés. L'accent sera mis sur leurs géométries, leurs modes de vibration, l'actionnement et la détection ainsi que leurs performances, en vue de leur intégration dans des systèmes complexes

La deuxième partie consiste à effectuer une étude des différents modèles théoriques régissant les résonateurs piézoélectriques de type BAW.

II.2. Principe de fonctionnement d'un résonateur

Un résonateur est une structure physique qui peut entrer en résonance mécanique à une fréquence dite de résonance f_r .

Les résonateurs MEMS sont des structures mécaniques micro-usinées. Un dispositif de transduction est utilisé pour créer, généralement par voie électrique, une force d'excitation permettant d'entretenir la vibration au voisinage d'une fréquence propre de la structure. Seul un principe de transduction électromécanique permet en pratique de maintenir de façon contrôlée le fonctionnement du résonateur en un point précis de sa réponse.

Différents principes de transduction (optique, magnétique, thermique, piézoélectrique et électrostatique) sont rencontrés. Seulement, les méthodes piézoélectriques et électrostatiques qui permettent une transduction réversible sans fermer la porte à une éventuelle co-intégration sur un circuit intégré. L'efficacité du procédé de conversion entre les énergies mécanique et électrique est définie à l'aide d'un facteur de couplage électromécanique k_t^2 , il est défini comme le rapport entre l'énergie électromécanique emmagasinée dans le résonateur et la somme des énergies mécaniques et électriques fournies.

L'analogie entre les domaines mécanique et électrique est utilisée pour modéliser les résonateurs MEMS à l'aide d'un modèle électrique dipolaire, présenté sur la figure II.1. Un résonateur mécanique est composé d'une masse M , d'un ressort de raideur K et d'un amortisseur viscoélastique D^* , son équivalent électrique est constitué d'une branche série en parallèle avec une branche statique

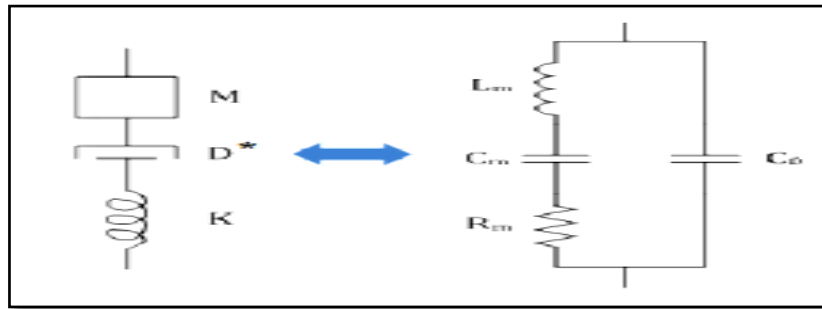


Figure II.1: L'analogie mécano-électrique.

La branche série est composée de trois composantes dites dynamique correspondant respectivement aux trois grandeurs mécaniques précitées : l'inductance L_m , la capacité C_m et la résistance R_m . La branche statique est simplement constituée d'un condensateur C_0 (fig. II.1). On définit :

- la fréquence de résonance du système qui correspond au maximum de réponse électrique (maximum de conductance).
- la fréquence d'antirésonance du système qui correspond au minimum de l'admittance et coïncide avec le point d'annulation de la susceptance (partie imaginaire de l'admittance). Notons qu'aucune vibration n'est engendrée à cette fréquence [20].

L'écart entre ces deux fréquences est caractérisé par le couplage électromécanique du mode de vibration.

Le facteur de qualité Q du résonateur est déterminé par le rapport entre la fréquence de résonance f_r et la bande passante (BP) à -3 dB.

La géométrie et les matériaux constituant d'un résonateur définissent l'ensemble des fréquences de résonance, a priori très nombreuses, mais une configuration optimisée se doit de privilégier l'excitation d'une seule résonance. Le produit $Q.f_r$ est une mesure du coefficient d'amortissement viscoélastique d'un résonateur ayant une géométrie spécifique et opéré sur un mode donné.

Au cours de l'évolution des résonateurs MEMS, plusieurs objectifs ont été poursuivis : la miniaturisation, l'intégration avec l'électronique de commande, la robustesse, l'augmentation du facteur de qualité, la réduction de l'impédance motionnelle, la réduction des pertes au niveau des suspensions, l'intégration dans une boucle d'oscillation.

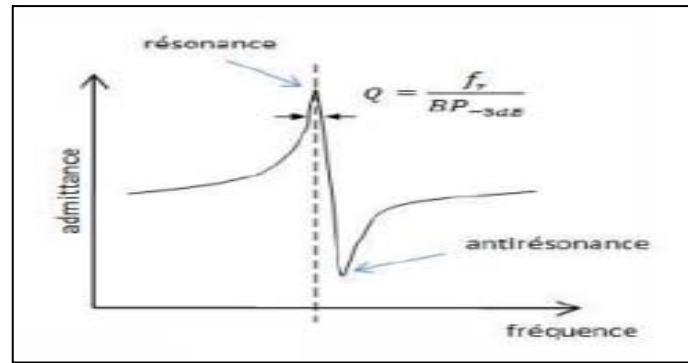


Figure II.2: La réponse électrique d'un résonateur

II.3. Géométries et modes de vibration

Le premier résonateur MEMS ayant connu un large retentissement a été un transistor à grille résonante, pour lequel l'oxyde de grille a été enlevé afin de permettre au métal de vibrer sous l'action d'un champ électrique. Le facteur de qualité était de plusieurs centaines à des fréquences voisines de 30 kHz.

On note que différents types de résonateurs électromécaniques ont été développés, se divisant en plusieurs familles : poutre vibrante en flexion, poutre à mode longitudinal, plaque à mode extensionnel carré de volume, disques à mode elliptique et de contour, anneaux, résonateur à espace capacitif diélectrique solide et poutres à mode de volume.

Pour notre cas, nous nous intéressons à l'étude d'un résonateur piézoélectrique dont le corps d'épreuve est d'une structure (de type sandwich) membranaire de géométrie carrée, composée d'un matériau piézoélectrique pris en sandwich entre deux électrodes en métal.

II.4. Notion de piézoélectricité

Toute force appliquée à la surface d'un solide piézoélectrique va le déformer et donner naissance à une tension électrique mesurable entre ses faces. Par effet inverse, l'application d'un champ électrique alternatif entre les faces d'un solide piézoélectrique va exciter une onde acoustique dans le solide. Cette onde acoustique est la résultante d'une déformation mécanique du réseau cristallin qui oscille alors à une fréquence donnée, dite fréquence de résonance.

En pratique, la piézoélectricité est utilisée par l'excitation d'une onde acoustique transversale ou bien longitudinale. On parle d'onde longitudinale lorsque la direction de propagation de l'onde est parallèle au déplacement des atomes du réseau cristallin. Dans le

cas transverse, la direction de propagation de l'onde est perpendiculaire au déplacement des atomes.

Le phénomène de la piézoélectricité a été largement mis à profit pour la fabrication de structure oscillante (résonateurs et transducteurs). Le cristal piézoélectrique le plus célèbre est le quartz. La fabrication d'un résonateur à quartz nécessite un morceau de cristal de quartz massif que l'on taille en fonction de la fréquence de résonance voulue. Dans le cas d'une excitation longitudinale, le résonateur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques (fig. II.3).

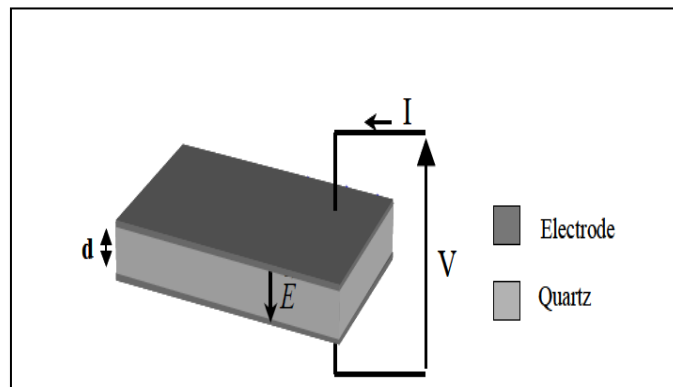


Figure II.3 : Résonateur à quartz

Dans cette configuration la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à l'épaisseur d du quartz :

$$f = \frac{v_a}{2d} \quad (\text{Eq.II.1})$$

Où v_a représente la vitesse de l'onde acoustique. Les électrodes étant de faibles épaisseurs par rapport à celle du quartz, elles ont très peu d'effet sur la fréquence de résonance.

Ce type de résonateur est appelé BAW (Bulk Acoustic Wave), ce qui signifie que l'onde acoustique se propage en volume librement comme dans un milieu infini. Les résonateurs à quartz entrent dans cette catégorie parce que les réflexions de l'onde aux interfaces ne modifient pas sa nature. Par ailleurs, il existe un type d'ondes particulières concernant les ondes acoustiques de surface dites SAW (surface acoustic waves). Ces ondes, découvertes par Lord Rayleigh, sont guidées le long de la surface du matériau. Leur amplitude décroît rapidement sur une distance normale à la surface. De plus, elles sont non dispersives et de configuration longitudinale ou transversale [21].

On comprend facilement qu'une montée en fréquence nécessite une diminution de l'épaisseur d . L'utilisation de cristaux massifs permet de couvrir une gamme de fréquences

qui s'étend du kHz à la centaine de MHz. Pour des fréquences de l'ordre du GHz, l'épaisseur du cristal s'amenuise à quelques microns. Il est dès lors nécessaire d'avoir recours à des couches piézoélectriques déposées par des techniques relevant du domaine de la microélectronique [21].

Pour les applications hautes fréquences, l'équation (1) n'est plus valable. En effet, les épaisseurs de métallisation sont du même ordre de grandeur que la couche piézoélectrique. L'onde acoustique chemine alors autant dans les matériaux non piézoélectriques que dans la couche piézoélectrique, d'où leurs appellations par les résonateurs composites.

II.5. Les matériaux piézoélectriques

L'effet piézoélectrique a été mis en évidence principalement dans les solides cristallins [22]. Parmi les 32 classes cristallines, 21 sont dépourvues de centre de symétrie : les centres de gravité des charges positives et négatives ne coïncident pas. Il en résulte l'existence dans le cristal d'un dipôle électrique. Parmi celles-ci, 20 classes cristallines présentent l'effet piézoélectrique. Dans ces 20 classes, 10 présentent une polarisation électrique spontanée en l'absence d'un champ électrique extérieur : elles sont dites polaires. La polarisation électrique ne peut être observée directement, car elle est annulée par des charges libres à l'intérieur ou à la surface du cristal. Cependant lorsque la température varie, la mesure de l'écoulement des charges dans un circuit fermé permet de mettre en évidence la variation de polarisation. Les cristaux appartenant à ces 10 classes sont appelés pyroélectriques. Les cristaux ferroélectriques forment un sous-groupe des matériaux pyroélectriques pour lesquels le sens de la polarisation peut être renversé sous l'action d'un champ électrique suffisamment intense. Cette polarisation s'annule pour une température appelée "température de Curie" au-dessus de laquelle le cristal possède une structure non polaire appelée para électrique : il ne présente alors plus d'effet piézoélectrique.

Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux. Le plus connu est sans doute le quartz, toujours utilisé aujourd'hui dans les montres pour générer des impulsions d'horloge. Actuellement, trois matériaux piézoélectriques sont utilisés pour la réalisation de structures micro-ondes. L'AlN (Nitrure d'Aluminium) [34], le PZT (Titane Zirconate de Plomb) [22] et le ZnO (Oxyde de Zinc) [36]. Beaucoup d'autres matériaux piézoélectriques sont connus, mais la plupart d'entre eux ne sont pas applicables ou pas encore disponibles en couches minces. Le choix du matériau repose avant tout sur ses

performances physiques (électriques et mécaniques), mais aussi sur le procédé de dépôt utilisé. Il faut également tenir compte de sa possibilité et de sa facilité à être intégré dans la fabrication des autres dispositifs.

Les performances d'un résonateur piézoélectrique sont conditionnées par plusieurs critères auxquels doit satisfaire la couche piézoélectrique [23]:

- La constante diélectrique ϵ_r : le niveau de l'impédance du résonateur est déterminé par la taille des électrodes, par l'épaisseur de la couche piézoélectrique et par la constante diélectrique. Plus cette dernière sera grande, et plus la taille des résonateurs sera réduite. Cette constante diélectrique est d'environ 10 pour l'AlN et le ZnO et jusqu'à 400 pour le PZT.
- Le coefficient de couplage électromécanique k_r^2 détermine le degré d'échange d'énergie mécanique en électrique. Une couche piézoélectrique avec un coefficient de couplage trop faible ne permettra pas de faire des filtres avec la bande passante requise pour les applications de téléphonie mobile. A titre d'exemple, le PZT présente le plus grand coefficient (de 8 à 15 %), suivi par le ZnO, (7 %) et puis par l'AlN (6.5 %)[24].
- Les pertes intrinsèques, mécaniques $\text{tg}\delta_m$ et diélectriques $\text{tg}\delta_d$: l'AlN et le ZnO ont fait leurs preuves dans les filtres [25,26]. Le PZT présente beaucoup plus de perte, son exploitation est donc beaucoup plus limitée.
- Le coefficient de température : La couche piézoélectrique étant la pièce maîtresse de la résonance, la dérive en température de ses propriétés physiques aura une grande influence sur le maintien de la fréquence de résonance. L'AlN possède un coefficient beaucoup plus faible que le ZnO.

D'autres paramètres physiques ont une influence indirecte sur les performances des résonateurs [23] :

- Une forte conductivité thermique κ permet une bonne tenue en puissance du matériau piézoélectrique, condition nécessaire à l'intégration des filtres BAW dans les duplexeurs. L'AlN s'avère être un bon conducteur thermique.

- Un environnement humide peut dégrader les performances de la structure. Le matériau piézoélectrique doit donc être très stable chimiquement. Le ZnO et PZT ne le sont pas, contrairement à l'AlN, résistant aux attaques acides.
- La tension de claquage est aussi un paramètre déterminant. Elle est liée à la bande interdite du diélectrique ainsi qu'à la densité de défaut dans la couche piézoélectrique.

