

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



N°D'ORDRE : M .../2014

MEMOIRE

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MAGISTER

SPECIALITE : ELECTRONIQUE

OPTION : Microélectronique et Nanoélectronique

Par

BOUDJELLA SABRIA

***ETUDE ET SIMULATION DES MICROSYSTEMES A BASE DE LA
TECHNOLOGIE MEMS***

Membres du jury

Mr BOUKORTT Abdelkader	Président	Professeur (Université de Mostaganem)
Mr HADRI Baghdad	Examineur	Professeur (Université de Mostaganem)
Mme BENOUDNINE Hadjira	Examinatrice	MCA (Université de Mostaganem)
Mme HOCINE Rachida	Encadreur	MCA (Université USTO-MB Oran)

DÉDICACE

A mes Défunts parents

A mon mari pour sa patience et son amour

A mes filles Rosa , Fatima et Djamila Lydia

A toute ma famille

A vous tous !

*La force motrice plus puissante que l'électricité,
La vapeur et l'énergie atomique, c'est la volonté*

« Albert Einstein »

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon encadreur Mm HOCINE Rachida MCA (Université USTO-MB Oran), pour le privilège qu'elle m'a fait en acceptant de diriger ce travail. Sa gentillesse, sa modestie, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, enfin sa riche expérience et l'accueil cordial qu'elle m'a toujours réservé m'ont inspiré une grande admiration à son égard.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Je désire aussi remercier mes professeurs de l'année théorique, qui ont contribué à la réussite de mes études universitaires.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

On se lasse de tout excepté d'apprendre
« Virgile »

RESUME

Notre travail s'est orienté dans le cadre d'une recherche sur les microsystèmes MEMS signifiant: systèmes Micro-Electro-Mécaniques Systèmes. Un microsysteme est avant tout un système de petite taille incluant des capteurs, actionneurs et de l'électronique conçu pour assurer un certain nombre de fonctions, telles que perception de l'environnement (capteur), analyse et traitement des données recueillies, prise de décision, communication avec le monde extérieur, ou faire une action sur l'environnement lui-même. Les microsystèmes MEMS RF sont dédiés pour les applications radiofréquences.

Notre travail est basé sur l'étude et simulation de deux exemples très répondue et utilisables en microsystèmes MEMS RF : Les commutateurs et les filtres passe bandes. Dans une première partie, nous nous sommes intéressés à la modélisation de structures géométriques. C'est une étape importante de la conception (notamment pour le dimensionnement de la structure), car elle permet de prédire le comportement électrique des microstructures aux hautes fréquences. Nous utilisons deux structures carré et circulaire et présentons l'effet de la déflexion en fonction de la variation de l'épaisseur du commutateur lui-même. La détermination du taux de déflexion est en fonction des dimensions de plaques constituant les commutateurs et joue un rôle important dans la spécification des valeurs des capacités entre les poutres (C_{min} , C_{max}). Pour le modèle MEMS RF utilisé comme filtre passe-bande, on a remarqué que la variation de la déflexion atteint une valeur maximum et minimum pour une largeur spécifique entre poutres des micro-commutateurs (2 états : On/Off), ainsi ce filtre possède deux fréquences de fonctionnement lorsque les micro-commutateurs sont à état haut ou à état bas limitant ainsi une bande de fréquences. Ainsi, les modes de fonctionnement des MEMS RF sont en fonction du mode de flexion des éléments micro-commutateurs insérés qui les constituent et doivent être décrits précisément sur les plans physiques mécaniques et électroniques.

ABSTRACT

Our work is oriented in the context of research on microsystems MEMS meaning: systems Micro-Electro-Mechanical Systems. A microsystem is primarily a small system including sensors, actuators and electronics designed to provide a number of functions, such as perception of the environment (sensor), analysis and processing of data, decision, communication with the outside world, or to an action on the environment itself. RF MEMS microsystems are dedicated to RF applications. Our work is based on the study and simulation of two examples very useful and answered Microsystems RF MEMS: Switches and bandpass filters. In the first part, we are interested in modeling geometric structures. This is an important step in the design (including the design of the structure), as it allows to predict

the electrical behavior of microstructures at high frequencies. We use both square and circular structures and present the effect of the deflection depending on the variation of the thickness of the switch itself. Determining the rate of deflection is a function of the dimensions of the plates forming capacity reconfigurable switches, and plays an important role in the specification of values of the capacitances between the beams (C_{min} , C_{max}). For use as RF MEMS bandpass filter model, it was noted that the change in deflection select maximum and minimum value for a specific width between beams micro-switches (2 states: On / Off), so this filter has two operating frequency when the micro-switches are high or low state, thus limiting a frequency band. Thus, the modes of operation of RF MEMS are based on the bending mode of the inserted micro-switches that are the elements and must be described precisely on the mechanical and electronic physical plans.

ملخص

توجه عملنا في سياق دراسة أنظمة التصغير MEMS RF التي تحتوي على العناصر الكهربائية والميكانيكية الصغيرة، هذه المكونات يمكن أن تكون متكاملة في الراديو والتواتر العالي. وما يدعى النظام الصغير هو كل عنصر كهروميكانيكي يوجد غالبا في أجهزة الاستشعار، والمحركات، وهي مصممة لتوفير عدد من الوظائف مثل مفهوم البيئة (الالتقاط) وتحليل ومعالجة البيانات، والمقرر والتواصل مع العالم الخارجي، أو التأثير على النموذج نفسه.

وتكرس عملنا لدراسة القاطعات اللاسلكية MEMS لأن تهيئة الهياكل الهندسية خطوة هامة قبل التصميم لأنه يسمح لأنظمة التصغير للتعويض بالسلوك الكهربائي وقد استخدمنا كمثال هيكليين مربع ودائري ولاحظنا أثر انحراف أقطاب القاطعة باختلاف سمك التبديل نفسه. لاحظنا أن التغيير في السعة يتغير أسرع حسب أدنى وأعلى الترددات، مما يحد من نطاق التبديل التواتري، هذا يحدد أبعاد وقدرة التغيير اعتمادا على وتيرة وعامل الجودة بتحديد القيم الأدنى والأقصى لترددات التشغيل.

ثم قمنا بدراسة نموذج قاطعات RF بمثابة ممر للموجات كمرشح، وقد سمحت لنا هذه الدراسة والمحاكاة ليس فقط بفهم تأثير التشويش على حسن سير التشغيل ولكن أيضا للتعويض واختيار القاطعات RF بتحديد عامل الجودة، ونطاق الترددات وصدى التجاوب لكل وحدة مكثفة مندمجة.

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 : L'accéléromètre AD-XL50 (3mm²) produit par Analog Devices
- Figure I.2 : Évolution des applications des microsystèmes
- Figure I.3 : Schéma du premier microsystème : un transistor MOS à grille résonante
- Figure I.4 : MEMS et son environnement
- Figure I.5 : Domaines de la physique impliqués dans La conception des microsystèmes
- Figure I.6 : vue tridimensionnelle d'un exemple de microsystèmes
- Figure I.7: classification des microsystèmes
- Figure I.8 : Principales étapes du procédé lithographique
- Figure I.9 : Principe de la gravure par plasma
- Figure I.10 : Micro-usinage de surface
- Figure I.11 : Exemple de Schéma en coupe d'une technologie MEMS intégrés
- Figure I.12: Exemple de Schéma en coupe d'une technologie CMOS compatible
- Figure I.13 : Exemple de structure micro usinée par gravure de volume
- Figure I.14 : Exemple de Schéma en coupe de la technologie SOI
- Figure I.15 : Technologie LIGA
- Figure I.16 : Exemple de commutateur à contact latéral
- Figure I.17 : Commutateur série à contact capacitif
- Figure I.18 : Commutateur série à contact ohmique
- Figure I.19 : Capteur d'humidité
- Figure 1.20: Micro-actionneur thermo-mécanique (Thermomechanical In-plane Microactuator or TIM).
- Figure I.21: Architecture générale d'un microsystème
- Figure I.22: Schéma d'une structure MEMS à membrane circulaire
- Figure I.23: Structure MEMS à doigts en peignes
- Figure I.24 : Présentation de puces ADN en Micro laboratoires
- Figure I.25 : Micro pinces en microchirurgie
- Figure I.26 : Illustration de miroir à membrane segmentée
- Figure I.27 : Exemple de membranes (a) continue déformable, (b) MOEMS diffractif
- Figure I.28 : Exemple de capacité digitale 4 bits (16 combinaisons).
- Figure I.29 : Imprimante à jet d'encre
- Figure I.30 : Application automobile
- Figure I.31 : Insertion de la technologie MEMS dans une chaîne d'Emission / Réception
- Figure I.32 : Distributeur d'insuline
- Figure I.33 : Les puces ADN
- Figure I.34 : Fonction de commutation optique réalisée par un miroir mobile de type MEMS.
- Figure I.35 : Satellite autonome sur orbite
- Figure II. 1 : Membrane pont (Raytheon)
- Figure II. 2 : Membrane cantilever (Motorola)
- Figure II.3 : Bilan des forces appliquées à un cantilever

Figure II.4 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un actionneur électrostatique

Figure II.5 : Micro-relais à actionnement électrostatique hors plan

Figure II.6 : Micro-relais à actionnement électrostatique et déplacement dans le plan

Figure II .7 : Mise en œuvre d'une commande magnétique

Figure II .8 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur magnétostrictif de type bilame

Figure II.9 : Commutateur à commande magnétique

Figure II.11 : Micro-relais à actionnement piézoélectrique et déplacement hors plan

Figure II.12 : Schéma de principe (vue transversale) d'un bilame thermique

Figure II .13: Schéma de fonctionnement de différents actionneurs thermiques dans le plan

Figure. II.14 : Micro-relais à actionnement électrothermique et déplacement hors plan

Figure. II.15: Micro-relais à actionnement électrothermique et déplacement dans le plan

Figure II.19 : Quelques configurations possibles de micro-commutateur MEMS RF suivant le type de contact et la zone de contact recherché

Figure II.20 : Représentation schématique d'un contact ohmique(a)état inactif(b) état actif

Figure II.21 : Micro-commutateur de Rockwell (a) structure, (b) photographie
(c) micro-commutateur de TERAVIDA

Figure II.22 Représentation schématique d'un contact capacitif (a) état actif (b) état inactif

Figure II.23 : Schémas électriques équivalents de dispositifs série

Figure II.24 : Schéma et photographie d'un commutateur série MEMS RF à contact capacitif

Figure II.25 Commutateur MEMS RF de type parallèle (a)Schémas équivalents de dispositif
(b) Exemple de structure

Figure II.26 : Topologies de filtres accordables en 2 pôles: (a)à élément localisé ;
(b) à résonateur

Figure II.27 : Schéma du filtre accordable MEMS

Figure II.28 : Filtre LC passe-bande

Figure II.29 : Photographies des filtres accordables avec inductances fixes

Figure III.1 : Modélisation du principe de fonctionnement électromécanique d'un MEMS-RF à actionnement électrostatique.

Figure III.2 : La géométrie du commutateur MEMS

Figure III.3 : Présence de force de contact

Figure III.4 : Relation entre la tension appliquée et la distance entre les électrodes

Figure III.5: Commutateur de type série (a) schéma de principe (b) circuit équivalent

Figure III.6 : Commutateur de type parallèle (a) schéma de principe(b) circuit équivalent

Figure III.7 : Plaques de contact à géométries carré

Figure III.8 : Plaques de contact à géométries circulaire

Figure.III.9 : Structure schématique d'un micro-commutateur poutre.

Figure III.10 : Simulations de la variation de la déflexion de la plaque pour deux épaisseurs:
(a) Plaque de contact carrée (b) Plaque de contact circulaire

Figure III.11 : Variation de la force électrostatique en fonction de la tension de commande

Figure III.12: Variation de la force électrostatique en fonction du déplacement en déflexion de la micro-poutre (g)

Figure III.13 : Modèle schématique d'une capacité variable MEMS à électrodes parallèles, basé sur un actionnement électrostatique: (a) Vue en coupe (b) Vue 3D

Figure III.14: Circuits équivalents : série et parallèle

Figure III.15 : Module de l'impédance de la capacité en fonction de la fréquence

Figure III.16 : Image prise au microscope optique du VCO basé sur les composants MEMS

Figure III.17: (a) Image au microscope optique des poutres, (b) Leur vue en coupe

Figure III.18 : Exemple de déphaseur 'Ka-band'

Figure III.19 : Réalisation de la capacité série

Figure III.20 : Schématique d'un commutateur capacitif série avec électrodes déportées et résistances intégrées

Figure III.21: Moitié d'une structure MEMS RF avec ses éléments électriques

Figure III.22: Présentation d'exemple d'application des MEMS RF
 (a) Vue de dessus de la capacité MEMS
 (b) Voix du signal entre poutres entrecroisées parallèles

Figure III.23: Modèle schématique de l'application du MEMS RF

Figure III.24: Vues technologiques durant le micro-usinage des poutres intercalées en présence du ballonnements métallique et changement de l'épaisseur de polymère

Figure III.25: Modèle en coupe transversale de poutres intercalées à deux états
 (a) Vue de dessus d'une poutre intercalée
 (b) Coupe de poutres avec ballonnement du métal et du polymère
 (c) Modèle de position de poutres pour le cas de capacité minimale
 (d) Modèle de position de poutres pour le cas de capacité maximale

Figure III.26: Présentations des inductances et résistances d'insertion créés au niveau des poutres intercalées pour : (a) Positions prise pour avoir une capacitance maximale
 (b) Positions prise pour avoir une capacitance minimale

Figure III.27: Variation de la déflexion en fonction de l'épaisseur que peut prendre la position de la poutre

Figure III.28: Simulation de la déflexion en fonction de la hauteur de la poutre pour deux épaisseurs de plaque : 100 μm et 200 μm

Figure III.29: Variation de la capacitance en fonction de la fréquence
 (Spécification seulement pour les cas de fréquences minimale et maximale)

Figure III.30 : Variation du facteur de qualité en fonction de la fréquence
 (Spécification seulement pour les cas de fréquences minimale et maximale)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Tableau comparatif des performances entre des commutateurs MEMS à actionnement électrostatique et des composants semi-conducteurs.

Tableau. II.1 : Tableau comparant les différentes caractéristiques des modes d'actionnement.

Tableau III.1 : Les caractéristiques du modèle commutateur.

Nomenclature

MEMS	: Micro electro-mechanical Systems
NEMS	: Nano Electro Mechanical Systems
MOEMS	: Micro-Opto- Electro-Mechanical Systems
Bio-MEMS	: Microsystèmes en application
RF-MEMS	: Radio-Frequency Micro Electro-Mechanical Systems
MMIC	: Monolithic Microwave Integrated Circuit
FBAR	: Film Bulk Acoustic Resonators
GPS	: Global Positioning System
PIN	: Semi-conducteur à dopage P, Intrinsèque et dopage N
FET	: Field Electronic Transistor
MOS	: Metal Oxyde Semiconducteur
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
SiC	: Carbure de silicium
SiO ₂	: Oxyde de silicium
SoC	: System-on-Chip
MMIC	: Monolithic Microwave Integrated Circuit
SiP	: System-in-Package
SOI	: Silicon On Insulator
LIGA	: Méthode technologique
PZT	: Titanate Zirconate de Plomb)
TaSi	: Siliciure de Tantale
FBAR	: Film Bulk Acoustic Resonators
FSR	: Frequency de self resonance
SiBAR	: Silicon Bulk Acoustic Resonator

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I GENERALITES SUR LES MICROSYSTEMES	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les Microsystèmes	3
I.2.1 Notion de microsysteme	3
I.2.2 Historique des Microsystèmes	4
I.2.3 La Miniaturisation des Microsystèmes :.....	5
I.2.4. Les Micros Electro Mécanique Systèmes (MEMS)	7
I.3 Caractéristiques des microsystèmes électromécaniques	8
I.4 Classification des systèmes électromécaniques.....	10
I.5. Fabrication des Micro systèmes.....	11
I.5.1 Matériaux utilisés en microsystèmes compatibles avec les circuits intégrés:	11
I.5.2. Les principaux procédés de fabrications des MEMS.....	11
I.5.2.1. Dépôt de couches minces.....	11
I.5.2.2 La photolithographie	11
I.5.2.3. Techniques de Gravure.....	12
I.5.3. Les processus de fabrication spécifiques aux MEMS	13
I.5.3.1. Le Micro usinage en surface.....	13
I.5.3.2. Micro usinage en volume	14
I.5.4 D'autres procédés :.....	15
I.5.4.1. La technologie SOI :	15
I.5.4.2. La technologie LIGA.....	16
I.6. Différents composants MEMS.....	17
I.6.1. Les Micro- commutateurs MEMS.....	17
I.6.2 Les Micro-capteurs MEMS.....	18
I.6.3 Les Micro-actionneur MEMS	19
I.7. Conception des MEMS	20
I.8. Architecture MEMS.....	20

Table des matières

a. Structure à débattement vertical	21
b. Structure à doigts en peigne	22
I.9. Classification des microsystèmes électromécaniques	22
I.9.1. les Microsystèmes comme Micro-capteurs ou Micro-actionneurs.....	23
I.9.2. Les BIOMEMS	23
I.9.3. Les MOEMS.....	24
I.9.4. Les MEMS-RF	25
I.10. Les domaines d'applications des Microsystèmes.....	27
I.10.1. L'électronique domestique et les dispositifs informatiques	28
I.10.2. insertion des MEMS en industrie automobile.....	28
I.10.3. Application MEMS Télécommunications	29
I.10.4. L'industrie chimique en Biologie et les équipements liés à la santé.....	30
I.10.5 Application MEMS en Optique	31
I.10.6 Application MEMS au domaine aérospatial	32
I.11. Conclusion	33
CHAPITRE II LES MICRO COMMUTATEURS MEMS ET MODEDES D'ACTIONNEMENT	
II.1 Introduction.....	34
II.2. Mouvement dans les MEMS : la physique des actionneurs.....	34
II.2.1. Forces mises en jeu durant l'actionnement	34
II.2.2. Types d'actionnements	36
II.2.2.1. Actionnement Electrostatique	36
Principe.....	36
a. Exemples de composants	37
• Déplacement hors plan	37
• Déplacement dans le plan	38
II.2.2.2. Actionnement Magnétique	39
a-Principe.....	39
b- Exemples de composants	41
II.2.2.3. Activation Piézoélectrique.....	42
a- Principe.....	42
b- Exemples de composants	42
II.2.2.4. Actionnement Thermique	43

Table des matières

a- Principe.....	43
b- Exemples de composants.....	44
• Déplacement hors plan.....	45
• Déplacement Latéral.....	45
II.2.3. Comparaison entre les différents modes d'actionnement.....	46
II.3. Exemples Modèle de microsystemes MEMS RF.....	47
II.3.1 Introduction.....	47
II.3.2. Les Micro commutateurs MEMS RF.....	48
II.3.2.1. Définition et principes de fonctionnement d'un commutateur.....	48
II.3.2.2. Les type de contact des micro-commutateurs MEMS RF.....	50
II.3.3.2.1. Micro-commutateurs à contact ohmique.....	51
II.3.3.2.2. Les Micro-commutateurs à contact capacitif.....	52
II.3.2.3. Les type de configurations de micro-commutateursMEMS RF.....	53
II.3.2.3.1. Configuration série.....	53
II.3.2.3.2. Configuration parallèle.....	54
II.3.3. Micros systèmes MEMS RF comme Filtre.....	55
II.3.3.1 Intérêt des filtres.....	55
II.3.3.2 Exemple de structure accordable.....	56
II.4. Conclusion.....	58
CHAPITRE III ETUDE ET MODELISATION DE MICROSYSTEMES A BASE MEMS RF	
III.1. Introduction.....	59
III.2. les differents Microsystèmes MEMS RF.....	59
III.3. les Propriétés mécaniques et électriques d'un composant MEMS RF.....	60
III.3.1. Propriétés mécaniques.....	60
a. les résonateurs micromécaniques.....	60
b. les Inductances micro-usinées.....	60
c. les dispositifs Fbar.....	60
d. les Micros-commutateurs.....	60
e. les Capacités variables.....	60
III.3. Modélisation électromécaniques d'un MEMS RF.....	60
III.3.1. Introduction.....	60
III.3.2. Modèle du mouvement de la poutre d'un Micro-commutateur.....	61

Table des matières

III.3.3. Topologies des différentes formes de commutateur MEMS RF	65
III.3.4. Simulation MATLAB	67
III.3.4.1 Modèles proposés	67
III.4. Les Micro systèmes MEMS RF comme Filtre passe-bande	73
III.4.1.paramètres importants des capacités variables MEMS	73
III.4.1.1.capacité nominale.....	74
III.4.1.2. Tuning range.....	74
III.4.1.3 . Facteur de qualité.....	75
III.4.1.4 . Fréquence de Self Résonance électrique FSR.....	76
III.4.1.5. La linéarité	77
III.4.2. Aplications des capacités variables aux MEMS RF.....	77
III.4.2.1.VCO : Voltage Controlled Ocsillator	77
III.4.2.3. Filtre accordables	78
III.4.2.3. Le déphaseur	78
III.4.2.4. composants à capacité variable MEMS.....	79
III.4.3. Modèle du MEMS RF comme Filtre passe-bande.....	81
III.4.3.1.présentation du modèle.....	81
III.4.3.2. Simulation du Modèle.....	86
III.5. Conclusion.....	90
CONCLUSION GENERALE.....	92
BIBLIOGRAPHIE.....	95

INTRODUCTION GENERALE

Les microsystèmes constituent un monde fascinant d'objets miniatures qui envahissent depuis une dizaine d'années notre quotidien. Cependant, l'idée à la base de ces systèmes n'est pas récente. En 1959, dans son discours devant l'American Physical Society à Caltech, le physicien Richard Feynman évoqua la possibilité de manipuler la matière à échelle microscopique et posa les bases de la course à la miniaturisation. Alors que le développement des premiers microsystèmes remonte à la fin des années 60 (les transistors MOS à grille résonnante ou les micro-capteurs de pression), leur commercialisation ne commence qu'aux années 80 avec les micro-accéléromètres émergeant dans le milieu industriel de l'automobile. Dès lors, leur champ d'application s'est étendu à de nombreux domaines tels que l'aérospatial, le biomédical, les télécommunications, l'optique, etc.

On désigne par microsystème un composant combinant une structure physique de taille microscopique avec une partie électronique qui peut être intégrée sur le même support physique. On appelle MEMS (Système Micro-Electro-Mécanique) tout microsystème dont l'élément physique comporte des parties mécaniques mobiles. Fabriqués par des techniques de micro-usinage du silicium issues de celles de la micro-électronique mais différentes du fait de la réalisation de parties mobiles détachées du substrat, les MEMS réalisent des fonctions de capteurs (de pression, de masse, d'accélération, etc.), d'actionneurs (micro-miroirs, micro-pompes, micromanipulateurs, etc.) ou encore de traitement du signal (filtres électromécaniques, composants radiofréquence, etc.). Depuis quelques années seulement, les systèmes micro-électromécaniques commencent à franchir le seuil de la miniaturisation en passant aux dimensions nanométriques. On parle de systèmes nano-électromécanique (NEMS) qui promettent de révolutionner les nouvelles applications technologiques grâce à l'accroissement de leur sensibilité et de leur résolution.

L'augmentation très forte du nombre d'utilisateurs des différents réseaux de communication, téléphonie cellulaire, internet haut-débit, systèmes sans fil, a provoqué une profonde modification des circuits et composants de télécommunication utilisés. La nécessité de produire à faibles coûts des objets transportables à faible consommation pour le grand public a poussé à la miniaturisation et la production de volumes importants. Le développement de composants RF MEMS (Radio Frequency Micro Electro Mechanical System) s'inscrit naturellement dans cette démarche. La possibilité de réaliser des composants faibles pertes, aux dimensions de quelques centaines de micromètres et dont la méthode de fabrication est fortement compatible aux composants actifs existants permet d'envisager la conception des circuits « tout intégrés » réalisant des fonctions complexes. De nombreux composants utilisant cette dernière technologie ont donc vu le jour, commutateurs, capacités variables, filtres et résonateurs accordables, déphaseurs... et ont démontré leur fort potentiel à remplacer des circuits déjà existants ou pour la réalisation de nouvelles fonctions.