Le choix final du matériau piézoélectrique dépend avant tout de l'environnement technologique dans lequel il va être intégré. Les résonateurs et filtres piézoélectriques industriels seront fabriqués dans des centrales technologiques destinées aux matériaux semi-conducteurs. A cet effet, il est nécessaire d'écarter tout risque de contaminations provenant de la couche piézoélectrique. Le zinc, le zirconium et le plomb sont des matériaux à fort risque de contaminations du fait de leur influence néfaste sur la diminution de la durée de vie des porteurs. L'AlN ne développe aucun problème de cet ordre. Le tableau (II.1) résume les propriétés de chacun des matériaux piézoélectriques.

Tableau II.1 : Propriétés des matériaux piézoélectriques.

	AlN	ZnO	PZT
Constante Diélectrique (ϵ_r)	~10	~10	80~400
K_t^2	6.5%	7%	8-15%
Vitesse Acoustique m/s	10400	6350	4000~6000
Vitesse de dépôt	Grande	Moyenne	Petite
Environnement Humide	oui	non	non
Intégration CMOS	oui	non	non

II.6. Les résonateurs piézoélectriques

On distingue deux grandes familles de résonateurs acoustiques classées selon la structure des couches superposées et qui sont à savoir : les HBARs (High overtone Bulk Acoustic Resonators) et les FBARs (Film Bulk Acoustic Resonators) [24].

II.6.1. High Overtone Bulk Acoustic Resonators

Les HBARs (fig II.4) sont constitués de deux parties distinctes. Le matériau piézoélectrique pris en sandwich entre deux électrodes d'excitation. La cavité résonante dans laquelle va s'établir un système d'ondes stationnaires.

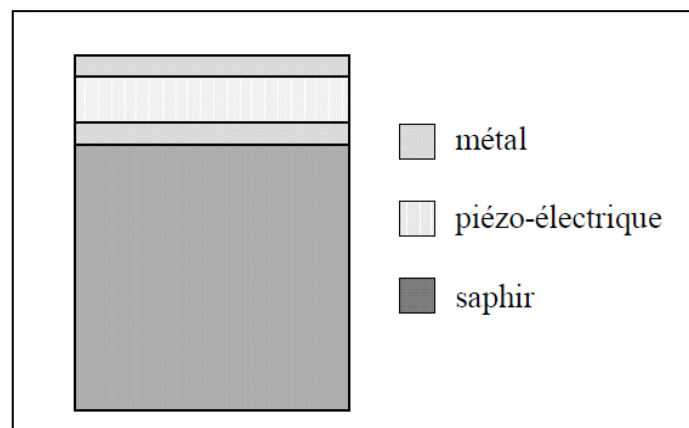


Figure II.4: Résonateur HBAR

La cavité est constituée d'un matériau (saphir) non piézoélectrique (fig. II.4) présentant un fort facteur de qualité acoustique. Le transducteur, posé sur la cavité, va coupler une quantité de son énergie avec cette dernière. La résonance utilisée est celle de la cavité ce qui permet d'obtenir un fort facteur de qualité (20000 à 2GHz [27]). Un tel système est plutôt utilisé à haute fréquence comme partie résonante d'un oscillateur. Les dimensions de la cavité étant très grandes par rapport à celles du transducteur (l'épaisseur du transducteur est proche de la demi-longueur d'onde), la fréquence de fonctionnement utilisée est un multiple de la fréquence fondamentale.

Les dimensions restent modestes pour ce type de résonateur dont l'épaisseur de la cavité est de 0.5mm [27]. Par ailleurs, l'encombrement excessif du spectre autour de la fréquence de résonance choisie ne permet pas d'envisager son utilisation pour des applications de filtrage hautes fréquences.

II.6.2. Film Bulk Acoustic Resonators (FBAR)

Contrairement au système précédent, le transducteur est posé sur un substrat non piézoélectrique de faible épaisseur. Généralement, l'épaisseur du substrat est comparable à celle de la couche piézoélectrique ou plus fine. La fréquence de résonance et le facteur de qualité de ce système sont fortement liés aux propriétés acoustiques du matériau piézoélectrique, de la métallisation, ainsi qu'à celles du substrat [24].

Un des points clés dans la conception du résonateur est la partie supportant le résonateur. Il est nécessaire de bien poser les conditions aux limites mécaniques afin de confiner l'onde acoustique dans la partie résonante, assurant ainsi une diminution des pertes acoustiques. Afin d'éviter les fuites acoustiques, les résonateurs BAW (Bulk Acoustic Wave) sont suspendus sur des membranes micro-usinées ou sont isolés grâce à des réflecteurs de Bragg [28]. On distingue trois configurations majeures qui sont toutes liées à un procédé microélectronique particulier [29].

II.6.2.1. Résonateur suspendu

La première structure (fig II.5) repose sur une membrane micro-usinée sur un substrat massif. Les principales étapes de fabrication sont le dépôt de la partie résonateur sur substrat puis l'élimination localisée du substrat afin d'obtenir une fine membrane sur laquelle repose le résonateur. Le silicium haute résistivité et l'arséniure de gallium sont des substrats couramment utilisés [30,31]. L'inconvénient de ce type de structure provient des contraintes mécaniques exercées sur la membrane, qui a tendance à se déformer et à se déchirer.

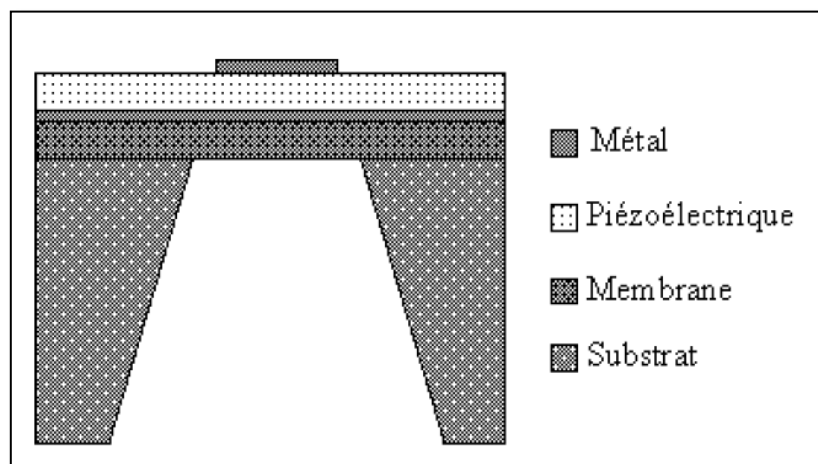


Figure II.5: Résonateur suspendu.

II.6.2.2. Résonateur à gap d'air

La seconde configuration (fig II.6) nécessite la réalisation d'un gap d'air entre le résonateur et le substrat. Celui-ci est réalisé en déposant une couche sacrificielle entre le résonateur et le substrat. La dernière étape de fabrication consiste à enlever cette couche, ce qui permet au résonateur d'être suspendu au-dessus du substrat. La couche sacrificielle est généralement du SiO₂ [32-34]. Là encore, la structure est fragile et sa conception nécessite une parfaite maîtrise des contraintes mécaniques. Le seul réel avantage par rapport à la première configuration est que cette technique s'applique sur un plus grand choix de substrat, puisqu'il n'intervient pas dans la résonance.

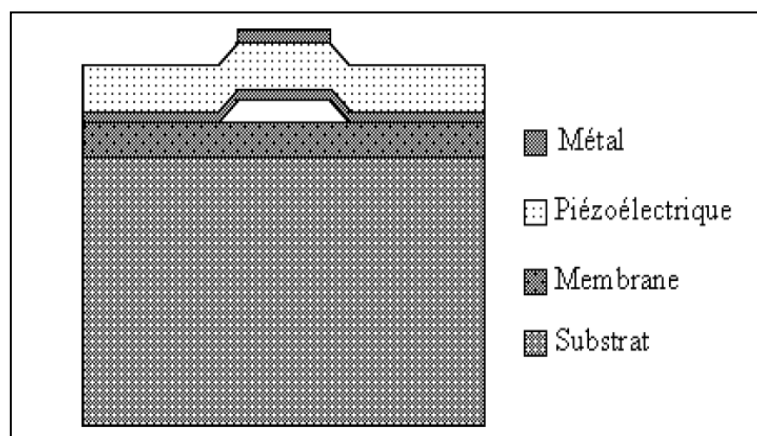


Figure II.6: Résonateur à gap d'air

II.6.2.3. Solidly mounted résonateur (SMR)

La troisième configuration de résonateur (fig II.7) est à l'opposé du concept de membrane, puisque le résonateur est parfaitement lié au substrat. Pour cette configuration, il est nécessaire d'isoler mécaniquement la partie résonante du substrat afin d'éviter que l'onde acoustique ne s'y atténue. En 1965, Newell fut le premier à proposer une technique de transformation d'impédance dans le but d'isoler acoustiquement le résonateur du substrat. C'est la technique du transformateur quart d'onde, où l'onde de référence est celle de la structure résonante. L'interface acoustique entre le résonateur et le substrat est composée d'un ensemble de couches d'impédance très différentes (Z_1 , Z_2) pour assurer l'isolation (réflecteur de Bragg), (voir annexe B). L'intérêt principal des résonateurs SMR est qu'ils peuvent être fabriqués sur une grande variété de substrats, les propriétés acoustiques du substrat étant sans importance. Leur inconvénient majeur provient du

nombre élevé de couches qu'il faut déposer pour atteindre l'isolation acoustique souhaitée, en maîtrisant parfaitement l'épaisseur des couches lors du procédé technologique [24].

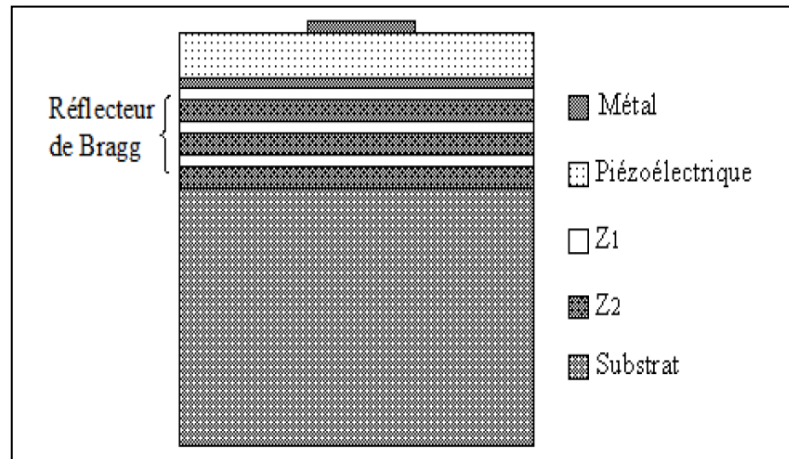


Figure II.7 : Résonateur SMR

Notons que les résonateurs FBARs présentés ont le même principe de fonctionnement: éviter que l'onde acoustique ne pénètre dans le substrat. Mais ils utilisent différentes méthodes pour cela. Les principales différences entre les trois types de résonateur sont d'ordre technologique et portent sur le choix des matériaux.

- Pour le résonateur suspendu, le problème de contraintes mécaniques exercées sur la membrane limite le choix de substrat.
- Le résonateur à gap d'air offre un plus grand choix de substrats, mais l'adaptation de contraintes entre la couche de métal et la couche piézoélectrique de la structure est indispensable.
- Les résonateurs SMR (isolés par le réflecteur de Bragg) peuvent être réalisés sur beaucoup de substrats, mais le nombre d'empilements du réflecteur de Bragg augmente la difficulté de fabrication. De plus, le réflecteur de Bragg n'est valable que pour une certaine bande de fréquence. Il faut donc ré-optimiser le réflecteur si la fréquence de résonance est modifiée.

Le choix d'utilisation des différents types de résonateur dépend de la situation dans laquelle nous allons utiliser les dispositifs FBAR. Mais, en théorie, les résonateurs qui sont isolés du substrat ont des facteurs de qualité plus élevés qu'avec les structures SMR [34].

II.7. Réponse fréquentielle d'un résonateur piézoélectrique

La figure (II.8) représente la transmission d'un résonateur piézoélectrique. Contrairement à un résonateur classique (distribué, diélectrique, etc.), la réponse en fréquence est constituée d'une résonance (appelée aussi résonance parallèle) et d'une antirésonance (résonance série).

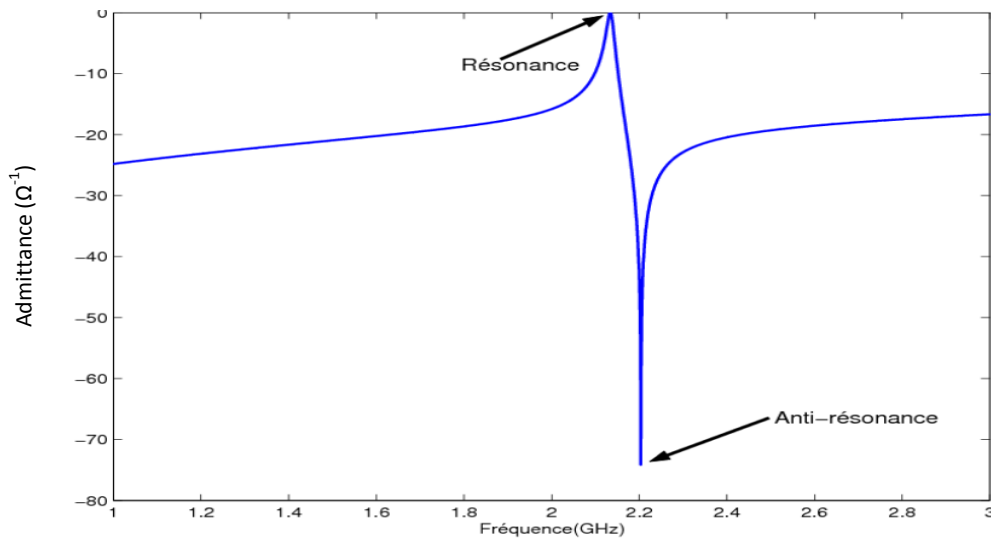


Figure II.8: Réponse simulée en fréquence d'un résonateur piézoélectrique.

L'intervalle de fréquence entre la résonance et l'antirésonance est relié à un facteur de mérite des résonateurs piézoélectriques qui est le coefficient de couplage électromécanique K_t . Pour un résonateur avec des électrodes inférieures et supérieures infiniment minces, il peut s'écrire par une relation entre la fréquence de résonance et la fréquence d'antirésonance de la manière suivante [35] :

$$k_t^2 = \frac{\frac{\pi f_s}{2 f_p}}{\tan \frac{\pi f_s}{2 f_p}} \quad (\text{Eq. II. 2})$$

Plus cet intervalle de fréquence sera élevé, plus grand sera ce coefficient K_t . Nous verrons par la suite que ce coefficient est utile pour déterminer quel matériau piézoélectrique choisir en fonction de l'application visée (résonateur, filtre), car plus ce coefficient est grand, plus la bande passante sera large.

La distance entre la fréquence de résonance et la fréquence d'antirésonance est modifiée quand on tient compte des électrodes, de la membrane mais aussi des couches du

réflecteur de Bragg. La plupart du temps, les couches ajoutées vont réduire l'intervalle de fréquence entre la résonance et l'antirésonance. Les fréquences de résonance et d'antirésonance d'un résonateur sont facilement mesurées, une expression équivalente au k_t^2 est alors présentée. Le "couplage efficace" k_{eff}^2 est défini de la manière suivante :

$$k_{eff}^2 = \frac{\pi^2}{4} \frac{f_p - f_s}{f_p} \quad (\text{Eq. II. 3})$$

Notons que : K_{eff}^2 est un paramètre très important pour la conception de composant BAW [35].

Comme pour tout résonateur, on définit le facteur de qualité du résonateur. Ce facteur permet de mesurer l'influence des différentes pertes métalliques, diélectriques et mécaniques. Cette définition est celle qui est classiquement utilisée [36]. Elle s'obtient à partir de la dérivée de la phase de l'impédance à la fréquence de résonance. Le résonateur piézoélectrique présentant deux résonances (même si l'une d'elle est appelée antirésonance), on définit deux facteurs de qualité : un pour la résonance série et l'autre pour la résonance parallèle, notées respectivement par Q_s et Q_p (Eq.II.4).

$$Q_s = \frac{f_s}{2} \left| \frac{\partial \Phi_z}{\partial f} \right|_{f_s} \quad Q_p = \frac{f_p}{2} \left| \frac{\partial \Phi_z}{\partial f} \right|_{f_p} \quad (\text{Eq.II.4})$$

Avec Φ_z représente la phase de l'impédance du résonateur.

II.8. Les filtres BAW

Les ondes électromagnétiques se propageant 4 à 5 fois plus vite que les ondes acoustiques, les résonateurs BAW et SAW sont donc beaucoup plus petits que les structures électromagnétiques, même pour celles ayant des matériaux à forte permittivité. Ces résonateurs acoustiques sont donc très utilisés pour la réalisation de filtre passe-bande dans les dispositifs nécessitant une très forte intégration [24].

Les filtres BAW se composent de plusieurs résonateurs BAW qui peuvent être électriquement ou mécaniquement couplés. Nous pouvons donc classer les filtres BAW en deux catégories principales:

II.8.1. Les filtres à couplage électrique des résonateurs

Les topologies filtres en échelle et filtres en treillis appartiennent à la catégorie des filtres à couplage électrique des résonateurs. Comme le montre la figure (II.9), le filtre en échelle et le filtre en treillis sont constitués de résonateurs FBAR qui sont montés, soit en série, soit en parallèle.

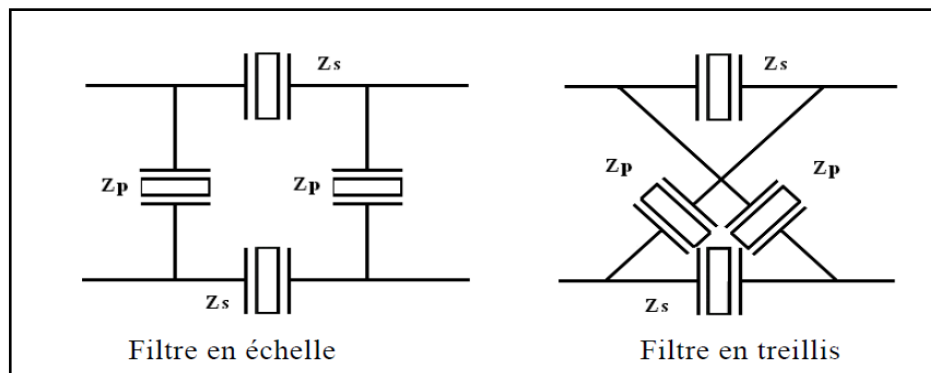


Figure II.9: Filtres à couplage électrique de résonateurs

II.8.2. Les filtres à couplage mécanique des résonateurs

Les filtres SCF (Stacked Cristal Filter) et les filtres CRF (Coupled Resonator Filter) sont des filtres à couplage mécanique des résonateurs. La figure (II.10) présente les structures de ces deux filtres. Ces types de filtres sont construits en empilant deux résonateurs. Nous pouvons associer ces deux types de filtre en utilisant le couplage mécanique et le couplage électrique entre différents résonateurs d'une même structure. Ces deux filtres utilisent le même principe de fonctionnement, l'un des résonateurs servant d'entrée et l'autre de sortie. Ces filtres empilés exploitent un couplage acoustique des résonateurs et permettent d'obtenir des filtres très compacts.

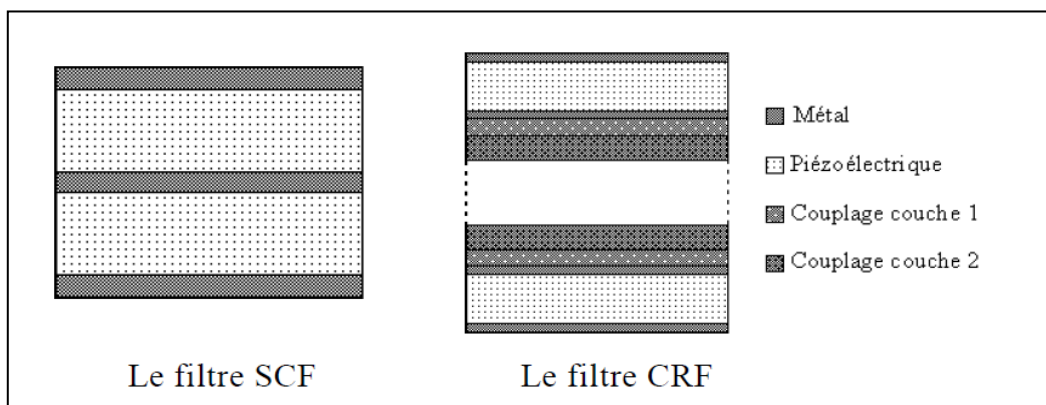


Figure II.10: Les filtres à couplage mécanique de résonateurs.

II.8.3.Comparaison

Les filtres en échelle sont les meilleurs candidats pour la conception de filtres à bande très étroite, puisque le nombre de résonateurs, autrement dit de pôles, peut être augmenté pour obtenir la réponse voulue. Les filtres SCF ont l'avantage de présenter de faibles pertes d'insertion, de faibles dimensions et la possibilité d'avoir une bande passante plus large grâce à l'utilisation d'inductances. Les filtres CRF, pour une même taille que les filtres SCF, offrent une bande passante double par rapport aux deux autres types de filtres. Par contre, l'encombrement spectral large bande est plus important pour les configurations SCF et CRF et la réalisation pratique de ces filtres nécessite plus d'étapes technologiques que pour les filtres en échelle [37].

Il est également possible de connecter électriquement ces différents filtres afin d'obtenir la sélectivité souhaitée.

II.9.Modélisation des résonateurs BAW

Les méthodes les plus utilisées sont le modèle analytique 1D, le modèle de Mason, le MBVD et la simulation par éléments finis. Elles seront présentées dans la suite. Suivant le type d'analyse souhaitée ainsi que la précision demandée l'une ou l'autre de ces méthodes peut être utilisée.

II.9.1.Modèle analytique 1D :

Le modèle 1D utilise les équations de la piézoélectricité pour mener une analyse unidimensionnelle suivant la direction qui nous intéresse (par exemple z pour le mode épaisseur), et établir une expression analytique de l'impédance électrique du résonateur piézoélectrique. Ce dernier se compose de deux parties : les accès et la capacité. La partie importante à modéliser dans un résonateur BAW est celle qui influence sa réponse acoustique c'est-à-dire la partie active, le réflecteur de Bragg (voir annexe B) et le substrat.

Les accès ne sont pas concernés par le phénomène acoustique et donc peuvent être considérés d'un point de vue purement électrique.

Pour pouvoir utiliser l'approximation d'une propagation unidimensionnelle (1D) deux conditions sont nécessaires [38] :

- Une propagation en ondes plane : ceci est vrai lorsqu'une structure présente un rapport entre les dimensions latérales et l'épaisseur des couches assez élevé.
- L'orientation du cristal piézoélectrique suivant l'axe normal aux plans des électrodes doit être parfaite afin d'éviter le couplage piézoélectrique avec les ondes transversales.

Dans un matériau piézoélectrique de la classe 6mm (tel que l'AlN), parmi les trois ondes planes qui peuvent se propager suivant l'axe z , seule l'onde longitudinale est piézoélectriquement couplée sous l'application d'un champ électrique suivant l'axe z si le cristal est bien orienté.

Dans ces conditions, l'approximation d'une propagation unidimensionnelle (1D) peut être utilisée. Les grandeurs physiques ne dépendent alors que de l'axe z et les équations constitutives de la piézoélectricité et de l'acoustique se simplifient. Il est alors possible de déterminer la réponse en fréquence des résonateurs BAW, soumis à une excitation électrique, en résolvant l'équation de propagation du déplacement mécanique sur l'ensemble de la structure en fonction des conditions mécaniques, aux limites et aux interfaces, et des conditions électriques, sur les électrodes et dans la couche piézoélectrique.

L'intérêt d'un modèle 1D est sa rapidité de calcul, l'accès à certaines données physiques, comme le déplacement mécanique et la flexibilité au niveau du nombre de couches qui est important pour les structures SMR. Toutefois, ce modèle reste très simpliste et ne permet pas de prendre en compte les effets sur les bords de la structure ni l'effet de la forme du résonateur.

II.9.2. Modèle par schéma électrique équivalent MBVD:

Le modèle **MBVD** (Modified Butterworth Van-Dyke) est un modèle constitué d'éléments électriques localisés dont les valeurs dépendent de certains paramètres tels que f_r , f_a , k_t^2 , les facteurs de qualité à la résonance et à l'antirésonance Q_r et Q_a . Si l'on considère que le résonateur fonctionne sans pertes d'énergie, le modèle utilisé sera uniquement construit avec deux capacités C_0 et C_m et une inductance L comme le montre la figure (II.11).

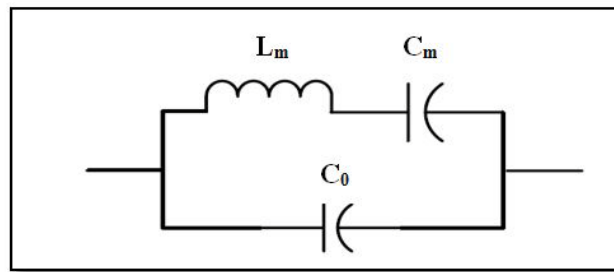


Figure II.11: Modèle électrique BVD.

Ce premier circuit permet de définir la résonance et l'antirésonance du mode fondamental.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}} \quad (\text{Eq. II. 5})$$

$$\omega_a = \omega_r \sqrt{\frac{C_m + C_0}{C_0}} \quad (\text{Eq. II. 6})$$

La première version de ce modèle est le fameux BVD (Butterworth Van-Dyke) qui a été introduit par K. S. Van Dyke en 1928 pour les résonateurs en quartz. Ce modèle électrique équivalent comprend une branche RLC dite acoustique ou motionnelle en parallèle avec une capacité statique qui correspond à la capacité formée par les deux électrodes déposées de part et d'autre du substrat piézoélectrique. Pour pouvoir définir une infinité d'harmoniques, K. S. Van Dyke propose de rajouter une infinité de branches acoustiques (C_{m_i} , L_{m_i}) en parallèle avec la première branche (C_m , L_m) dont les fréquences de résonance et antirésonance f_{r_i} et f_{a_i} sont définies par C_0 , C_{m_i} et L_{m_i} .

Ce modèle offre plusieurs avantages qui le rendent indispensable pour la conception des dispositifs BAW. Il permet une représentation simple et assez précise du résonateur piézoélectrique pour les modes TE (Thickness Extension) et LFE (Lateral Field Excitation) et montre une très bonne approximation du comportement électrique du résonateur et du filtre pour des fréquences voisines de f_r et f_a . De plus, il est intégrable dans des logiciels circuits comme ADS ou SPICE, ce qui permet de synthétiser des réponses en fréquences complexes (telles que celles d'un filtre complet).

II.9.3. Modèle de Mason:

C'est un modèle 1D simplifié qui permet une représentation par un schéma électromécanique équivalent du comportement vibratoire d'un élément piézoélectrique. Il

permet de déterminer les fréquences de résonances et d'antirésonance d'un résonateur piézoélectrique. Ce modèle a été proposé par Warren P. Mason en 1948 pour simuler le comportement électrique et mécanique des transducteurs piézoélectriques.

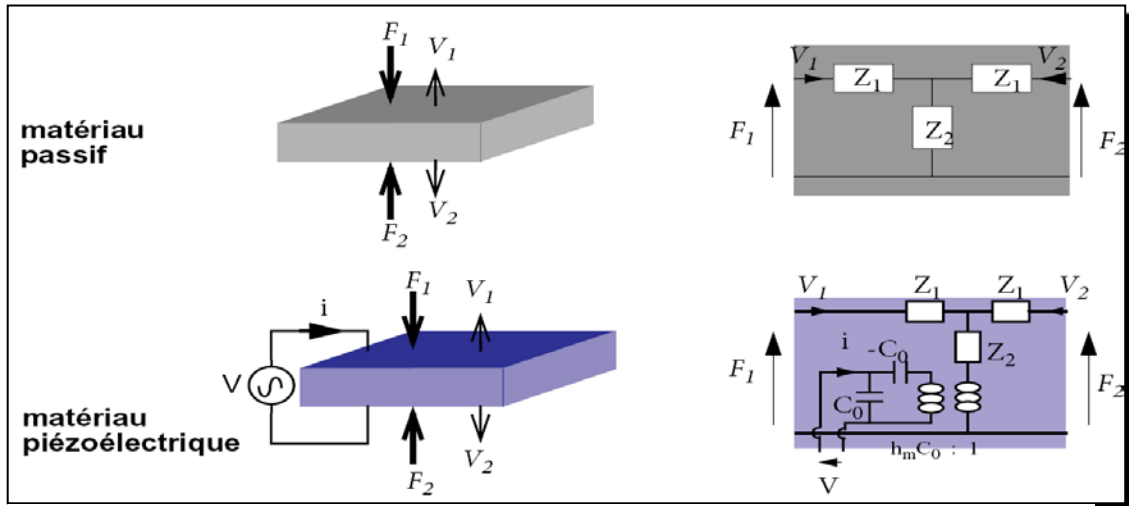


Figure II.12: Blocs de modélisation dans le modèle de Mason pour une couche piézoélectrique et non piézoélectrique.