Ces divers développements technologiques tournent autour de trois axes :

INTRODUCTION GENERALE

- Le premier concerne l'existant : A partir des composants MEMS actuels, peut-on répondre aux attentes d'applications intelligentes faibles coûts, faibles consommations et à grand volume ?
- Le second concerne les matériaux. Afin d'augmenter la capacité des plates-formes en charge de la fabrication des microsystèmes, quels nouveaux matériaux doivent être développés ?
- Le dernier concerne les problématiques de l'intégration. En vue d'applications faibles coûts, faibles consommations et à grand volume, faut-il de nouvelles méthodes d'intégration ?

Ce Mémoire va se présenter en trois chapitres. En premier on présentera des généralités sur la technologie MEMS ainsi que les méthodes de fabrication des microsystèmes compatible avec les procédés standards de la microélectronique en focalisant principalement sur les technologies intégrées permettant d'obtenir des microsystèmes monolithiques. On citera ensuite les différentes applications technologies actuelles utilisées ainsi on décrira les trois catégories générales : les micro-capteurs, les micro-actionneurs et les micro-commutateurs.

Parmi les différents composants MEMS, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux microsystèmes MEMS RF qui connaissent actuellement un essor important en applications. Le fonctionnement et notamment le mouvement des MEMS repose sur des phénomènes physiques qu'il faut connaître et maîtriser, pour cela nous allons présenter en Chapitre 2 leurs principes d'actionnement, ainsi que quelques aspects de configurations qui peuvent être utilisés.

Le Chapitre 3 est dédié à l'étude et simulation de deux exemples très répandus et utilisables en microsystèmes MEMS RF : Les commutateurs et les filtres passe bandes. Cette étude et simulation présentera la nature et les modes de fonctionnement physique et électrique d'un commutateur model et d'estimer l'ordre des grandeurs des fréquences attendues et les limites de la passe bande du filtre.

Enfin, une conclusion générale accompagnée d'une perspective terminera ce manuscrit.

Chapitre 1

Généralités sur les Microsystèmes (MEMS)

I.1 Introduction

La technologie “MEMS”, abréviation anglaise de “Micro Electro Mechanical Systems” (systèmes micro-électro-mécaniques), est un sujet de recherche qui a suscité un vif intérêt dans plusieurs laboratoires à travers le monde. En particulier, les MEMS pour les applications RF sont issus de l'évolution des composants électroniques MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) et d'une nécessité croissante de miniaturisation et d'amélioration des performances des systèmes électroniques. En effet, depuis les années 70, les microsystèmes ont été développés pour diverses applications, telles que la métrologie sous forme de capteurs (accéléromètres, capteurs de pression,...) [1]. Au début des années 90, c'est sous l'impulsion des laboratoires de recherche de l'armée américaine que sont apparus les premiers MEMS pour des applications micro ondes. Les très bonnes caractéristiques de ces structures jusqu'à 50 GHz supplantent de loin celles des dispositifs à base de semi-conducteurs et ont suscité l'intérêt d'un grand nombre de compagnies et laboratoires. Aujourd'hui, les propriétés électriques et mécaniques des composants micro électromécaniques sont connues et malgré leur immaturité en terme de packaging et fiabilité, leur potentiel pour de nombreuses applications télécoms et militaires ou autre, rend l'étude et le développement de ces dispositifs très importants [2].

I.2 Les Microsystèmes

I.2.1 Notion de microsysteme

Un microsysteme est avant tout un systeme de petite taille incluant des capteurs, actionneurs et de l'électronique conçu pour assurer un certain nombre de fonctions, telles que perception de l'environnement (capteur), analyse et traitement des données recueillies, prise de décision, communication avec le monde extérieur, ou action sur l'environnement. Le champ des microsystèmes hybrides couvre l'ensemble des microsystèmes obtenus par assemblage de composants, de circuits et de micro dispositifs divers.

En effet la fabrication d'un micro systeme repose sur les notions fondamentales d'intégration spatiale, de fabrication et d'assemblages collectifs des différents éléments du produit final. Les technologies de fabrication sont plus ou moins toutes dérivées de celles mises au point pour la réalisation de circuits de le micro-électronique. Ainsi, un exemple incontournable est l'accéléromètre AD-XL50 produit par Analog Devices [3]. Ce dernier équipe aujourd'hui la majorité des systèmes d'Airbag de nos voitures. Il est constitué d'un capteur micro-usiné, disposé au milieu de la puce, directement intégré au sein l'électronique embarqué, permettant ainsi de traiter et de convertir en signaux électriques l'accélération détectée (Figure I.1).

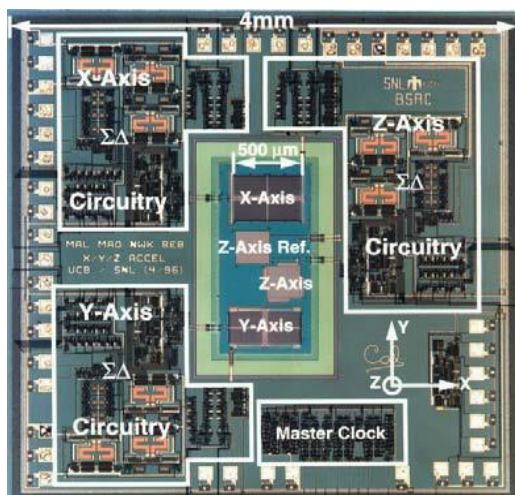


Figure I.1 Exemple d'accéléromètre AD-XL50 (3mm²) [3]

I.2.2 Historique des Microsystèmes

Le domaine de recherche en microsystèmes est relativement récent et combine l'utilisation des techniques électroniques, informatiques, chimiques, mécaniques, optiques. Ils sont le plus souvent à base de silicium, mais on utilise également d'autres matériaux suivant l'adéquation de leurs propriétés physiques à certaines applications, comme les métaux, les matériaux piézoélectriques, divers polymères, etc. Face au développement de ce domaine, nous énumérons les dates marquantes de l'histoire des microsystèmes.

- ✚ Le Docteur Charles S. Smith découvre l'effet piézoélectrique en 1954. Conception de microsystèmes autonomes
- ✚ En 1958, des jauges de contraintes discrètes sont développées et commercialisées par Kulite Semiconductors Products, Honeywell and Microsystems.
- ✚ Fin 1960, des diaphragmes de silicium sont développés pour concevoir des capteurs de pression avec une grande sensibilité.
- ✚ Années 1970 : les micromachines se démocratisent, permettant ainsi le développement d'accéléromètres, de têtes d'imprimantes à jet d'encre, etc.
- ✚ Années 80-90 : développement de quelques micro-capteurs intégrant la mesure et l'électronique de traitement du signal [4].
- ✚ Fin des années 80 : réalisation d'un micromoteur rotatif sur puce de silicium. Ce dispositif a montré la possibilité d'intégrer des actionneurs avec les procédés de la microélectronique.
- ✚ Années 90 : émergence des premiers microsystèmes dans l'industrie, sur des marchés tels que l'automobile ou l'informatique [5].
- ✚ Années 2000 : démocratisation des dispositifs et applications de microsystèmes intégrant des fonctions multiples : mécaniques, fluidiques, optiques et biochimiques (Figure I. 2) [3].

Les microsystèmes sont de plus en plus multidisciplinaires. Ils sont parfois appelés MOEMS, Bio-MEMS ou RF-MEMS selon leurs fonctions principales (optiques, biologiques, chimiques ou Radio-Fréquence).

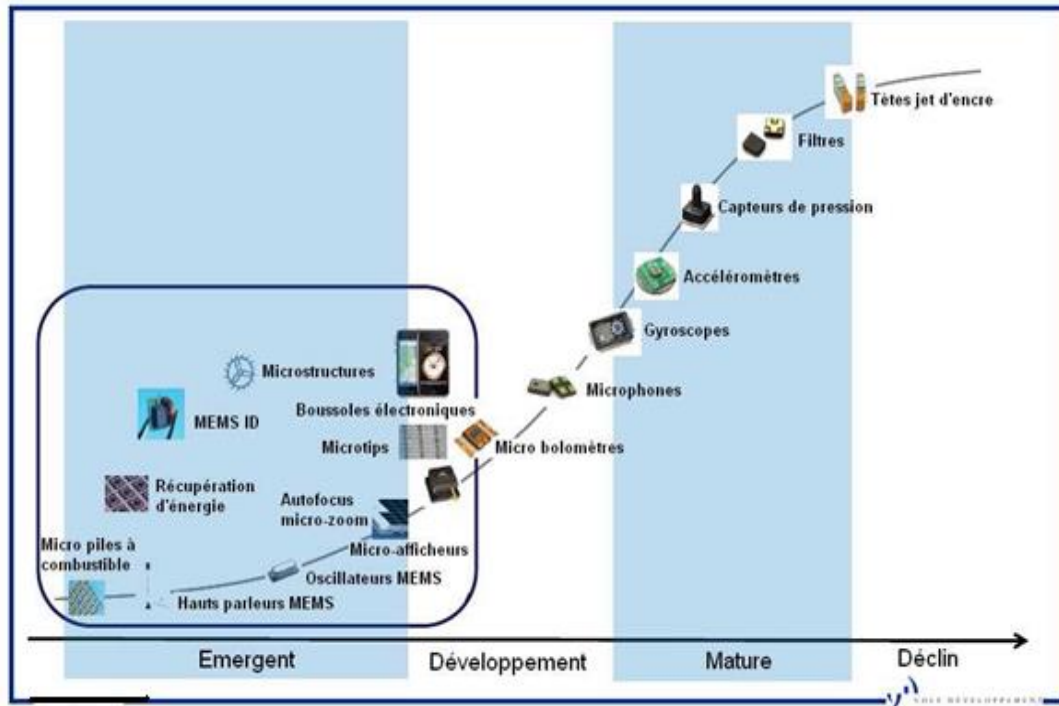


Figure I.2 : Évolution des applications des microsystèmes [3]

I .2.3 La Miniaturisation des Microsystèmes :

La miniaturisation des circuits électroniques, des capteurs et des microsystèmes permet de développer des systèmes électroniques communicants de mesure peu intrusifs et d'envisager des multitudes d'applications nouvelles (santé, traçabilité, sécurité...). La perspective de voir se développer une "ambiance intelligente" sur des objectifs de mesures et de communications réparties implique d'importantes innovations dans la conception et l'intégration technologique de micro systèmes compactes et crédibles [6]. Pour le développement de technologies d'intégration de dispositifs élémentaires en nouvelles applications industrielles, des efforts technologiques sont à trois niveaux :

- Sur les composants dont on doit parfaitement maîtriser leur comportements aux très basses et hautes énergies,
- Sur les architectures de microsystèmes intégrés,
- Sur l'intégration de technologies très hétérogènes.

Parallèlement, la miniaturisation de composants et de systèmes mécaniques et électroniques est restée fondée sur des méthodes de fabrication traditionnelles. L'idée de concevoir et de fabriquer des fonctions mécaniques en utilisant les technologies de la microélectronique n'est pas nouvelle. En effet, dès 1967, les laboratoires américains Bell ont proposé la structure d'un transistor M.O.S. à résonateur mécanique (Figure I.3) qui est le premier microcomposant électromécanique connu. Cependant, un effort technologique important a été nécessaire pour intégrer des pièces en mouvement, donc des structures tridimensionnelles, dans les procédés de fabrication de la microélectronique [5].