Il utilise l'analogie électromécanique suivante :

- Les forces sont représentées par des tensions électriques.
- Les vitesses particulières sont représentées par des courants électriques.

Deux cas se présentent suivant la nature du matériau de la couche (piézoélectrique ou non). Une couche piézoélectrique est représentée par un circuit à trois accès tandis qu'une couche élastique est représentée par un circuit à deux accès (Fig.II.12).

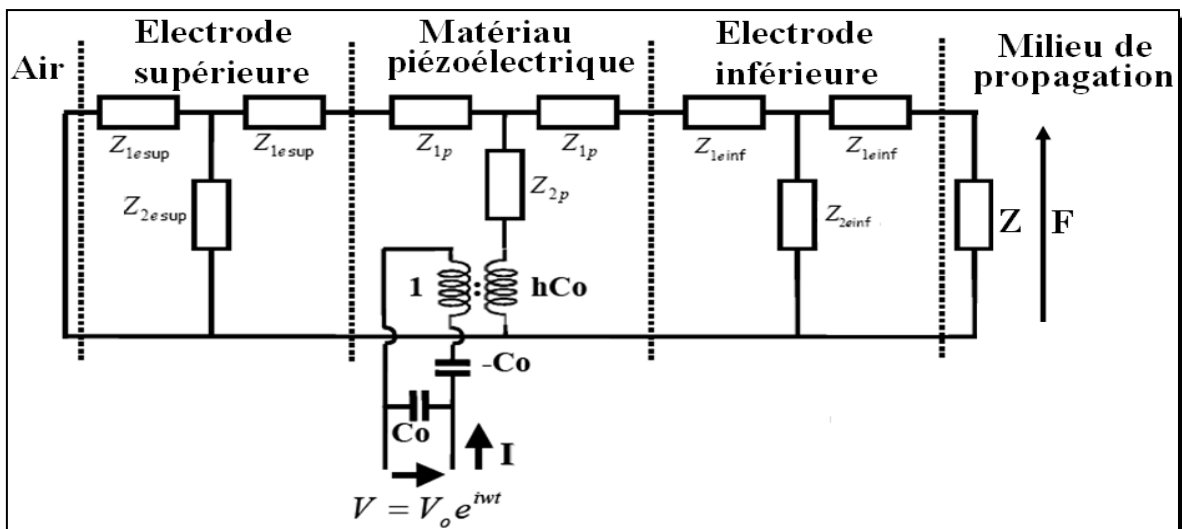


Figure II.13 : Modèle de Mason pour la capacité MIM d'un résonateur BAW.

En définissant les conditions aux limites pour chaque couche, on peut extraire la matrice impédance et grâce à la continuité des forces et des vitesses de déplacement aux interfaces entre couches, il est possible de modéliser une structure complète en connectant entre eux les modèles de chaque couche (Fig.II.13).

Ce modèle est particulièrement pratique et facilement exploitable lorsqu'on désire uniquement simuler le comportement électrique (c.-à-d., calculer l'impédance ou l'admittance électrique) du résonateur. Il permet de dissocier la partie mécanique de la partie électrique ainsi que la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. En plus, grâce à l'utilisation d'une équation transcendante dépendant de la fréquence, les harmoniques du mode fondamental sont également représentés.

Contrairement à d'autres modèles (tel que le MBVD), ce modèle permet l'étude du résonateur hors résonance, de même que la prédiction des harmoniques supérieurs. Ces avantages font que le modèle de Mason est un outil largement utilisé dans la simulation des résonateurs piézoélectriques. Pour une analyse plus complète (2D, 3D), d'autres méthodes de modélisation peuvent être utilisées telles que la modélisation par éléments finis.

II.9.4. Modélisation par éléments finis (MEF):

La méthode de simulation par éléments finis MEF a été appliquée depuis longtemps pour simuler les dispositifs piézo-électriques en 2D et 3D [38]. Le grand intérêt de la MEF tient dans sa capacité à tenir compte des géométries complexes, de l'anisotropie du cristal, des différents matériaux, du couplage de plusieurs domaines de la physique en même temps, ce qui permet de se placer dans un cas de figure le plus proche possible de la structure réelle. L'inconvénient majeur de cette méthode est le temps de calcul et la limitation en termes du rapport dimension latérale/épaisseur qui peut être gênante lors de l'étude d'un résonateur BAW. Cette méthode est souvent utilisée pour des études sur des nouvelles structures dont le comportement et l'influence des différents paramètres et matériaux sont à priori inconnus.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur la conception piézoélectrique, sur le résonateur piézoélectrique et sur le filtre piézoélectrique.

Nous avons présenté trois types de résonateur BAW, et chaque type a des domaines d'application privilégiés. Ils présentent également différentes difficultés de fabrication. Le choix du matériau piézoélectrique est fonction de l'application visée. Parmi les trois types de matériaux que nous avons évoqués, l'AlN présente le gros avantage de stabilité en environnement humide et son intégration CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor « technologie de fabrication des composants électroniques ») le rend incontournable. Pour le filtrage hautes fréquences [24].

Pour les applications de filtrage, il est nécessaire de bien connaître les fréquences de résonance et d'antirésonance des résonateurs. A partir des propriétés des matériaux et des équations piézoélectriques, modélisées par les différentes méthodes de calculs citées.

Chapitre III

Etude harmonique d'un résonateur
FBAR sous Comsol Multiphysics®

III.1. Introduction

Nous avons exposé dans le chapitre précédent les modèles qui permettent d'établir la modélisation analytique du comportement dynamique des résonateurs piézoélectriques dont la structure de base est de type membranaire, et comme application, nous allons traiter une analyse dynamique (en mode épaisseur) d'un résonateur de type FBAR sous le logiciel Comsol Multiphysics®.

Par ailleurs, une deuxième simulation sera établie dans le but est d'analyser l'influence des paramètres géométriques (épaisseurs, dimension latérale de la couche piézoélectrique et l'épaisseur des électrodes) ainsi que l'influence des matériaux constituant les électrodes et la couche piézoélectrique sur le comportement électromécanique de cette structure.

III.2. Fonctionnement du résonateur de type FBAR

La couche piézoélectrique subit une déformation due à une excitation électrique appliquée sur ses électrodes.

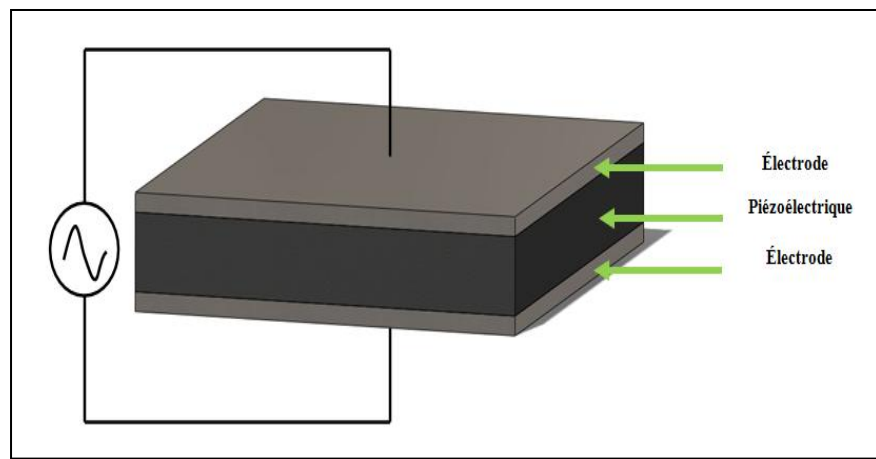


Figure III.1 : Fonctionnement d'un FBAR.

Le résonateur est excité pour générer les modes de vibration en épaisseur, chaque mode lui est associé une fréquence de résonance et une d'anti résonance f_0 , f_a .

Entre f_0 et f_a , l'impédance électrique du résonateur a un comportement purement inductif. A l'extérieur de cet intervalle de fréquence, il agit comme une capacité dont la valeur dépend de son dimensionnement. A f_0 , il est équivalent à une impédance nulle tandis qu'à f_a , il est équivalent à une impédance infinie comme l'illustre la figure suivante [46] :

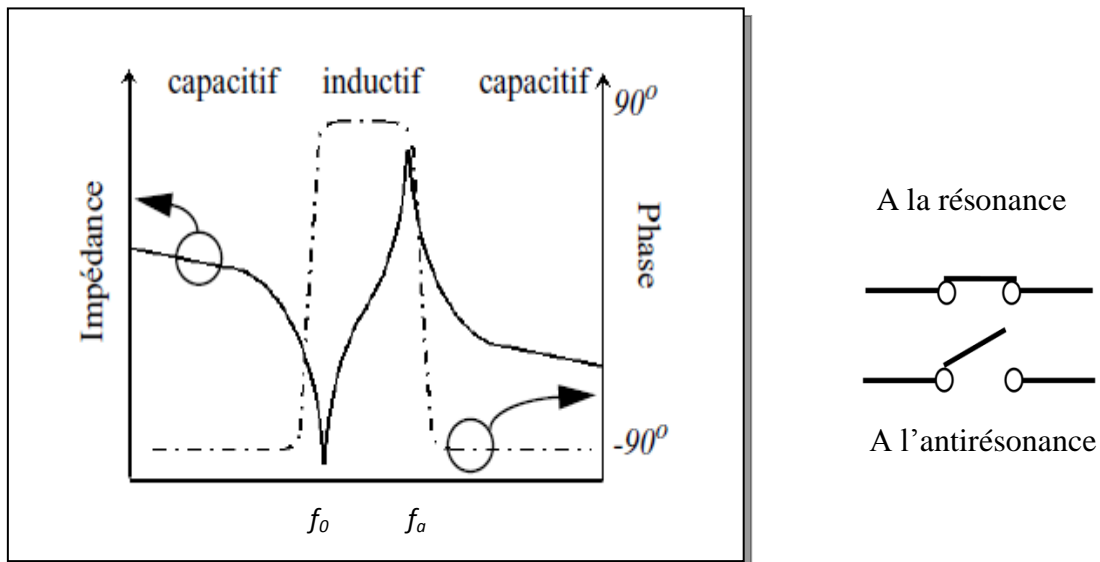


Figure III.2 : Comportement du résonateur FBAR.

III.3. Etude harmonique d'un résonateur piézoélectrique (FBAR)

Le but de cette étude est d'analyser l'influence des différents paramètres géométriques et propriétés des matériaux sur le comportement dynamique en mode épaisseur des structure membranaires constituant un résonateur piézoélectrique de type FBAR. Cette étude optimisera et orientera le choix des paramètres mis en jeu pour une éventuelle réalisation d'un produit.

III.4. Définition du corps d'épreuve

La membrane mince de matériau piézoélectrique représente le corps d'épreuve d'un résonateur FBAR. Il est de forme carrée, localement désolidarisé du substrat de silicium. Son épaisseur est très faible devant ses dimensions latérales. Cette membrane est modélisée par une plaque mince prise en sandwich entre deux plaques (électrodes), le tout encadré à sa périphérie et peut être suspendue sur un substrat (Fig.III.3a), (Fig.III.3b).

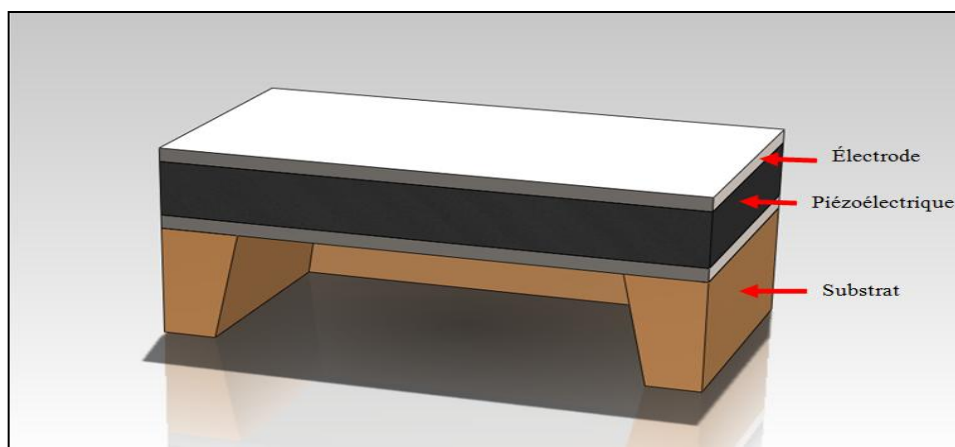


Figure III.3a : Vue en coupe d'un résonateur FBAR

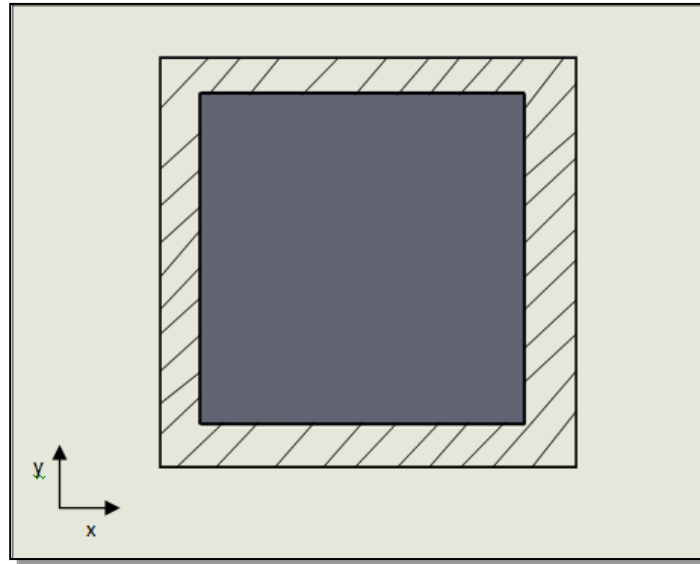


Figure III.3b : Vue de dessus représentant l'encastrement.