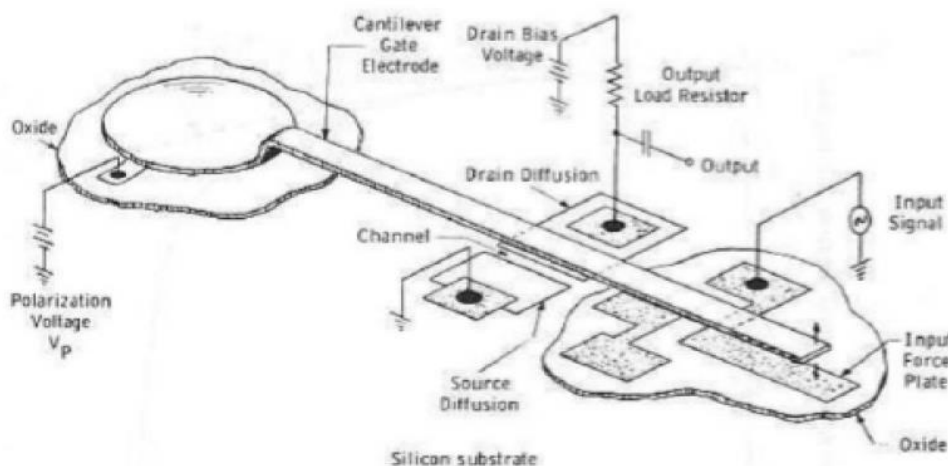


Figure I.3 : Schéma du premier microsystème : un transistor MOS à grille résonante (1967) [5].

Les exemples pratiques les plus frappants dans le domaine de la miniaturisation, sont les micromachines jouant un rôle prépondérant dans le domaine du traitement des fluides, comme les microcanaux, les micropompes, les microvalves, Cependant, la miniaturisation a des avantages prépondérants telles que [6] :

- Réduction de la taille et du poids des dispositifs
- Réduction de la consommation énergétique
- Amélioration des performances (vitesse, sensibilité...)
- Production collective de composants individuels
- Réduction des coûts
- Prédominance de certains phénomènes physiques
- Spécification des fréquences de fonctionnement et largeur de bande
- Grande fiabilité mécanique
- Fabrication collective
- Motivations scientifiques: explorer des 'objets' ou systèmes de plus en plus petits

1.2.4. Les Micros Electro Mécanique Systèmes (MEMS)

Un microsystème électromécanique est un microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur. Le terme microsystèmes électromécaniques est la version française de l'acronyme anglais MEMS (Micro Electro Mechanical Systems).

Um MEMS peut être défini comme un objet de petite dimension intégrant une partie électrique (et/ou électronique) et une partie mécanique qui sont en relation fonctionnelle. La partie mécanique est en liaison avec les données issues du monde physique (Figure I.4). Elle assure la fonction de capteur, récupérateur d'énergie ou d'actionneur via des mouvements ou des déformations. La partie électrique, ou électronique, se charge de la commande ou du traitement de signal. Elle peut être connectée vers d'autres systèmes externes qui peuvent être un circuit électronique, un bus de donnée relié à un système de traitement d'information complexe ou d'autres MEMS [7].

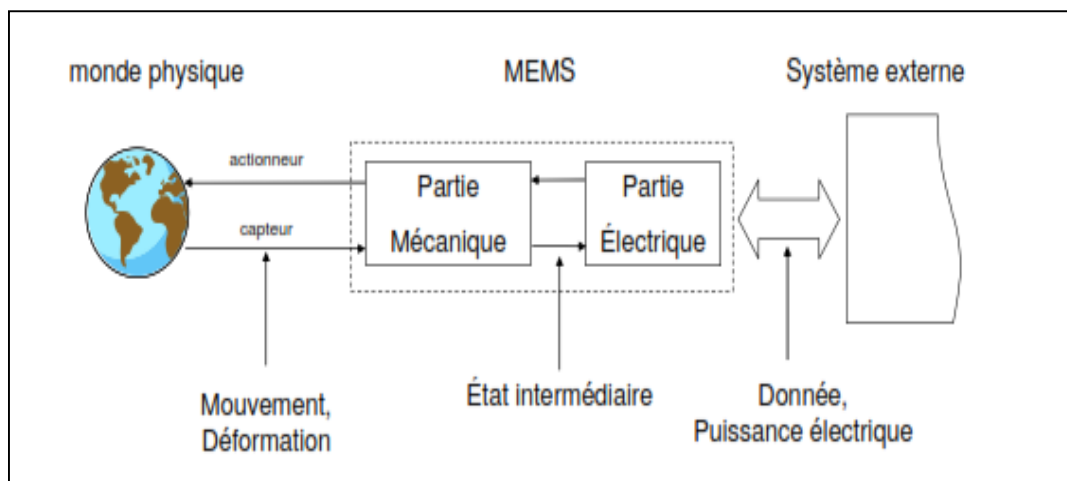


Figure I.4 MEMS et son environnement

La définition d'un MEMS n'est aujourd'hui plus liée à l'unique présence d'une partie électrique et mécanique. Sa définition la plus proche pourrait correspondre à un dispositif miniaturisé qui n'est pas purement électronique (pour faire contraste au circuit intégré, microcontrôleur et microprocesseur). En effet, il y a des MEMS qui ne contiennent pas de partie mécanique en mouvement (ex : capteur de champ magnétique du type « fluxgate »), et il y a ceux qui ne contiennent même pas de partie électrique (système d'engrenage de micromachine), ou même ni l'un ni l'autre (micro mélangeur fluide, optique intégrée...)

Dans le cas d'un micro actionneur, le courant circulant dans la partie électrique est converti en mouvement. Pour les micro-générateurs électriques et les micros capteurs, les mouvements ou vibrations de la partie mécanique peuvent fournir des courants électriques.

Entre la partie électrique et la partie mécanique, transite un état intermédiaire, qui qualifie aussi l'affiliation du MEMS. Cet état intermédiaire pourrait être : [8]

- Du champ électrique pour les familles électrostatiques et piézoélectriques.
- Du champ magnétique pour les familles magnétiques et magnétostrictifs.
- De l'énergie calorifique pour les familles thermiques.
- La combinaison des trois dans le cas des systèmes hybrides.

I.3 Caractéristiques des systèmes électromécaniques

La caractérisation des microsystèmes s'effectue suivant plusieurs critères tels que [9] :

- Matériaux utilisés en microsystèmes

Signalons que les microsystèmes sont réalisables par les techniques classiques de la microélectronique sur silicium (Si) ou bien ses dérivés tels que l'oxyde de silicium (SiO₂), le nitrure de silicium (Si₃N₄)... ou bien d'autres matériaux, tel que l'or, le titane et le cuivre. Comme on peut citer d'autres éléments chimiques qui rentrent dans la fabrication des microsystèmes, exemple les polymères.

- Leur réalisation

Les techniques et les procédés couches minces, usinages chimiques de surface et de volume, électrodéposition, soudure atomique,... distinguent les composants électroniques par leur structure. En effet, en microélectronique, la mise en œuvre de techniques d'usinage, d'assemblage, d'électrodéposition ont pour finalité la fabrication de micro et nanostructures tridimensionnelles qui intègrent éventuellement des composants et des circuits microélectroniques.

- La multiplication des fonctionnalités intégrées

Les microsystèmes MEMS sont formés de composants dont la taille est comprise entre 1 et 100 micromètres, pour former des objets dont les dimensions se situent entre 10 micromètre et 1 millimètre. Cette miniaturisation autorise la multiplication des fonctionnalités intégrées dans ces dispositifs et permet ainsi de répondre à de nouveaux besoins. En dépit de la diversité d'applications, les microsystèmes ont des caractéristiques communes. Ils sont formés d'un microprocesseur qui traite les données et d'une multitude de micro capteurs pour les recueillir.

- La consommation énergétique

La consommation énergétique des microsystèmes diminue et les performances sont améliorées et permettent d'explorer des objets de plus en plus petits.

Initialement, l'idée des concepteurs des microsystèmes était de diminuer les coûts et d'intégrer des capteurs et des circuits sur la même puce.

- les microsystèmes ont évolué avec l'introduction de la micromécanique, via des parties mobiles (ressorts, poutres, etc.) en employant les technologies de la micro électronique. Maintenant, les microsystèmes s'interfacent avec des méthodes et technologies d'autres disciplines comme la micromécanique, la micro-optique, la chimie, la biochimie, l'électromagnétique, etc. (Figure I.5). [6]
- Les microsystèmes ont des formes 3D complexes, composants fragiles, assemblages hybrides, ce qui nécessite des préhenseurs adaptés, une grande dextérité, et des fonctions mécanique, électrique, optique, pneumatique...ils sont des composants plats, composants robustes, et faciles à manipuler (buses à dépression). (Figure I.6) [9]

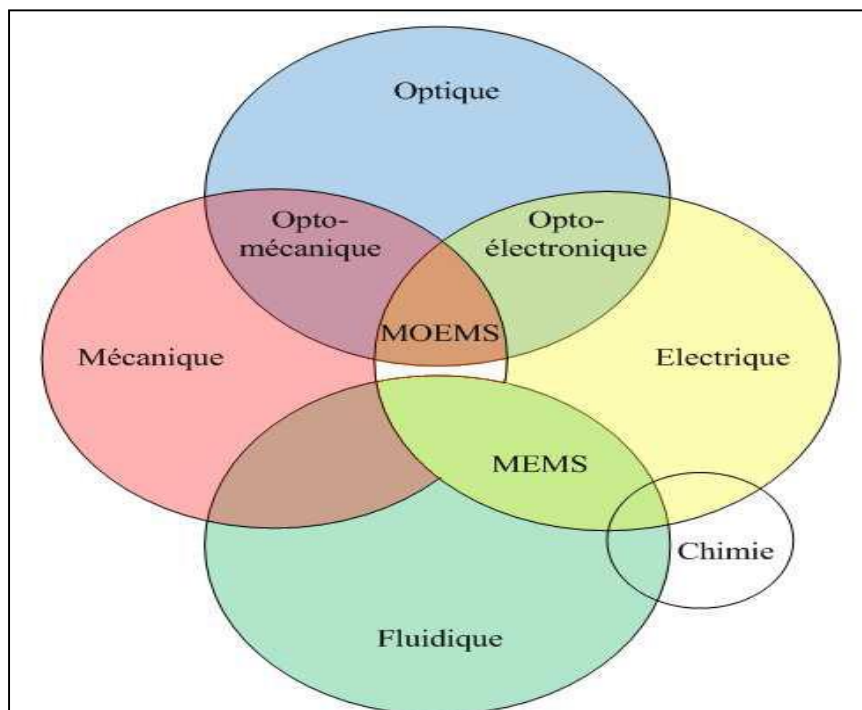


Figure I.5 : Domaines de la physique impliqués dans La conception des microsystèmes

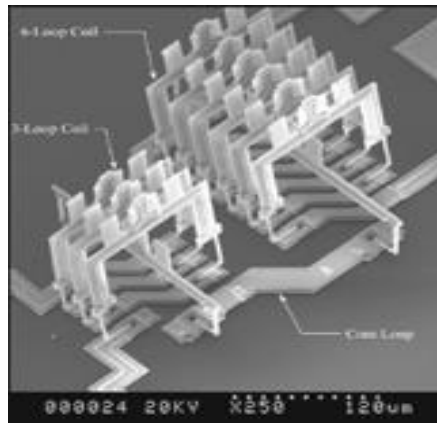


Figure I.6: Vue tridimensionnelle d'un exemple de Microsystèmes

I. 4 Classification des systèmes électromécaniques

Dans les microsystèmes on a toujours safeguardé les théories fondamentales de base mécanique classique, électronique et électromagnétisme comme indique la (figure I.7) [8] ci-dessous :