Nous procéderons à l'étude d'un résonateur libéré de son substrat, afin d'éviter l'action des ondes parasites dues à la résonance du substrat.

III.5. Analyse du comportement dynamique d'une membrane

piézoélectrique sous Comsol Multiphysics® V 4.3a.

Les simulateurs numériques se sont imposés comme un outil permettant de reproduire virtuellement les phénomènes physiques réels, et sont devenus indispensables pour des études d'ingénierie de structures 2D ou 3D complexes, grâce à leur efficacité et leur rapidité de calcul.

Ces simulations numériques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant souvent la méthode des éléments finis, tout particulièrement adaptée à la résolution numérique du comportement de structures continues et décrites par une équation aux dérivées partielles linéaires[44].

Il est intéressant de vérifier la validité des modèles théoriques résolus par la méthode des éléments finis sous le logiciel tel que Comsol multiphysics® en les comparant aux modèles purement analytiques.

III.5.1. Présentation du logiciel Comsol Multiphysics® V 4.3a.

Le logiciel Comsol, anciennement appelé FEMLab est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) par éléments finis [45]. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents

phénomènes physiques tels que : l'électrostatique, la thermique, l'écoulement des fluides ou encore la déformation des matériaux.

En effet, cet outil de simulation permet de traiter de nombreux problèmes couplés grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées (électrothermique, thermo-fluidique, etc.) décrits par les équations aux dérivées partielles [45].

Le logiciel Comsol Multiphysics® possède un environnement de programmation (Comsol script) dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « Solveurs », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendants du temps [46]. En effet, les différentes étapes proposées par cet outil sont :

1. La construction de la géométrie : la première étape est la création d'une géométrie 2D ou 3D.
2. Définition de la physique: choix du modèle, puis définition des constantes et des expressions.
3. Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est à disposition dans Comsol Multiphysics®. De plus, il est possible d'introduire d'autres propriétés des matériaux qui ne figurent pas dans cette bibliothèque.
4. Application des conditions aux frontières : on impose des conditions sur certaines frontières (selon le cas voulu).
5. Maillage de la structure : le maillage des domaines peut être adapté à la structure. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière sélective.
6. Exploitation des résultats Post-traitement : Lorsque le programme converge vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de *Post-processing (post traitement)* qui permet d'analyser et d'afficher les résultats.

III.5.2. Considérations à prendre lors d'une simulation

Le calcul par la méthode des FEM dépend du maillage des structures. En effet, plus le maillage est grand (moins on a d'éléments), plus les résultats seront approximatifs. De même, des éléments autres que des carrés ou des triangles équilatéraux peuvent modifier ce calcul. A cet effet, il faut prendre en considération le nombre d'éléments créés, car les temps de calcul sont d'autant plus longs qu'on a d'éléments.

Le logiciel est souvent limité dans le nombre de nœuds ou d'éléments possibles, d'où la commercialisation de plusieurs versions de type enseignement et recherche. En conclusion, un maillage grossier est à éviter: pour obtenir les meilleurs résultats possibles, il faudra optimiser le maillage pour le rendre très précis sans toutefois atteindre un trop grand nombre d'éléments [44], qui coûte un temps d'exécution très long.

III.5.3 Modélisation et simulation de la membrane (3D)

III.5.3.1 Choix du module « Dispositif Piézoélectrique » et du type d'analyse

Pour l'analyse des structures piézoélectriques en régime dynamique sous Comsol, nous choisissons :

- La sélection de la dimension d'espace de travail (fig.III.1) qui sert à construire notre modèle de corps d'épreuve en 3D.
- Le choix du type de simulation souhaité (tridimensionnel) dont la propagation d'onde électromécanique se fera suivant les 3 directions : x, y, z.



Figure III.4: Sélection de la dimension d'espace.

Le module « dispositif piézoélectrique » est une physique de la mécanique des structures (fig.III.5), c'est le module **multi-physique** le plus adapté à notre cas. Il combine l'effet mécanique avec l'effet électrique dû aux propriétés piézoélectrique du matériau de notre structure. Parmi les paramètres de sortie de ce module nous citons : l'admittance, la charge électrique, la déformation mécanique, etc...). Ils nous permettent de déterminer la fréquence de résonance et d'antirésonance des modes de vibration en épaisseur.

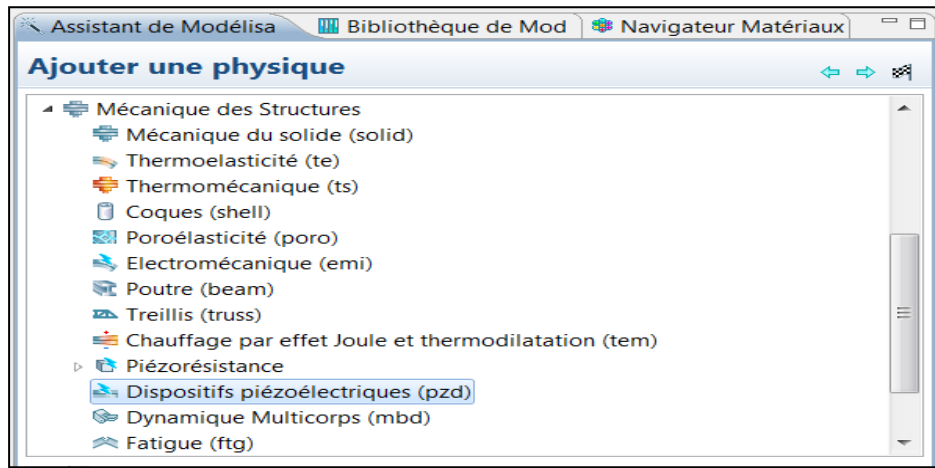


Figure III.5: Choix du module dispositifs piézoélectrique (pzd)

Concernant le type d'étude (fig.III.6), nous avons opté pour l'étude prédéfinie dite « domaine fréquentiel » qui est la plus appropriée à notre cas d'étude, puisque nous nous intéressons à la résonance de la membrane en mode épaisseur seulement. Vu l'ordre de grandeur de cette dernière, et selon les données relatives au domaine fréquentiel retrouvé dans l'état de l'art, la structure résonne dans le cas général dans un domaine variant entre 0.5 GHz et 11 GHz.

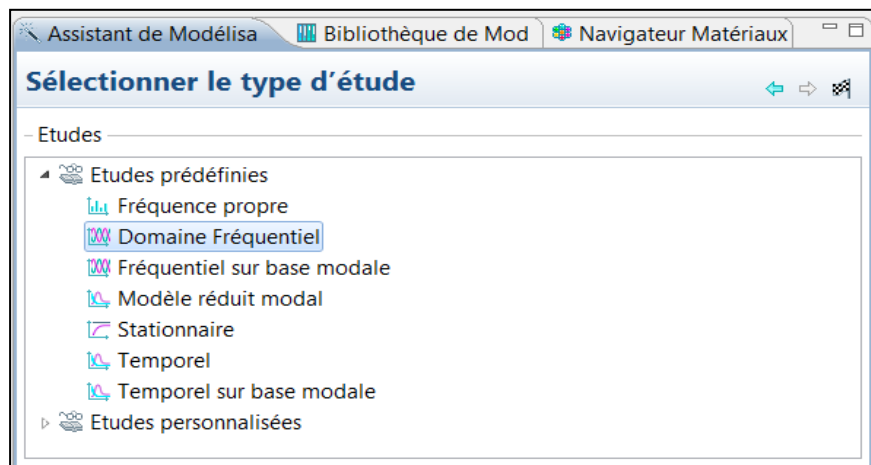


Figure III.6: Choix du type d'étude.

L'étape clé d'une bonne analyse par éléments finis réside dans la définition de la structure à étudier, sa géométrie, la finesse du maillage et sur la définition des conditions aux frontières. Cette méthode est certainement la plus simple puisqu'on conduit l'étude étape par étape (créer la géométrie, réaliser le maillage, poser les conditions aux limites. Et enfin lancer le calcul).

III.5.3.2. Géométrie du modèle

La géométrie du modèle que nous proposons est une membrane de forme carrée (constitué de 10 couches). Elle est composée d'un matériau piézoélectrique qui est pris en sandwich entre deux plaques (électrode) minces dont chacune d'elle est constituée de 5 couches. Les dimensions latérales des électrodes et de la couche piézoélectrique sont identiques [21].

La discrétisation (fig.III.7) des éléments (constituant la membrane) en plusieurs couches est une condition d'optimisation du maillage.

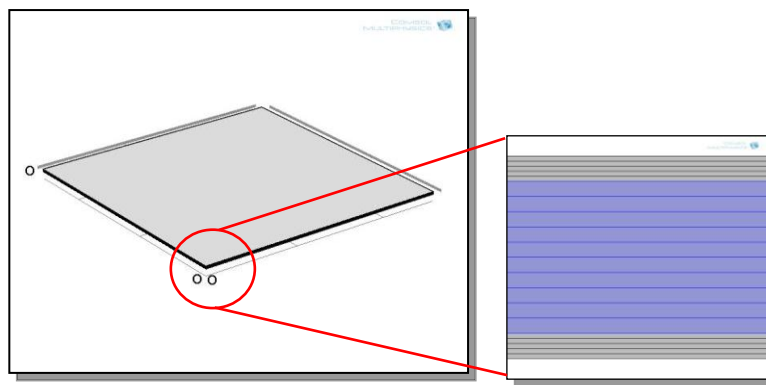


Figure III.7 : Discrétisation de la structure

III.5.3.4. Conditions aux frontières et chargement de la structure

Dans le cas idéal, les conditions aux frontières imposées doivent reproduire l'environnement où se trouve la structure durant son fonctionnement. La membrane est bloquée aux frontières (bords de couleur bleu) comme le montre la figure (III.8). Par ailleurs, elle est libre de se déplacer verticalement.

Le chargement électrique est représenté par une masse au niveau de l'électrode inférieure, et d'un potentiel dit « terminal » au niveau de l'électrode supérieure dont la valeur est de 1 Volt, représenté par des lignes rouge sur la figure. (III.8b).

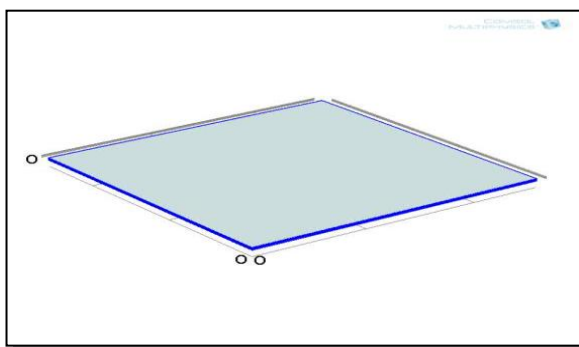


Figure III.8a: Encastrement de la structure.

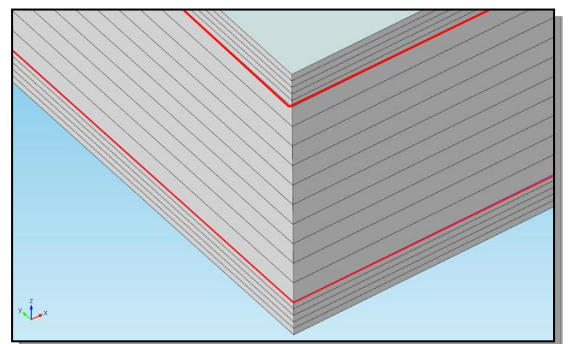


Figure III.8b : Chargement électrique de la structure.

III.5.3.5. Maillage de la structure

L'optimisation du maillage est essentielle afin d'assurer la meilleure précision de calcul qui permet d'avoir une bonne qualité des résultats. Cette structure peut être présentée par une géométrie discrète, où les paramètres sont exprimés pour chaque nœud du maillage (le nombre total de degrés de liberté est égal au nombre de nœuds multiplié par le nombre de degrés de liberté par nœud).

Nous cherchons donc à déterminer un maillage (le nombre d'éléments) suffisant et offrant un temps de calcul acceptable.

Concernant la discrétisation des structures (fig. III.9), le logiciel Comsol offre neuf possibilités de choix de maillage prédéfinies : extrêmement grossier, ..., grossier, normal, fin, plus fin, encore plus fin. Par ailleurs, il faut prendre en considération la taille de l'élément de base, dont le facteur d'échelle dans la direction Z ne doit pas dépasser l'épaisseur de la membrane.

Dans notre cas, le maillage prédéfini de taille « normale », représente le maillage le plus fin que nous pouvons traiter avec notre outil de calcul sans dépasser sa capacité de mémoire. Cependant, la taille de l'élément de base de ce type de maillage dépasse l'épaisseur de notre structure.

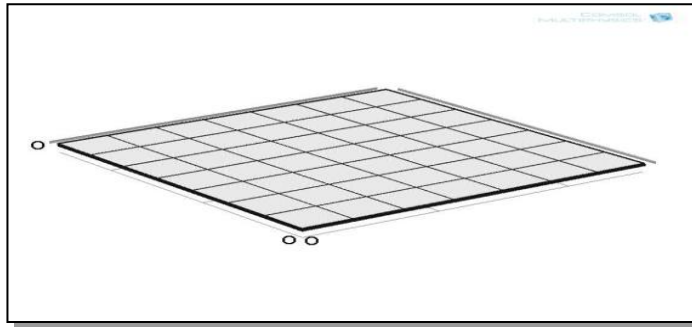


Figure III.9 : Maillage de la structure.

Pour y remédier, nous avons discrétiser chaque élément de la structure en plusieurs couches et procéder à un maillage géométrique de type extrudé de la structure, cela permet de faire le meilleur compromis entre les restrictions de l'outil de calcul la qualité des résultats.

Information sur l'outil de calcul :

- Nous avons effectué les calculs au moyen d'un **PC DELL PRECISION M4400**, sous **Windows 7**, **Intel® Core (TM) 2 Duo CPU P8600@2.40GHz**, **2.40GHz**, **2Go de RAM**.
- Le maillage entier consiste en 980 éléments, et le nombre de degrés de liberté résolus est de 32400.

On peut aussi parler de maillage du domaine fréquentiel, il représente le nombre de fréquences balayées par le calculateur, et il doit satisfaire les mêmes conditions que celles du maillage géométrique.