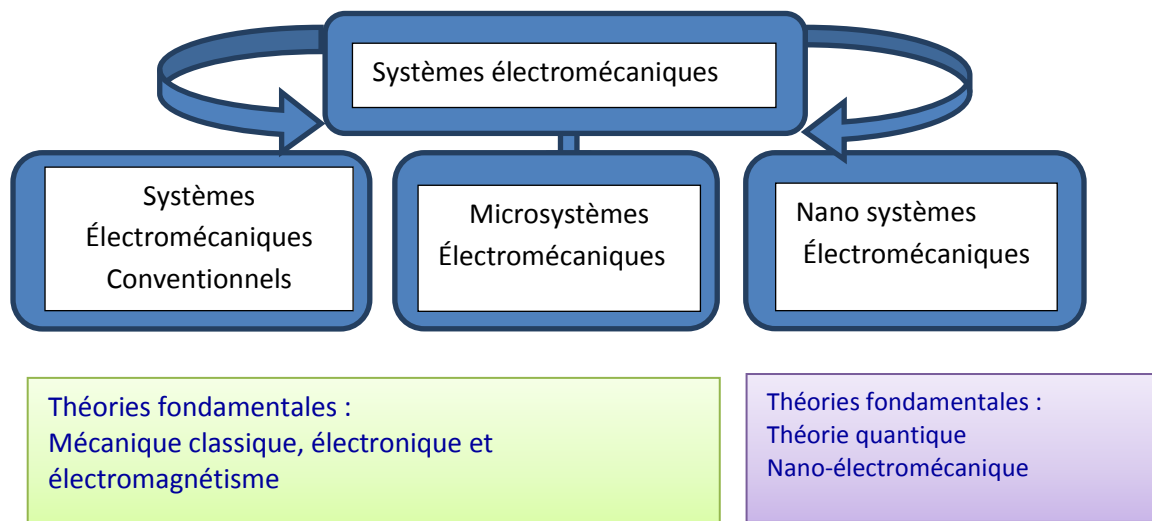


Figure I.7 : Classification des microsystèmes

Les microsystèmes sont classés suivant les paramètres ci-dessous [5] :

- Suivant les types systèmes de traitement de l'information
- Suivant la grandeur physique considérée
- Suivant le principe physique exploité
- Suivant l'application
- Suivant l'énergie du signal considéré
- Suivant la complexité

L'enjeu des systèmes réside dans la réduction des coûts de production et l'accroissement de la fiabilité. En effet, les technologies des semi-conducteurs permettent de réaliser de manière collective un grand nombre de dispositifs identiques et parfaitement reproductibles. Pour les micro-capteurs utilisés sur des marchés de masse, comme l'automobile, cet enjeu est déterminant, ainsi que l'enjeu des microsystèmes et l'accès à des nouvelles applications pour lesquelles une taille microscopique est primordiale ; c'est le cas des dispositifs biomédicaux destinés à intervenir dans le corps humain.

1.5. Fabrication des Micro systèmes

1.5.1 Matériaux utilisés en microsystèmes compatibles avec les circuits intégrés

Le procédé de fabrication des dispositifs microsystèmes est basé sur les techniques de fabrication standard des circuits intégrés. Le matériau de base est le silicium (Si) ainsi que ses dérivés tels que l'oxyde de silicium (SiO_2) le nitrure de silicium (Si_3N_4), le carbure de silicium (SiC) et oxy-nitrures (SiN_xO_y). Ces matériaux sont déposés comme une couche mince d'épaisseur qui varie entre une dizaine d'Angstrom et plusieurs dizaines de micromètres. Divers métaux servent aussi des liaisons électriques ou comme surface d'accroche biochimique tel que l'Aluminium, le Titane, l'Or, le Tungstène ou le cuivre [10].

1.5.2. Les principaux procédés de fabrications des MEMS

On peut classer les étapes de fabrication issues de la microélectronique sur silicium en 3 catégories : les techniques additives (dépôt de couches minces, épitaxie...), les techniques sélectives ou de transfert de motifs telles que la photolithographie et les techniques soustractives de gravure [8].

1.5.2.1. Dépôt de couches minces

Cette technique consiste à déposer des couches de différents matériaux les unes sur les autres depuis un gaz, un plasma, une solution aqueuse ou un état solide. On peut déposer des matériaux, du polysilicium, des oxydes et des nitrures de silicium, des polymères, etc. les épaisseurs de couches obtenues et leurs caractéristiques (électriques, piézoélectriques mécaniques,...) sont très dépendantes des paramètres tels que la température, l'inclinaison du wafer et la topologie suivie pour la fabrication. On adjoint souvent une étape de traitement thermique après la déposition pour obtenir les caractéristiques désirées.

1.5.2.2 La photolithographie

Cette opération consiste à déposer une résine photosensible en film mince et uniforme. Ces résines sont des composés organiques dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV. Même si le développement technique propose de nouvelles techniques capables de réduire la dimension des motifs imprimés, la photolithographie reste la plus employée en

industrie car elle permet des cadences de production élevées. La Figure I.8 présente les étapes de la photolithographie.

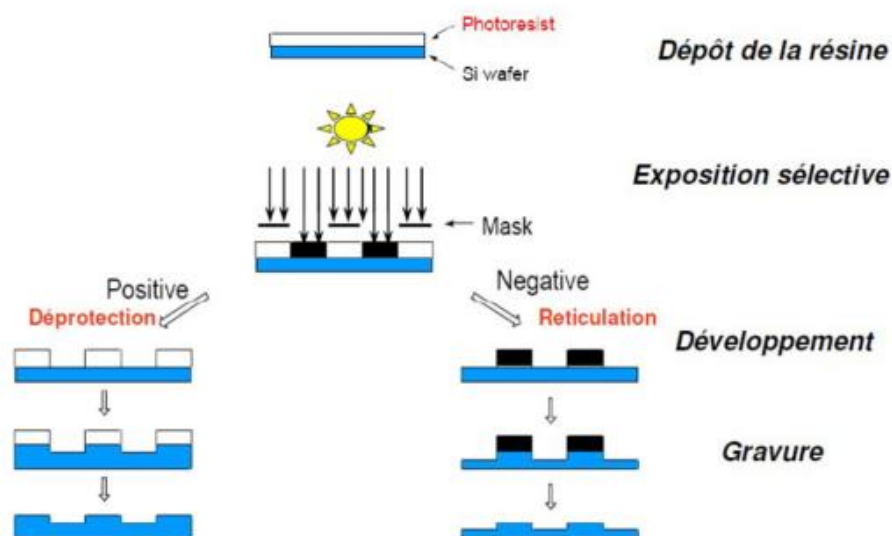


Figure I.8 : Les principales étapes du procédé photolithographie [10].

I.5.2.3. Techniques de Gravure

La gravure est une méthode de transfert soustractive, c'est-à-dire que la structure est formée par un élément de matière du substrat ou d'une couche sous-jacente via les ouvertures d'un masque de résine, cette attaque chimique et/ou physique des parties de la surface non protégées par les masques peut être réalisée en milieu liquide (gravure humide) ou en milieu gazeux (gravure sèche par plasma).

La gravure par attaque chimique est la technique la plus répandue. Elle est obtenue en plongeant un substrat de silicium dans des bains chimiques après la phase de photolithographie.

La gravure humide permet l'usinage de volume du silicium ou la profondeur de gravure n'excède pas quelques microns. La technique la plus répandue est la gravure par plasma schématisée en figure I.9. Le plasma utilisé est un gaz ionisé possédant sensiblement le même nombre de particules chargées positivement et négativement. La gravure est effectuée dans une chambre à vide à l'aide d'un bombardement d'ions qui arrachent des atomes de silicium sur les parties non protégées du wafer, la protection ayant été réalisée au préalable par micro photolithographie. Cette dernière méthode est plus intéressante car elle permet d'augmenter considérablement la densité des ions réactifs et ainsi la vitesse de gravure [10].

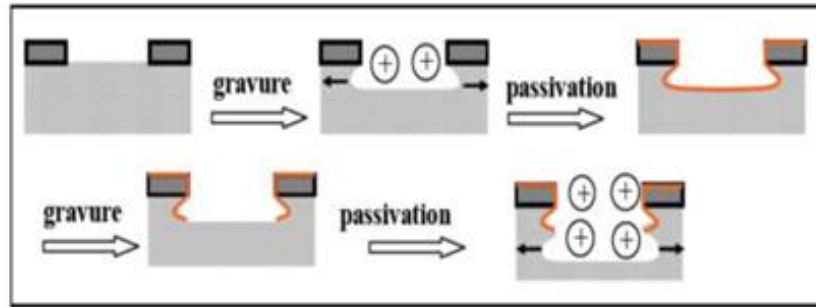


Figure I.9 : Principe de gravure par plasma

I.5.3. Les processus de fabrication spécifiques aux MEMS

I.5.3.1. Le Micro usinage en surface

Cette technique repose sur la gravure sélective de couches sacrificielles et structurales. Chaque couche peut être gravée pour lui donner une forme. Une fois l'empilement terminé, les couches dites sacrificielles sont dissoutes sélectivement vis-à-vis des couches dites structurales qui constituent alors la structure auto assemblée. Originellement employés pour la fabrication de circuits intégrés, les matériaux utilisés sont du poly silicium, des oxydes et nitrures de silicium. En utilisant la sélectivité de gravure entre ces matériaux, une libération de couche peut être réalisée, permettant la fabrication de structures tridimensionnelles auto assemblées. La Figure I.10 montre un schéma en coupe d'une technologie de micro usinage en surface [11].

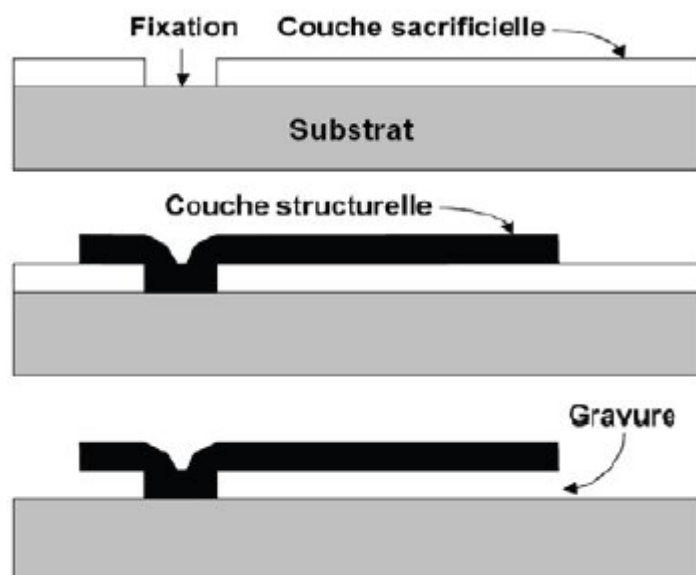


Figure I.10 Micro-usinage de surface [11]

Le micro usinage en surface consiste à graver à l'aide d'une gravure silicium anisotrope des tranchées dans lesquelles seront fabriquées les structures suspendues, les parties électroniques seront réalisées par la suite à côté de ces tranchées pour enfin enlever les couches sacrificielles qui bouchaient les tranchées. Cette technique présente les avantages de protéger les structures en poly silicium avec les oxydes pendant les étapes de fabrication CMOS et de rendre les deux processus relativement indépendant (Figure I.11).

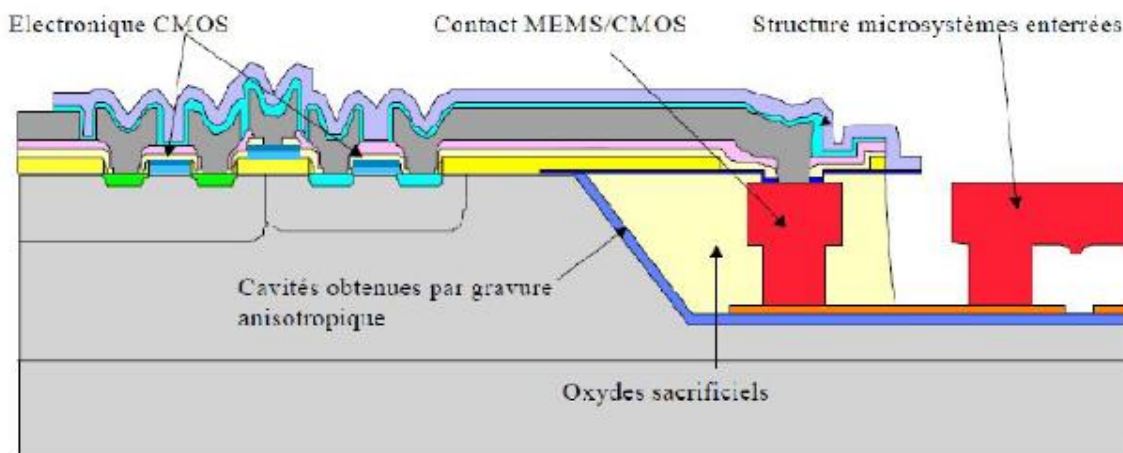


Figure I.11: Exemple de schéma en coupe d'une technologie MEMS intégrés [10]

I.5.3.2. Micro usinage en volume

Cette technique se base sur la gravure chimique anisotrope et sélective du silicium. Différentes solutions peuvent être utilisées pour attaquer sélectivement certains plans cristallins du silicium afin de libérer des structures (masses membranes, poutres, ponts, etc....).