III.6. Exploitation des résultats

L'analyse des courbes d'admittance électrique et des profils de déplacements mécaniques nous permet de faire l'étude électromécanique dans le domaine fréquentiel de cette structure. Après une étude de convergence en fonction de la qualité du maillage, nous avons obtenu les trois premières fréquences : la fondamentale suivi de deux harmoniques (en mode épaisseur) (fig.III.10).

Le profil de déplacement en forme de ventre, explique la résonance en mode épaisseur, ou le déplacement est plus grand que celui observé à l'anti résonance : résonance (52 μm), antirésonance (5 μm).

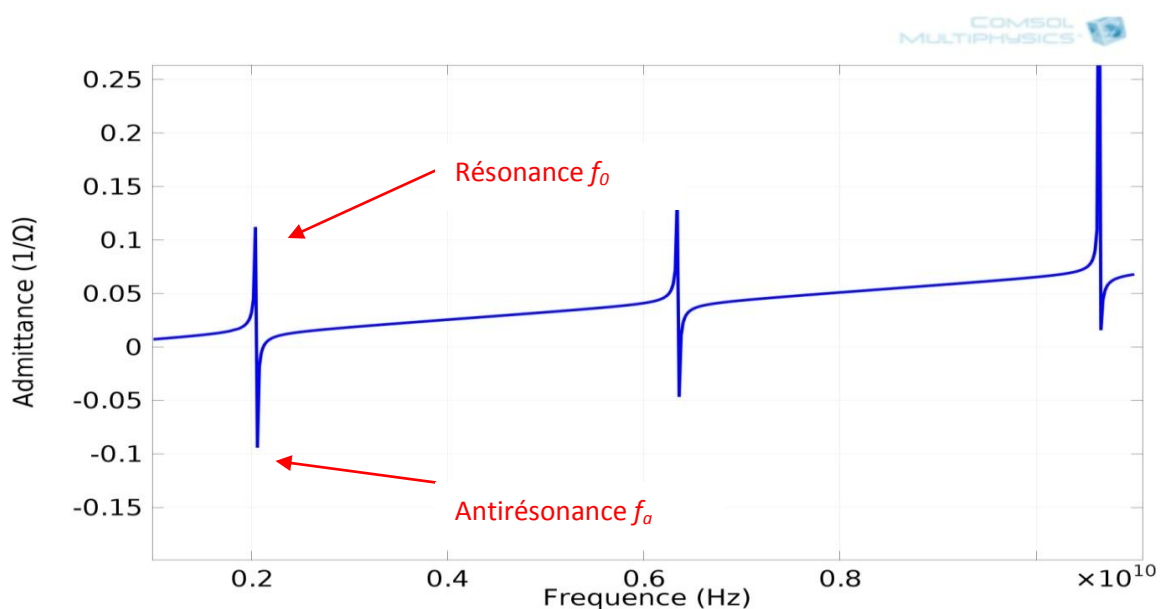


Figure III.10 : Allure de l'admittance électrique.

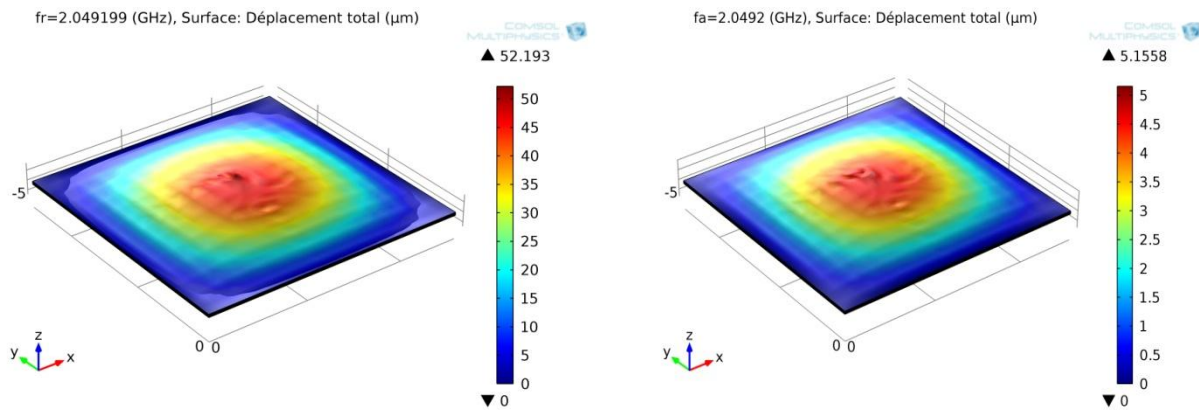


Figure III.11 : Profil de déplacement a la résonance et a l'anti résonance.

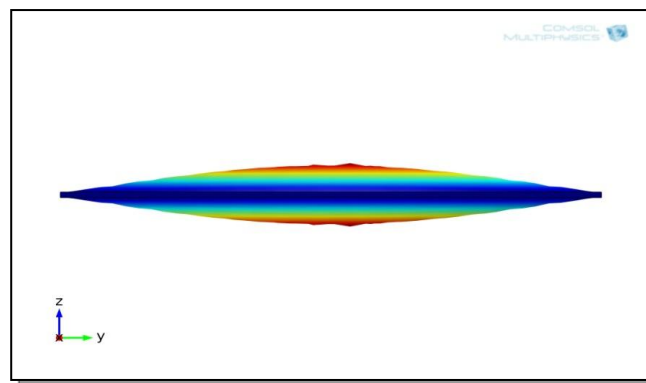


Figure III.12: Vue de face du profil de déplacement en résonance.

III.7. Etude de la membrane piézoélectrique

Dans cette première partie nous allons analyser l'influence de l'épaisseur, des dimensions latérales et du matériau sur la résonance de la couche piézoélectrique prise seule, libérée des électrodes.

L'influence des électrodes fera l'objet d'une deuxième partie.

III.7.1. Influence de la dimension latérale

Pour débiter, nous modéliserons une membrane de $1.5 \mu\text{m}$ d'épaisseur faite en ZnO. Le but étant de balayer les dimensions latérales de la structure. La figure (III.13) représente l'allure et l'évolution des fréquences de résonance de cette membrane en fonction de différentes valeurs de dimensions latérales.

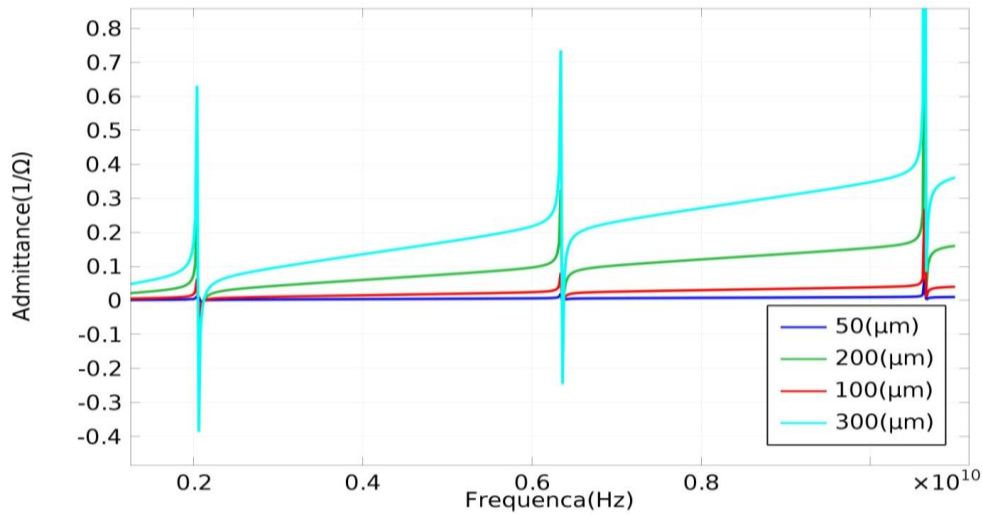


Figure III.13 : Influence de la dimension latérale sur le domaine fréquentiel.

Interprétation des résultats :

Nous remarquons que les fréquences propres restent inchangées, alors que la pente porteuse d'admittance électrique varie en fonction de la dimension latérale de la membrane. Ceci est justifié par l'équation suivante :

$$|y| = |j2\pi f C_0| = 2\pi f C_0 \quad (\text{Eq. III. 1})$$

Avec :

$$C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{L^2}{e} \quad (\text{F})$$

y : Admittance électrique (Ω^{-1})

C_0 : Capacité électrique (F).

ϵ_r : Permittivité relative (sans unité).

ϵ_0 : Permittivité dans l'air (F/cm).

e : Epaisseur de membrane.

L : La dimension latérale.

f : La fréquence (Hz).

$\epsilon_r, \epsilon_0, e$: étant inchangées (même matériau), l'accroissement de « L » induit à l'accroissement de C_0 .

L'augmentation de la dimension latérale fait croître la capacité de charges électriques. Par contre nous remarquons que la fréquence de résonance ne change pas (f_0 ne dépend pas de L), cela est due au fait que nous nous trouvons dans le mode fondamental en mode épaisseur (e fixe).

III.7.2. Influence de l'épaisseur de la couche piézoélectrique

La membrane modélisée est toujours en ZnO, elle est carrée de $130\mu\text{m}$ de côté. Les conditions de modélisation de cette membrane sont déjà décrites. Nous procédons au balayage de l'épaisseur.

Les figures (III.14) et (III.15) représentent l'allure et l'évolution de l'admittance et de la fréquence de résonance respectivement et ce pour différentes valeurs de son épaisseur.

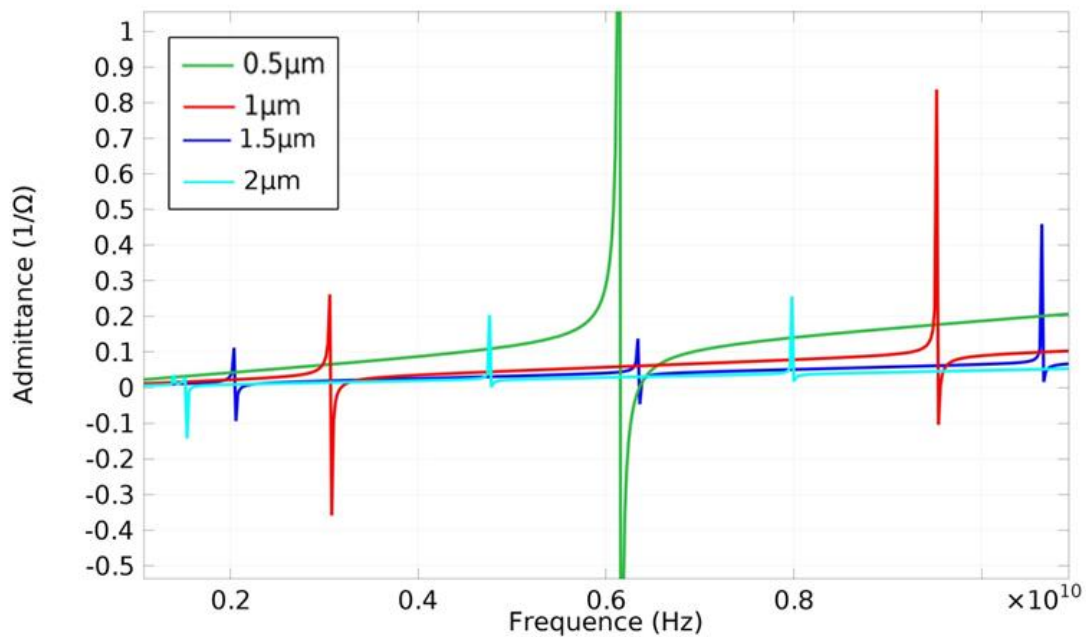


Figure III.14: Influence de l'épaisseur de la couche piézoélectrique sur l'admittance électrique du résonateur.

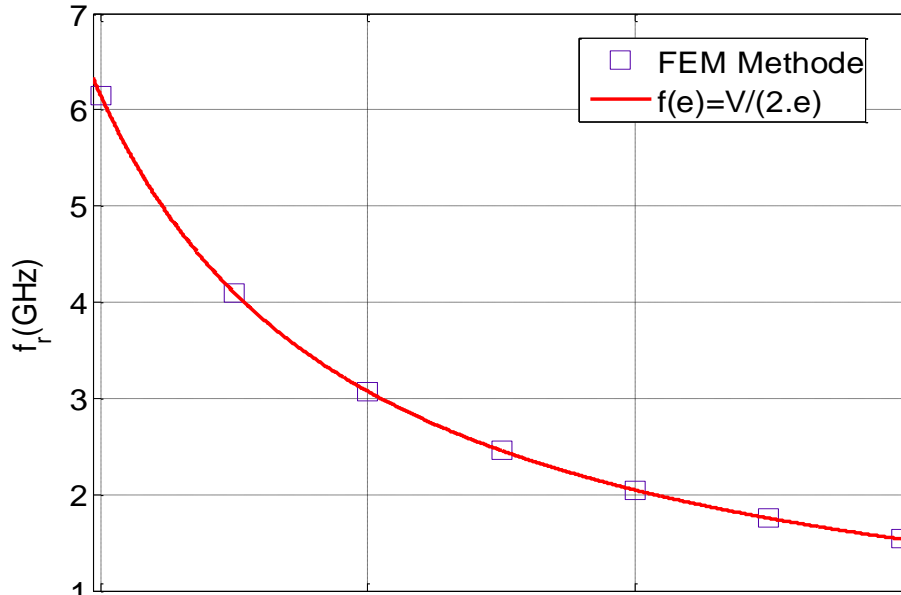


Figure III.15 : La fréquence de résonance en fonction de l'épaisseur.

Nous observons sur la figure III.14 que l'augmentation de l'épaisseur provoque l'abaissement de la fréquence fondamentale vers les basses fréquences, et par conséquent les harmoniques aussi car :

$$f_n = (2n + 1)f_0 \quad (\text{Eq. III. 2})$$

f_n : Fréquence du $n^{\text{ème}}$ mode.

C'est pour cette raison que dans la gamme observée, les harmoniques d'ordre supérieur qui correspondent aux petites épaisseurs n'apparaissent pas. Elles se situent à des fréquences plus importantes.

Selon la figure (III.15), représentant la fonction ($f_0=f(e)$), nous déduisons que la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la membrane, selon la relation suivante :

$$f_0 = \frac{v}{2e} \quad (\text{Eq. III. 3})$$

Avec :

f_0 : Fréquence de résonance.

v : Vitesse de propagation longitudinale dans le milieu.

e : Epaisseur de membrane.

De ce fait, si nous faisons un fit (interpolation) de la courbe des résultats obtenus par éléments finis, par la fonction $f(e) = v/2e$ avec le logiciel MatLab, nous obtiendrons la valeur de la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau, ceci représente une méthode de détermination de V .

III.7.3. Influence du matériau piézoélectrique

Pour cette simulation, nous fixons la dimension latérale à $L=130 \mu\text{m}$ et l'épaisseur à $e=1.5 \mu\text{m}$ et nous procédons à un balayage des matériaux. La figure (III.16) représente l'évolution des modes de vibrations de la membrane pour différents matériaux.

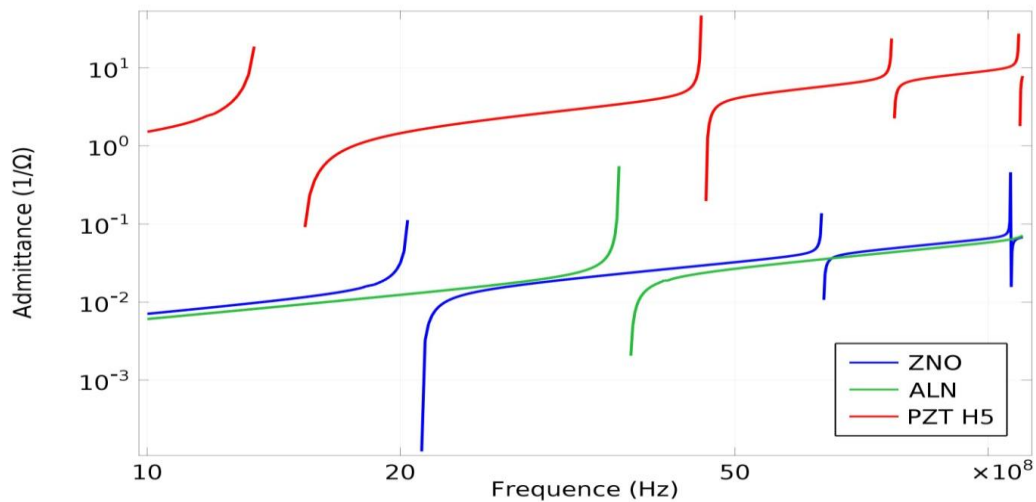


Figure III.16 : Influence du matériau constituant la couche piézoélectrique sur les modes de résonances.

Nous observons une différence de la pente porteuse d'admittance qui est défini par la capacité statique C_0 (Eq. III. 1). Puisque $C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{L^2}{e}$ et les paramètres : L , e , ϵ_0 , sont fixés, le fait de balayer le matériau fait varier la valeur de la permittivité relative qui fait varier la capacité .

Nous remarquons que la pente du PZT est plus grande que celle des autres matériaux représentés, est que la pente de l'AlN et du ZnO sont proches. Cela est due à :

$$\epsilon_{r(\text{ZnO})} = 10.204 \text{ (sans unité).}$$

$$\epsilon_{r(\text{AlN})} = 10.2566 \text{ (sans unité).}$$

$$\epsilon_{r(\text{PZT})} = 3400 \text{ (sans unité).}$$

III.8. Etude de l'influence des électrodes sur la réponse de la structure

Dans cette partie nous allons étudier l'influence de la géométrie des électrodes (épaisseur), ainsi que celle de leurs matériaux sur la réponse fréquentielle de la structure.

III.8.1. Influence du matériau des électrodes

Pour cette étude, nous simulerons une membrane de matériau piézoélectrique ZnO, de dimension latérale $L=130\ \mu\text{m}$ et de $1.5\ \mu\text{m}$ d'épaisseur (e), prise en sandwich entre deux électrodes de 250nm d'épaisseur, de matériau élastique linéaire et de même géométrie latérale que la couche piézoélectrique. Par la suite, nous procéderons au balayage du matériau.

Les figures (III.17) et (III.18) représentent respectivement l'évolution dans le domaine de fréquences de l'admittance électrique d'entrée de cette structure pour différents matériaux des électrodes et l'influence de la masse volumique des électrodes sur la fréquence de résonance

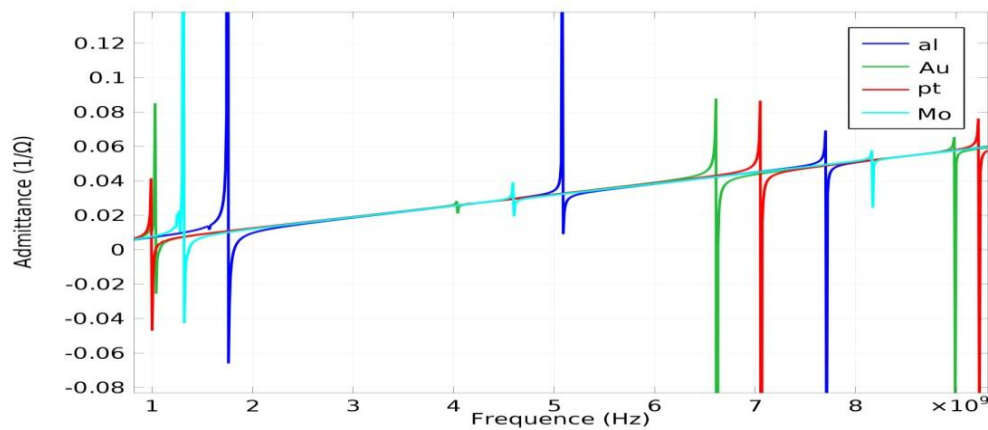


Figure III.17 : Influence du matériau constituant les électrodes sur l'admittance électrique d'entrée du résonateur.

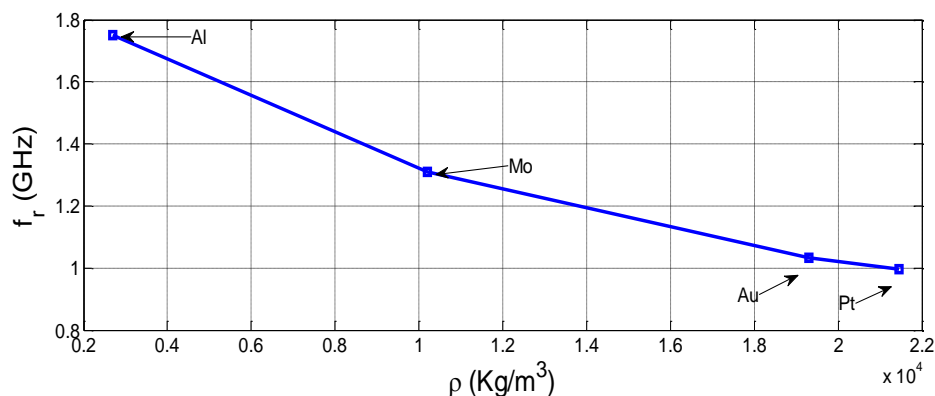


Figure III.18 : Influence de la masse volumique des électrodes sur la fréquence de résonance.

Nous remarquons que l'augmentation de la densité du matériau fait abaisser les fréquences vers les basses fréquences, puisque les paramètres géométrique ne changent pas. Cela est dû à l'augmentation de la charge mécanique sur la couche piézoélectrique.

Ces résultats expliquent le fonctionnement des micros balances utilisées dans la fabrication des couches minces qui donne le chifte de la fréquence en fonction de l'épaisseur du matériau déposé.

III.8.2. influence de l'épaisseur des électrodes

Pour la dernière étude, nous simulons une membrane de matériau piézoélectrique ZnO, de dimension latérale $L=130 \mu\text{m}$, d'épaisseur $e=1.5 \mu\text{m}$, prise en sandwich entre deux électrodes de matériau élastique linéaire de même géométrie latérale que la couche piézoélectrique, et nous procéderons au balayage de l'épaisseur des électrodes pour les 4 matériaux étudiés dans l'analyse précédente (Al, Mo, Au, Pt).

Les figures (III.19) et (III.20) représentent respectivement :

- l'évolution de l'admittance en onction de la fréquence pour différentes épaisseurs de l'électrode en aluminium.
- L'influence de l'épaisseur des électrodes sur la fréquence de résonance pour quatre matériaux constituant l'électrode, à savoir : Al, Mo, Au et Pt.

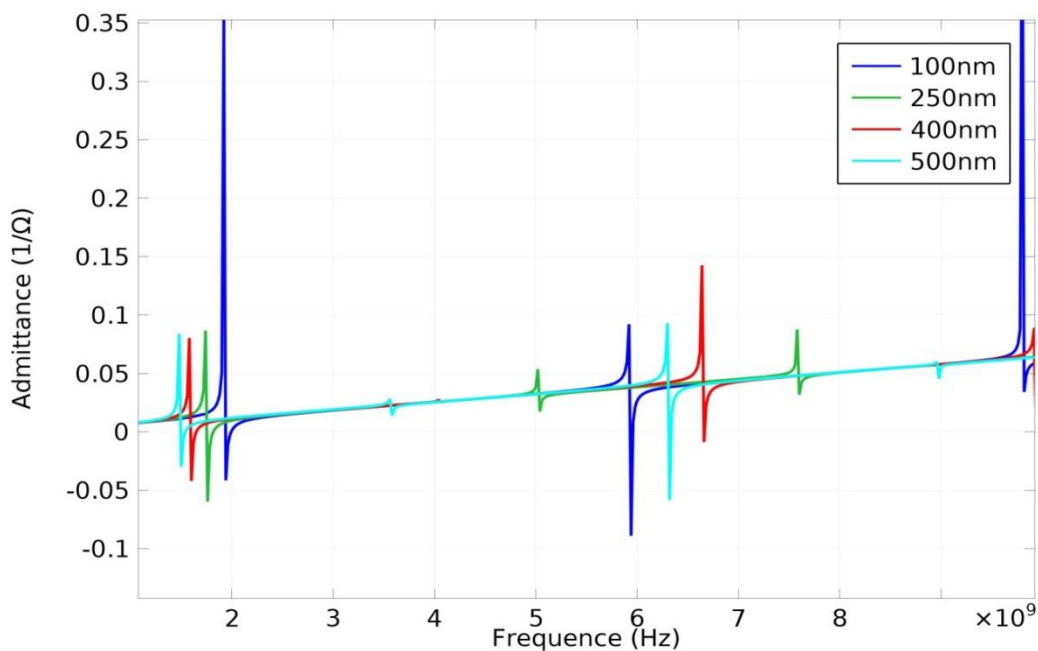


Figure III.19 : Influence de l'épaisseur des électrodes en Al sur l'admittance.

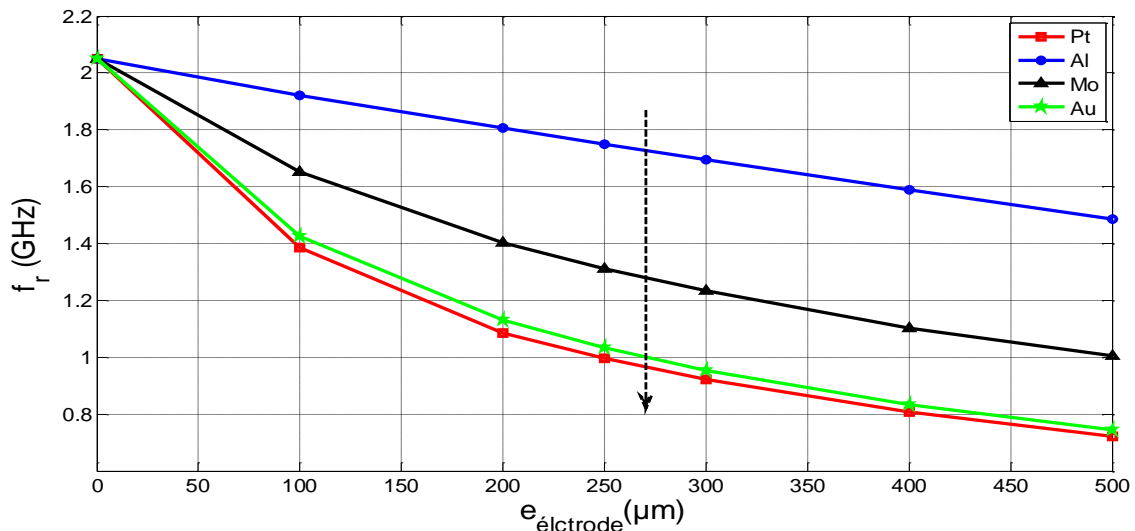


Figure III.20 : Influence de l'épaisseur des électrodes sur la fréquence de résonance pour quatre matériaux constituant l'électrode.

Nous remarquons que pour un matériau donné, au fur et à mesure que l'épaisseur des électrodes augmente, la fréquence de résonance chute vers les basses fréquences (voir Eq. III. 3). Ceci peut être expliqué par le fait que la résonance mécanique est donnée par l'épaisseur totale de la structure : $e_{tot} = e_{piezo} + 2e_{electrode}$.

Nous remarquons aussi que pour une épaisseur des électrodes fixe dans la figure (III.20), l'abaissement de la fréquence de résonance est d'autant plus importante pour le Pt que pour l'Au et Mo, puis suit l'Al où peut être expliqué par l'effet de la charge mécanique sur les faces de la couche piézoélectrique qui est proportionnelle à la masse volumique ρ du matériau (fig. III.18).

III.9. Conclusion

La simulation du comportement physique d'une structure sous Comsol Multiphysics® nous permet de réduire le temps d'étude alloué au développement du produit et nous permet de résoudre notre problème en tenant compte de plusieurs contraintes (encastrement, etc). Pour notre cas, la détection des modes de résonances en mode épaisseur est seulement faisable par la lecture du profil d'admittance électrique ou de la charge électrique. Cependant, une bonne maîtrise du logiciel est nécessaire afin de choisir le modèle le plus approprié à l'étude, et d'introduire les conditions exactes de fonctionnement de la structure et d'exploiter au maximum les résultats obtenus dont la précision est liée à la finesse du maillage qui est choisi en fonction de la capacité de l'outil de calcul.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Ce travail avait pour but l'étude de l'influence des paramètres géométrique et des matériaux sur la repense électromécanique des structures BAW, nous avons décomposé le problème en trois principaux chapitres pour pouvoir répondre au cahier des charges.