La Figure I.12 illustre le principe de réalisation de ce type de gravure. Une ou plusieurs couches structurales sont déposées et gravées à la surface du silicium puis en fin de procédé de fabrication, une attaque anisotrope du silicium est réalisée pour libérer les structures mécaniques. Les temps de gravure sont longs (quelques heures) et les solutions utilisées sont délicates à manipuler et polluantes. En micro usinage en volume, le terme "volume" vient du fait que la gravure forme une cavité dans le volume du substrat (Figure I.13) [11].

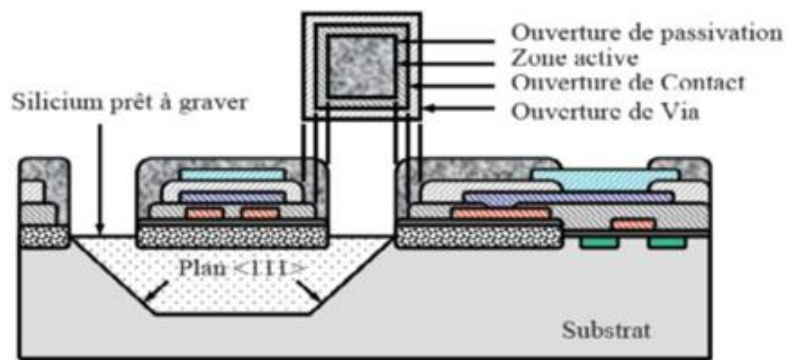


Figure I.12: Exemple de schéma en coupe d'une technologie CMOS compatible [11]

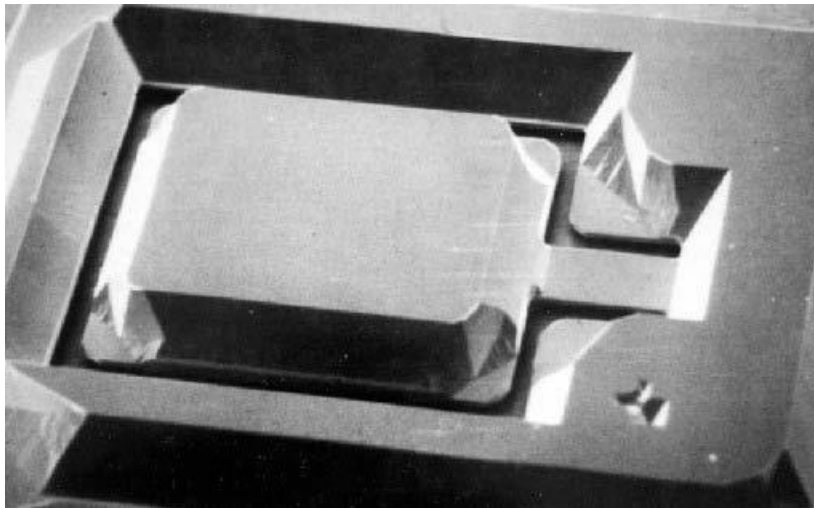


Figure I.13 Exemple de structure micro usinée par gravure en volume [11].

I.5.4 D'autres procédés

Les deux technologies précédemment présentés sont caractéristiques des procédés MEMS mais la spécialisation par rapport aux procédés standards CMOS se trouve aussi dans des utilisations spécifiques de procédés standards.

I.5.4.1. La technologie SOI

SOI signifie Silicon On Insulator. Dans cette technologie le wafer en silicium monolithique est remplacé par un wafer en trois parties : une fine couche de silicium en surface (de quelques centaines d'Angströms à plusieurs microns), une couche de matériaux isolant (typiquement une couche d'Angströms), et le reste de substrat en silicium. Cette

technologie apporte de meilleures performances en microélectronique : en haute fréquence, par rapport à la tenue aux radiations, en température. Dans le domaine des MEMS, on peut tirer partie de cette technologie en utilisant la couche d'isolant souvent l'oxyde SiO_2 comme couche sacrificielle. Cela permet d'obtenir des parties mobiles en silicium monocristallin. En effet en effectuant une gravure anisotrope en phase aqueuse du SiO_2 on libère les structures de la première couche comme le montre la Figure I.14 [12].

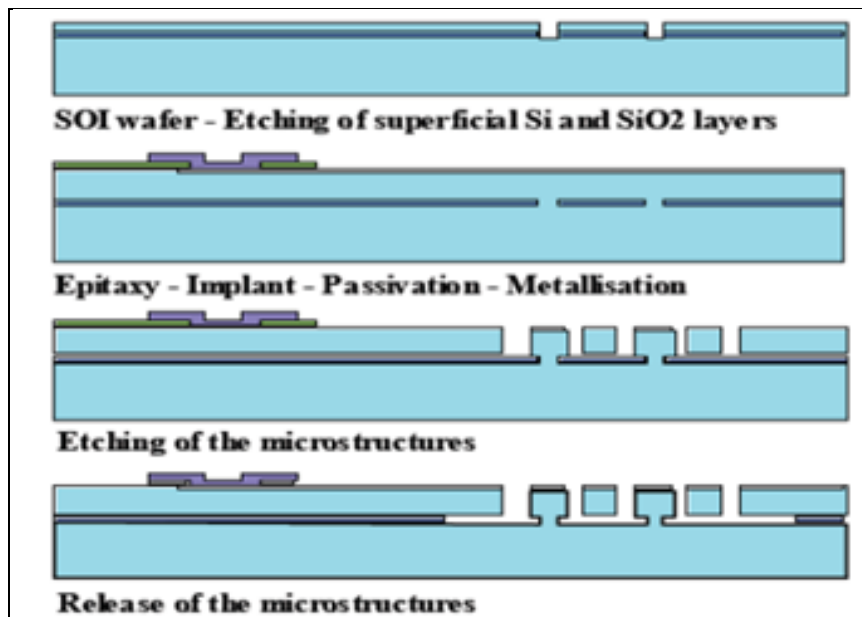


Figure I.14: Exemple de schéma en coupe d'une technologie SOI [12]

1.5.4.2. La technologie LIGA

La technologie LIGA (Figure I.15) est considérée à part; elle permet de réaliser des structures de plusieurs centaines de micromètres d'épaisseur, ainsi que des micro-outils ou des moules en métal. Ces derniers permettent de dupliquer une forme à l'envie sur des matériaux plastiques. [13].

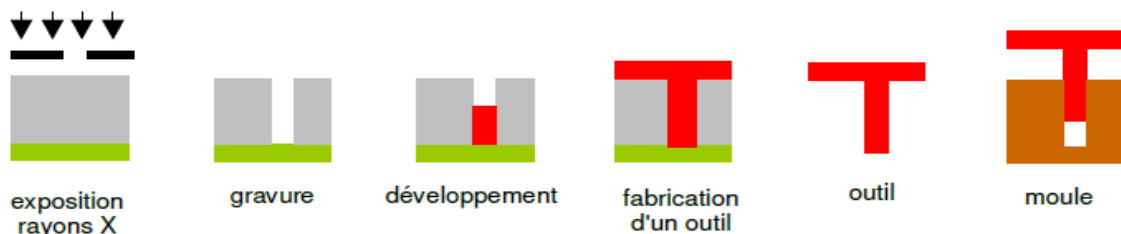


Figure I.15 : Technologie LIGA

I.6. Différents composants MEMS

Les dispositifs MEMS font l'objet d'un effort de recherche important et dans de multiples domaines. A l'origine, la notion de composants MEMS se limitait à des éléments mécaniquement déformables, aujourd'hui elle a évolué en englobant l'ensemble des structures réalisées à partir de ces technologies de micro-fabrication. Afin de mieux illustrer ces considérations, nous allons aborder en détail le thème des principaux types de microsystèmes et microstructures électromécaniques intégrées et des applications qui en découlent. Il existe ainsi trois catégories générales : les micro-capteurs, les micro-actionneurs et les micro-commutateurs [12].

I.6.1 Les Micro- commutateurs MEMS

Un commutateur présente généralement deux états: un état passant assurant la transmission du signal et un état bloqué où le signal ne peut pas traverser le composant. Le commutateur idéal se présenterait alors comme un court-circuit (impédance nulle) à l'état passant et comme un circuit ouvert (impédance infinie) à l'état bloqué. Tout comme les capacités variables, les micro-commutateurs MEMS sont généralement constitués d'une structure mobile ou uniquement mécaniquement déformable. On distingue deux principales familles de micro-commutateurs MEMS : des commutateurs à contact latéral (Figure I.16) et des commutateurs de type micro-poutre [14].

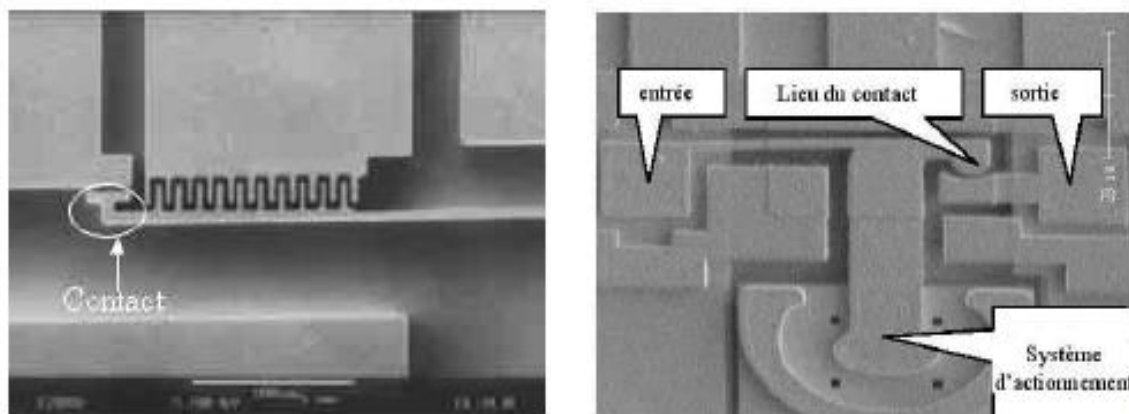


Figure I.16 : Exemple de commutateur à contact latéral [14]

Les micro-commutateurs MEMS sont constitués d'une fine poutre déformable. Lorsqu'elle est contrainte, cette micro-poutre peut se défléchir jusqu'au contact d'une électrode généralement disposée sur la surface du substrat. Ainsi, la position de la micro-poutre définit l'état passant ou bloqué du commutateur. On distingue deux types de contact: un contact capacitif (Figure I.17) ou un contact ohmique (Figure I.18).

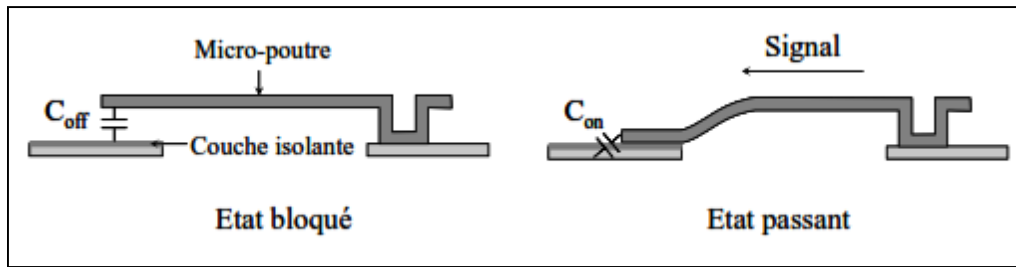


Figure I.17: Commutateur série à contact capacitif [14]

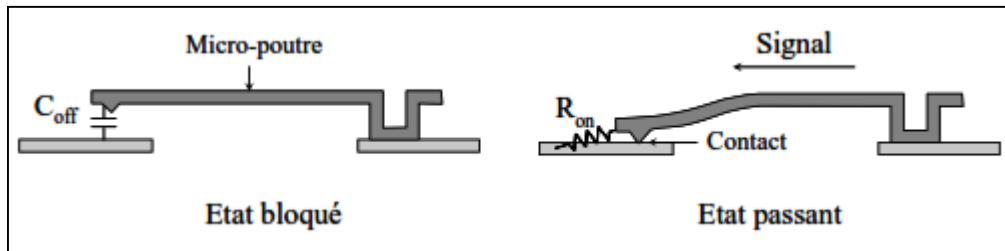


Figure I.18: Commutateur série à contact ohmique [14]

I.6.2 Les Micro-capteurs MEMS

En général, un capteur est un dispositif qui génère un signal électrique lorsqu'il est soumis à l'action d'une grandeur (objet de la mesure) appelée mesurande, dont la nature peut être physique, chimique ou biologique. Un micro-capteur mécanique traduit une grandeur physique appartenant au domaine mécanique (masse, déplacement, force, vitesse, accélération, pression, etc.) en un signal électrique (tension, courant, etc.). Un micro-capteur mécanique peut être :

- A détection intégrée, ce qui signifie que le signal mécanique est directement traduit en signal électrique, sans avoir besoin d'un apport d'énergie extérieur.
- A détection externe, si le micro-capteur nécessite une source d'énergie auxiliaire afin de générer le signal électrique.

Les micro-capteurs ont une fonctionnalité peu encombrante. Ils sont discrets et légers et non perturbés par l'environnement d'application (exemple de capteur d'humidité, Figure I.19 [15]).

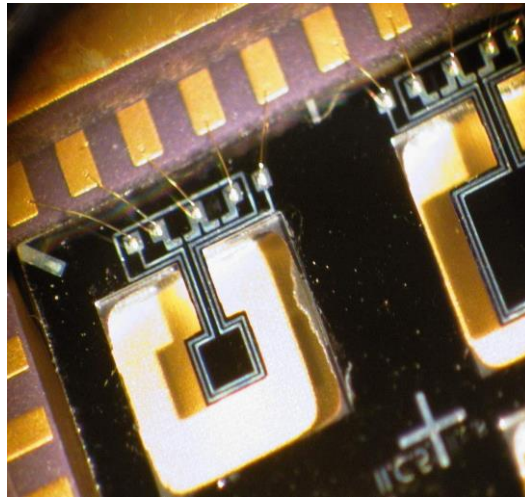


Figure I.19 Capteur d'humidité [15]

I.6.3 Les Micro-actionneur MEMS

Un actionneur est un dispositif mécanique qui traduit une sollicitation extérieure en une action physique (ex : force ou déplacement). De la même manière que les micro-capteurs, les micro-actionneurs peuvent être classifiés suivant divers critères :

- En fonction de l'effet physique utilisé pour réaliser la transduction du signal extérieur.
- En fonction du design de la partie mécanique active, on distingue deux classes de micro-actionneurs :
 - ☛ Les microstructures rigides, qui transmettent des forces ou des couples par translation ou rotation
 - ☛ Les microstructures déformables, qui transmettent les forces ou des déplacements à travers leur déformation (Exemple d'actionneur thermique, Figure I.20).

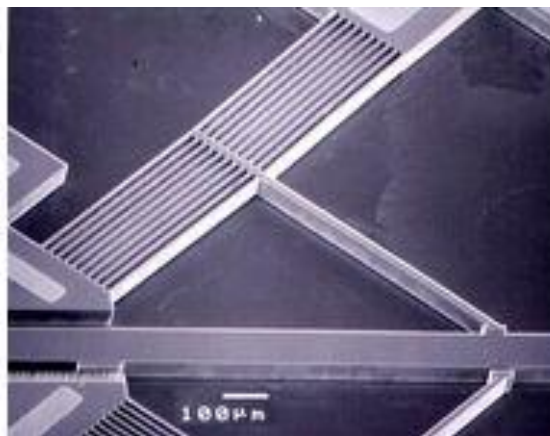


Figure I.20 Micro-actionneur thermomécanique [16]

I.7. Conception des MEMS

La conception de microsysteme commence, comme celle de tout produit, par la définition des besoins et des fonctions que doit assurer le systeme à concevoir. Cette phase est alors suivie par la conception physique du composant. Les microsystèmes sont constitués d'une grande diversité de composants pouvant être assemblés de différentes façons. Le choix de ces modes d'assemblage se fait durant la phase de conception. Cette phase commence par les spécifications du microsysteme à réaliser jusqu'à la fabrication du prototype [17].

Les microsystèmes présentent un fort caractère pluridisciplinaire car ils intègrent différentes technologies liées à l'électronique, la mécanique, l'énergétique, l'automatique, etc. Cette hétérogénéité est une source de complexité. En effet, le couplage des divers domaines implique des difficultés de représentation et de caractérisation et même en conception.

I.8. Architecture MEMS

Les microsystèmes interagissent avec leur environnement par le biais de capteurs et d'actionneurs qui communiquent et échangent des données avec une base de contrôle ou avec d'autres microsystèmes proches, ce qui est appelé l'architecture du microsysteme (Figure I.21). De plus, ils peuvent agir directement sur le milieu dans lequel ils se trouvent et/ou transmettre ces données à d'autres systemes qui agiront à leurs tours. C'est en cela que les microsystèmes sont dit intelligents.

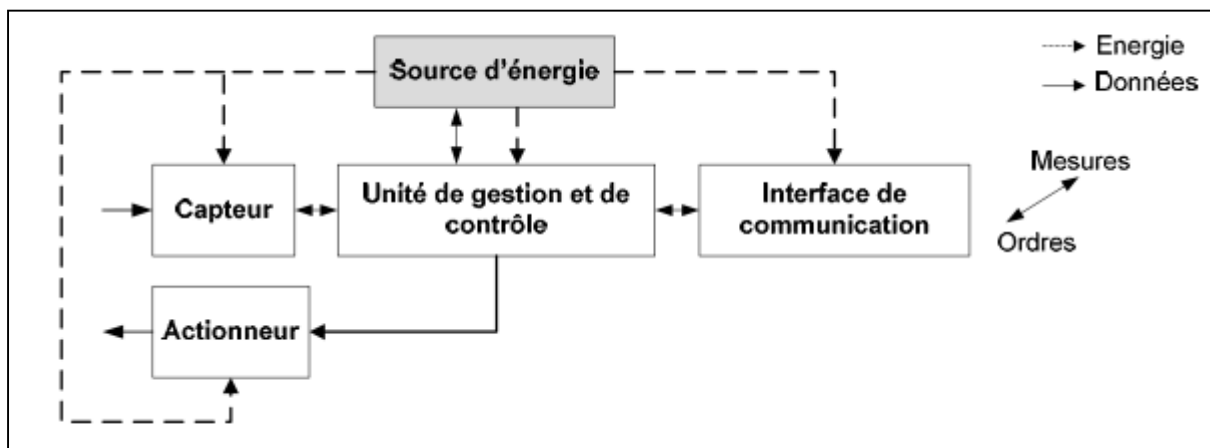


Figure I.21 : Architecture générale d'un microsysteme

Les structures MEMS étudiées généralement sont de deux types : un premier type constitué par une membrane circulaire de silicium monocristallin suspendue par plusieurs ressorts permettant son déplacement suivant l'axe vertical du wafer SOI (structures à débattement vertical). Un deuxième type qui est constitué de peignes à doigts [6].

a. Structure à débattement vertical

La Figure I.22 donne un aperçu de la configuration de base de ces structures qui sont formées d'une membrane circulaire suspendue par différentes poutres ancrées sur un substrat plan. La capacité MEMS variable est ainsi constituée par la membrane circulaire jouant le rôle de l'électrode mobile et le substrat plan jouant le rôle de l'électrode fixe. Cette structure est obtenue par la gravure d'un wafer SOI dans lequel l'électrode mobile est réalisée sur la couche de silicium supérieure et l'électrode fixe définie par le substrat. L'entrefer (gap) est alors défini par l'épaisseur de la couche d'oxyde de silicium enterrée (SiO_2) qui est complètement gravée (gravure sélective) lors du procédé technologique, ce qui permet de libérer la membrane mobile [8].

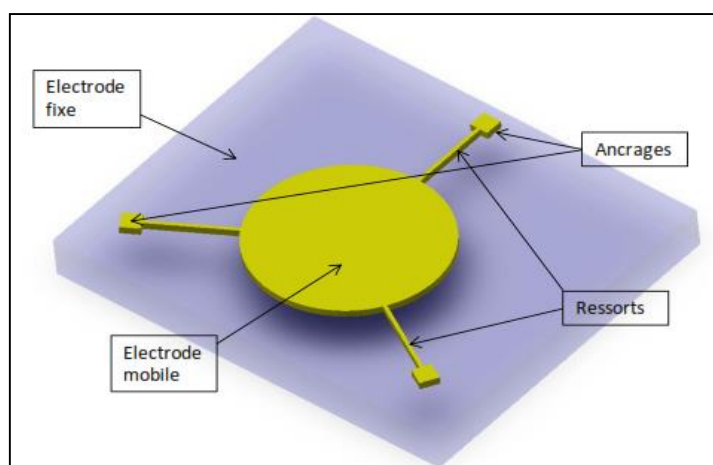


Figure I.22: Schéma d'une structure MEMS à membrane circulaire [8]

Ce modèle, caractérisé par différents diamètres de l'électrode mobile (de 1 mm à 2 mm), et différentes configurations et dimensions des ressorts (largeur de 5 μm à 10 μm ; longueur de quelques centaines de μm à plus de 2 mm). Par ailleurs, utiliser ce type de structure avec une configuration adéquate des ressorts permet un meilleur contrôle de la guidance verticale de la membrane mobile et donc une meilleure définition de la tension de ON (tension pull-in en anglais). Néanmoins, compte tenu des capacités électriques de nos MEMS (plusieurs dizaines de pF), les membranes présentent des diamètres importants, de quelques millimètres, ce qui peut engendrer des déformations locales dans la membrane influençant ainsi la valeur de la tension de pull-in. Ceci peut représenter une limitation pour les performances de l'électronique de commande et impose donc d'augmenter notablement la capacité nominale du MEMS par rapport à ces capacités parasites [8].

b. Structure à doigts en peigne

Le deuxième type de MEMS est représenté sur la Figure I.23 sur la base du même wafer SOI, les deux électrodes mobile et fixe sont réalisées cette fois-ci sur la même couche supérieure de la plaquette SOI présentant chacune des doigts en peigne (de 150 à 300 doigts) dont l'écartement relatif représente l'entrefer. Il est ainsi possible de définir avec cette architecture tous les paramètres dimensionnels de la structure MEMS (nombre et dimensions des doigts, gap variable...) [11].