La présentation des microsystèmes au cours du premier chapitre, nous a permis de connaître la notion de MEMS, ainsi que celle de salle blanche, des outils de conception en microsystèmes et les technologies de leurs fabrication. La multiplicité des domaines d'application, fait que les MEMS représentent une très grande part de l'industrie moderne, cela fait que la maîtrise des techniques de conceptions et de fabrications des microsystèmes est primordiale.

L'introduction des résonateurs piézoélectriques c'est faite à la première partie du deuxième chapitre, ou nous avons expliqués la piézoélectricité et énumérer les différents matériaux piézoélectriques et les différents types de résonateurs piézoélectriques. Cette introduction nous a permis de restreindre notre étude au résonateur de type FBAR appartenant a la grande famille des microsystèmes.

La deuxième partie du second chapitre présente une approche théorique ou nous avons pris connaissance des modèles analytiques qui régissent le comportement électromécanique des structures piézoélectriques résonantes. Le but de ce chapitre est de faire connaître ces modèles de calcul qui diffèrent de la méthode choisi pour notre analyse qui est l'étude par éléments finis sous Comsol Multiphysics®.

L'élaboration d'une étude qui nous permet de prédire le comportement électromécanique d'un résonateur piézoélectrique représente le but du troisième chapitre, et pour cela, nous avons commencé par définir notre corps d'épreuve, puis par présenter le logiciel Comsol Multiphysics®, ensuite nous avons élaboré une procédure pour pouvoir simuler correctement le comportement du résonateur FBAR. Enfin, nous avons analysé les résultats obtenus par la simulation sous Comsol Multiphysique®, afin d'orienter une procédure de fabrication de résonateurs FBAR, en précisant la concordance des paramètres géométriques et du choix des matériaux pour atteindre une réponse fonctionnelle du résonateur pour une fréquence voulue.

Selon la documentation [41], le meilleur rendement piézoélectrique du Zno est obtenue en utilisant des électrodes faites d'aluminium, suit le molybdène, suivi de l'or, et

enfin le platine. Ceci justifie notre choix d'étude de l'influence de ces quatre matériaux sur les caractéristiques électriques et mécaniques du résonateur.

Concernant l'influence des matériaux, nos résultats de simulation montrent que l'augmentation de la charge mécanique sur les faces de la couche piézoélectrique fait chuter la fréquence de résonance de la structure et ceci pour la même épaisseur des électrodes, cependant, l'aluminium est l'électrode qui fait chuter le moins la fréquence de résonance suivi du molybdène, puis de l'Or et enfin du platine. Par contre, du point de vue conduction électrique, le platine présente le meilleur choix à faire [41]. Il est nécessaire d'opter pour un compromis entre les propriétés voulues (électriques, mécaniques, rendement piézoélectrique) afin de réaliser une conception judicieuse.

Concernant l'influence des paramètres géométriques, la fréquence de travail du résonateur est le paramètre fondamental recherché dans la conception d'un FBAR. Or la fréquence de résonance est directement liée à l'épaisseur de la couche piézoélectrique, puis de celle des électrodes et leurs matériaux constituant. Une fois le choix de l'épaisseur de la couche piézoélectrique et des électrodes et des matériaux finis, on peut faire varier la valeur de la capacité statique $C_0(F)$, en variant les dimensions latérales L .

Comme perspective, nous allons reproduire nos simulations en utilisant comme outil, une centrale de calcul qui nous permettras d'affiner le maillage et d'augmenter ainsi le nombre de nœuds afin d'obtenir des résultats plus précis.

Références bibliographiques

- [1] S.D.Senturia, "Feynman revisited IEEE, proceeding on microelectromechanical systems". Workshop (MEMS'94), 1994 page(s): 309 312.
- [2] J-P Della Mussia, "Le marché des MEMS sur une croissance de 16 % l'an", *Electronique International* (n° 614) 2005.
- [3] Mir, Salvador, "Dispositifs et physique des microsystèmes sur silicium". *Traité EGEM*, Hermès Science Publications (Paris) 2002.
- [4] S.D Senturia, "Microsystem Design". *Traité EGEM*, Hermès Science Publications (Paris) 2002.
- [5] M.Gad-el-Hak, "MEMS Handbook", CRC PRESS 2002.
- [6] N.Maluf, K.Williams, "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering", Artech House 2004.
- [7] M.Madou, "Fundamentals of microfabrication ", Kluwer Academic (Boston) 2001.
- [8] Mir, Salvador, "Conception des microsystèmes sur silicium". *EGEM*, Hermès Science Publications, Paris, septembre 2002.
- [9] Tayeb Mohammed Brahim, "MicroTechnologie de Surface". Programme TEMPUS, CDTA, Alger, Juin 2005.
- [10] Acheli Abdelhakim, "Introduction aux microsystèmes". Polycopie du module ICAO des microsystèmes, option : microsysteme, USDB, Blida 2012.
- [11] N.Boudeau, G.Cabodevila, "Technologie de fabrication des microsystèmes". Polycopie du module MEC7 Procédés de micro fabrication, option : mécanique, ENSMM, version 2007.
- [12] A.Boukabache, P.Menini, P.Pons, "Microcapteurs de pression". R2 070-Techniques de l'ingénieur.

- [13] D.Bouyge, "Systèmes Lasers impulsions compacts et dispositifs hyperfréquences accordables bases sur l'intégration de composants MEMS". Thèse doctorat, Université de Limoges, octobre 2007.
- [14] Acheli Abdelhakim, "Etude du comportement mécanique des éléments de structure MEMS". Mémoire de Master II en mécanique, option : Conception mécanique, Université Ammar Telidji de Laghouat, novembre 2011.
- [15] www.microelectronique.univ-rennes1.fr, 04/2013.
- [16] K.E.Petersen, "Silicon as a Mechanical Material", Proceedings of the IEEE, Vol 70, No 5, May 1982
- [17] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, Neil White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech House 2004.
- [18] David Petrou, "Etude théorique et expérimentale des techniques d'assemblage et de mise en boîtier pour l'intégration de microsystèmes radiofréquences". Thèse doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, décembre 2006,
- [19] Ilya Mirman, "Empowering MEMS Designers with Easy-to-Use 3D", 2003.
- [20] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Susceptance>, 15/04/2013.
- [21] R.Serhane, H.khales, N.derguini, A.Acheli, A.Hassein-Bey, TBoutkedjirt, " Effet de l'encastrement de la membrane sur la réponse électromécanique d'un résonateur FBAR (Film Bulk acoustic Resonator) ". CNPA'2012, Mostaganem, Algérie du 20 au 22 Novembre 2012
- [22] H.P.LOBL, M.KLEE, R.MILSON, R.DEKKER, C.METZMACHER, W.BRAND and P.LOK, "Materials for Bulk Acoustic Wave (BAW) Resonators and Filters" Journal of the European Ceramic Society No. 21, pp. 2633-2640
- [23] R.AIGNER, "High Performance RF-Filters Suitable for Above IC Integration: Film Bulk Acoustic Resonators (FBAR) on Silicon" IEEE Custom Integrated Circuits Conference, pp. 141-146, 2003.

- [24] Ji FAN, "Analyse et simulation de résonateurs piézoélectriques pour des applications MEM filtrage", mai 2009
- [25] YLILAMMI, J.ELLA, M.PARTANEN and J.KAITILA " Thin Film Bulk Acoustic Wave Filter". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 49, No. 4, pp. 535-539, april 2002
- [26] KRISHNASWAMY, J.F.ROSENBAUM, S.S.HORWITZ and R.MOORE, "Film Bulk Acoustic Wave Resonator and Filters Technology". IEEE MTT-S Digest, pp. 153-155, 1992
- [27] E.S.FERRE-PIKAL, M.C.DELGADO ARAMBURO, F.L.WALLS and K.M.LAKIN "1/f Frequency Noise of 2-GHz High-Q Thin-Film Sapphire Resonators". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 48, No. 2 pp. 506-510, march 2001
- [28] K.M.LAKIN, J.BELSICK, J.F.MCCARRON and K.T.MCCARRON "High Performance Stacked Crystal Filters for GPS and Wide Bandwidth Application". IEEE Ultrasonic symposium, october, 2001
- [29] R.WEIGEL, D.P.MORGAN, J.M.OWENS, A.BALLATO, M.LAKIN, K.HASHIMOTO and C.W.RUPPEL, "Microwave Acoustic Materials Devices and Applications". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.50, No.3, march 2002
- [30] Q.X.SU, P.KIRBY, E.KOMURO, Q.ZHANG and R.WHATMORE, "Thin-Film Bulk Acoustic Resonators and Filters using ZnO and Lead-Zirconium-Titanate Thin Films". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.49, pp. 769-778, April 2001
- [31] G.R.KLINE and K.M.LAKIN, "1.0 GHz Thin-Film Bulk Acoustic Wave Resonators on GaAs". Applied Physic Letters, vol.43, pp. 750-751, October 1983
- [32] K.W.KIM, J.G.YOOK and H.K.PARK, "CAD Model Analysis of the Air-gap Type FBAR" Microwave and Optical Technology Letters, pp. 384-385, vol.34, No.5, september 2002

- [33] C.W. SEABURY, J.T.CHEUNG, P.H.KOBRIN, R.ADDISON and D.P.HAVENS "High Performance Microwave Air-Bridge Resonators". IEEE Ultrasonic Symposium, pp. 909-911, 1995
- [34] M.HARA, J.KUYPERS, T.ABE and M.ESASHI, "MEMS Based Thin Film 2 GHz Resonators for CMOS Integration". IEEE MTT-S Digest, pp. 1797-1800, 2003.
- [35] Ji FAN, "analyse et simulation de résonateurs piézoélectriques pour des applications de filtrage", mai 2009
- [36] K. M. LAKIN, "Modeling of Thin Film Resonators and Filters". IEEE MTT-S Digest, pp. 149-152, 1992.
- [37] K.M.LAKIN, "A Review of Thin-Film Resonator Technology". IEEE Microwave Magazine, pp. 61-67, décembre, 2003.
- [38] Nizar BEN HASSINE, "Etude de la fiabilité des composants à ondes acoustiques de volume (BAW) pour des applications Radio Fréquence", Thèse doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 29 octobre 2009.
- [39] Stéphane Razafimandimby, "Accord en fréquence de résonateurs BAW appliqué au filtrage et à la synthèse de fréquences RF", Lille, décembre 2007.
- [40] W.Harba, "Développement de méthodes thermiques compactes en vue de la modélisation électrothermique des composants de puissance". Thèse doctorat, Université Paul sabatier, Toulouse, juin 2007.
- [41] Emmanuel DEFAÏ, "Elaboration et caractérisation de couches minces piézoélectriques de Pb (Zr, Ti)O₃ sur silicium pour applications aux microsystèmes", Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, année 1999.

Annexes

Annexe A

➤ Définition du LIGA

Le **procédé LIGA** ou **LIGA-Process**, est un procédé utilisé pour la fabrication de microsystèmes, développé vers la fin des années 1970 au *Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)*. Ce procédé est originellement développé dans le cadre de travaux sur la séparation des isotopes de l'uranium.

Le sigle "LIGA" provient de l'allemand. C'est une abréviation pour "Röntgenlithographie, Galvanoformung, Abformung", qui représentent les différentes étapes de ce procédé :

- La lithographie aux rayons X : à partir d'un premier masque réalisé à l'aide d'un canon à électrons, le motif en deux dimensions des microstructures est dupliqué par lithographie aux rayons X sur une couche de polymides photosensibles. L'épaisseur et le matériau du masque ainsi que la largeur des microstructures déterminent l'épaisseur maximale de la couche de polymides. Le motif est ensuite développé chimiquement pour pouvoir passer à l'étape suivante.
- La galvanisation par électrodéposition : du métal est déposé dans les microstructures développées précédemment, sur toute l'épaisseur de la couche de polymides subsistants. La structure ainsi obtenue sert soit directement au formage dans l'étape suivante si l'épaisseur est suffisante pour l'application envisagée (le métal déposé est alors du nickel ou des alliages de nickel, présentant une bonne conductivité et les qualités requises pour une électrodéposition de qualité, ainsi que de bonnes propriétés mécaniques pour le formage), ou est utilisée en tant que masque pour répéter la première étape de lithographie aux rayons X, afin d'obtenir des structures plus épaisses (le métal déposé est alors de l'or, présentant d'excellentes qualités électroniques pour l'électrodéposition ainsi qu'une haute absorption des rayons X).
- Le formage : après dissolution des polymides subsistants autour desquels s'est développée la galvanisation, le bloc de métal est préparé pour servir d'outil de formage. On peut alors fabriquer en série des microstructures en polymère par formage (en matriçage, estampage ou moulage par injection).

Ce procédé permet de fabriquer des microstructures relativement épaisses (jusqu'à 1 mm d'épaisseur) en petite et moyenne série.

Il peut être exploité non seulement avec le silicium mais aussi et surtout avec nombre de matériaux pour réaliser des microstructures 3D tels des métaux, des céramiques, mais aussi des verres et des polymères ce qui élargit considérablement le champ d'application des MEMS. Dans ce procédé le matériau constitutif de la microstructure va être déposé uniquement sur les zones où elle sera bâtie. Ensuite le moule est dissous chimiquement. Des polyimides photosensibles sont utilisés pour la réalisation des moules selon un procédé photolithographique classique (mais inversé puisque le polyimide joue le rôle d'un photoresist négatif).

ANNEXE B

➤ MIROIR DE BRAGG

Le miroir de Bragg, mis au point par William Lawrence Bragg (lauréat du prix Nobel de physique de 1915), est une succession de surfaces planes transparentes d'indices de réfraction différents. Il permet de réfléchir, grâce à des phénomènes d'interférences constructives, 99,5 % de l'énergie incidente. Ceci est possible à condition que l'onde incidente soit proche de l'incidence normale. Aucun autre miroir ne peut égaler ce résultat (les pertes diélectriques étant plus faibles que les pertes métalliques pour les longueurs d'ondes optiques).

Annexe C

➤ CMOS

La technologie CMOS, ou Complementary Metal Oxide Semiconductor, est une technologie de fabrication de composants électroniques et, par extension, l'ensemble des composants fabriqués selon cette technologie. À l'instar de la famille Transistor-Transistor logic (TTL), ces composants sont en majeure partie des portes logiques (NAND, NOR, etc.) mais peuvent être aussi utilisés comme résistance variable.