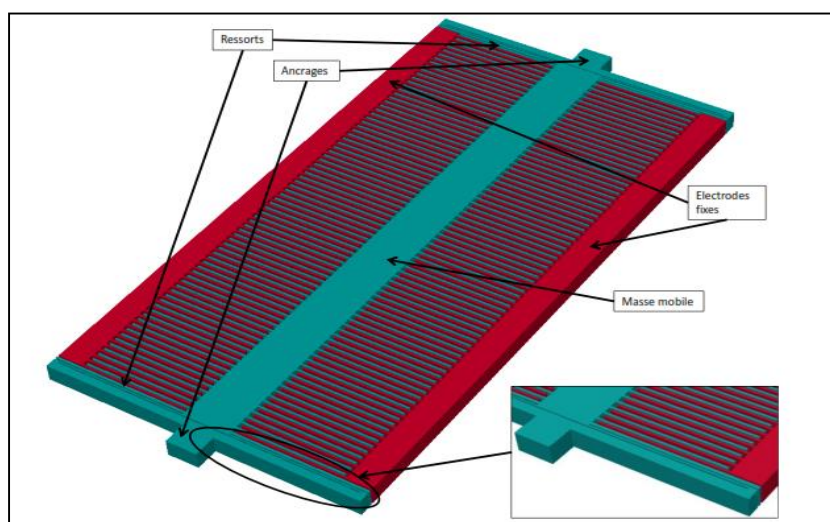


Figure I.23: Structure MEMS à doigts en peignes [11]

Cette structure peut atteindre quelques millimètres de longueur est composée d'une masse sismique rectangulaire supportée par quatre ressorts droits en forme de lames flexibles s'appuyant sur deux plots d'ancrages sur le substrat plan. Le profil des ressorts permettra de privilégier une direction de déplacement. Ainsi, en réalisant des ressorts avec une largeur inférieure à l'épaisseur on favorisera très fortement un déplacement dans le plan. L'électrode fixe est composée de deux parties connectées électriquement et munies de doigts en silicium libérés.

I.9. Classification des microsystèmes MEMS

On peut diviser les composants MEMS en quatre principales catégories: les « Microsystèmes » incluant notamment les capteurs et les actionneurs, les « MOEMS » qui sont des composants dédiés à des applications optiques, les « BioMEMS » développés pour des applications à la médecine, la biologie et la chimie. Finalement les « MEMS RF » pour les applications radio et hyper fréquences [12].

I.9.1. les Microsystèmes comme Micro-capteurs ou Micro-actionneurs

Les micro-capteurs sont les premiers dispositifs ayant démontrés le fort potentiel de la technologie MEMS. En effet, ils ont su mettre à profit la sensibilité à la pression, à l'accélération ou à la propre déformation des matériaux qui les composent.

Utilisés au début pour leurs hautes performances métrologiques en termes de précision, une telle fonctionnalité de base n'est plus suffisante aujourd'hui, et des modules électroniques et informatiques sont utilisés pour créer une nouvelle génération de micro-capteurs "intelligents". Dans des microsystèmes plus complexes, les micro-capteurs font partie de boucles d'asservissement, ainsi les données qu'ils fournissent sont utilisées pour déterminer le fonctionnement d'actionneurs [12].

I.9.2. Les BIOMEMS

La technologie MEMS suscite un immense intérêt dans les domaines de la micro fluidique et de la biochimie pour les applications à la biologie et la médecine, du fait de la biocompatibilité des matériaux généralement utilisés dans la technologie MEMS et de la très faible taille de ces microsystèmes.

Les BioMEMS présentent un très fort potentiel pour le traitement thérapeutique, la livraison, la manipulation, le diagnostic, l'analyse ou la construction d'entités biologiques et chimiques. Certains des micro- ou nano-outils, mis au point récemment, tirent leurs propriétés remarquables de leur extrême miniaturisation, ils peuvent potentiellement se faufiler partout dans l'organisme, se glisser dans le plus étroit de nos capillaires [12], [18], [19].

Les principales applications dans ce domaine peuvent être regroupées en trois catégories :

- ☛ Les systèmes d'analyse, de diagnostic et de traitement biomédicaux comme les micros capteurs intelligents (Bio Chips) ou les bio puces à ADN (Figure I.24).
- ☛ Les systèmes d'instrumentation de la microchirurgie comme les micros scalpels et les micros pinces en chirurgie (figure I.25).
- ☛ Les systèmes actifs implantables comme le contrôle de paramètres (température, pH, pression sanguine) avec éventuellement injection automatique de médicaments et génération de stimulateur nerveux (recréer le mouvement de membres handicapés), etc.

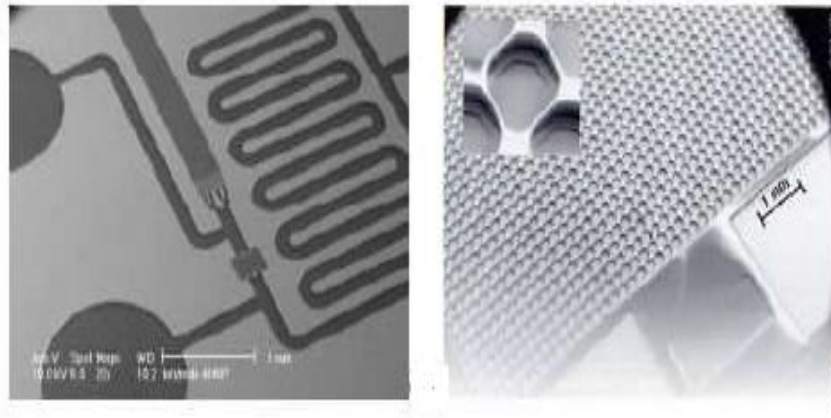


Figure I.24 : Présentation de puces ADN en Micro laboratoires [19]

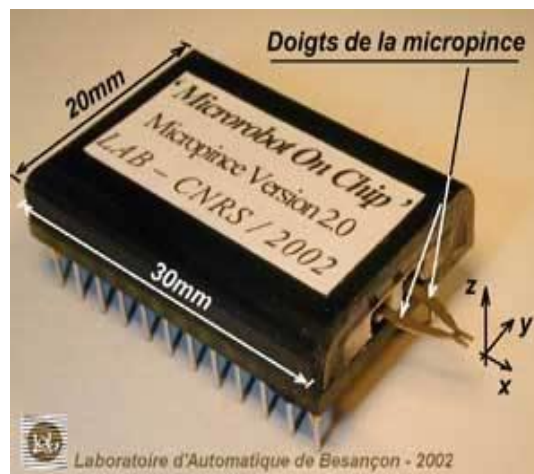


Figure I.25 : Micro pinces en microchirurgie [18]

Le domaine du diagnostic biologique et biomédical est le secteur de recherche le plus vaste de la famille des BioMEMS. De nombreux dispositifs se distinguent de manière significative à travers leur topologie, leur technologie et leurs applications.

I.9.3. Les MOEMS

Généralement, les dispositifs MOEMS sont basés sur l'intégration d'un ou de plusieurs micro-miroirs, leurs majorités bénéficient des technologies de fabrication et d'encapsulation relativement matures, et répondent aux besoins variés de plusieurs domaines d'applications. D'autres sont encore en phase de développement afin d'améliorer leurs performances pour répondre aux normes de plus en plus exigeantes.

Dans la littérature, nous rencontrons plusieurs types de micro-miroirs classés essentiellement en deux grandes familles : les miroirs mobiles non déformables et les miroirs à membranes déformables. Ces différents types des miroirs sont présentés dans les figures suivantes (figures I.26 et I.27), [20].

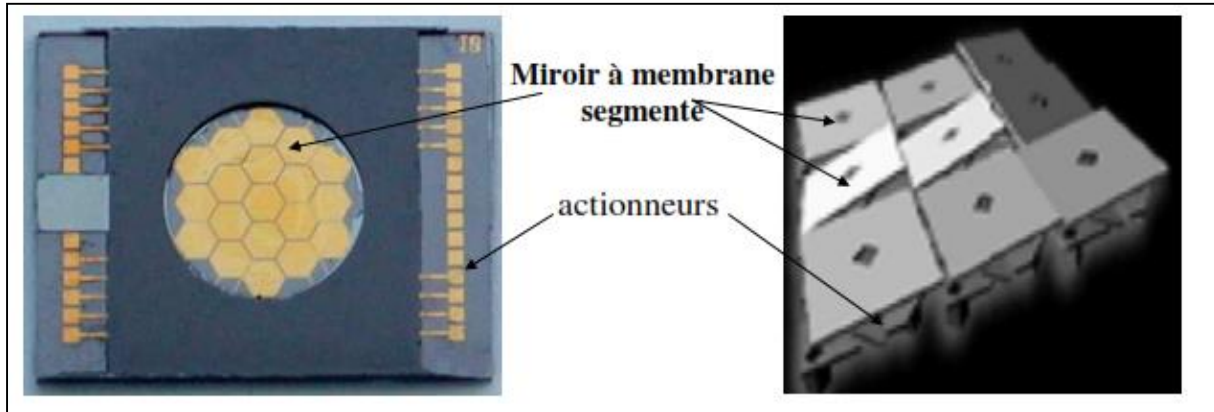


Figure I.26 : Illustration de miroir à membrane segmentée [20]

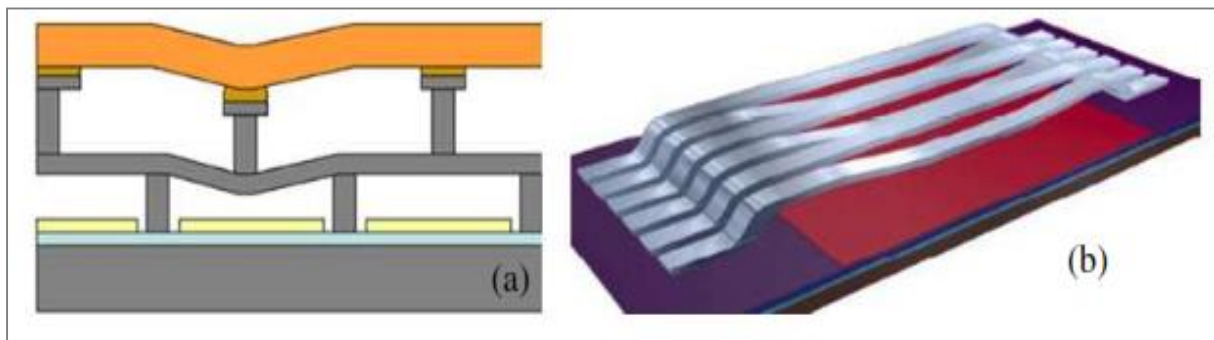


Figure I.27: Exemple de membranes [20]

(a) Membrane à déformation continue

(b) Membrane MOEMS diffractive

I.9.4. Les MEMS-RF

Les MEMS RF, grâce à leurs performances accrues, ont ouvert de nombreuses perspectives pour les applications radiofréquences. En effet, la technologie de fabrication MEMS pour les applications hyperfréquences s'est développée et diversifiée, rendant possible aujourd'hui la réalisation de plusieurs catégories de composants et circuits issus de cette technologie. Parmi les avantages des MEMS RF, on peut mettre en avant [21] :

- ◆ Une très faible consommation de puissance (uniquement dans les phases de déplacement) dans le cas d'une activation électrostatique qui ne nécessite presque pas de courant, ce qui implique une puissance consommée très faible.
- ◆ Une forte isolation: les commutateurs MEMS RF sont basés sur un gap d'air et ont donc une très faible capacité ce qui génère une très bonne isolation.
- ◆ De très faibles pertes d'insertion : généralement de l'ordre de 0.1 dB dans le cas par exemple de commutateurs parallèles.
- ◆ Une très haute fréquence de coupure.
- ◆ Un procédé de fabrication simple: les MEMS RF sont généralement fabriqués par les technologies utilisées pour la fabrication des semi-conducteurs, et peuvent être réalisés sur une grande diversité de substrats, comme le quartz, le verre ou le silicium par exemple.

Le Tableau I.3 présente une comparaison entre les performances des MEMS RF avec leurs homologues les diodes PIN et les transistors FET. Les caractéristiques des MEMS RF présentées ci-dessous correspondent au cas d'une activation électrostatique [12].

	MEMS RF	PIN	FET
Tension d'actionnement	20-80 V	+3-5 V	3-5 V
Courant	0 mA	3-20 mA	0 mA
Consommation de puissance (incluant convertisseur de tension)	0.05-0.1 mW	5-100 mW	0.05-0.1 mW
Temps de commutation	1-300 μ S	1-100 nS	1-100 nS
Capacité série : état haut	1-10 fF	40-80 fF	70-140 fF
Résistance série : état bas (commutateur MEMS à contact ohmique)	0.5-2 Ω	2-4 Ω	4-6 Ω
Rapport de capacité : état bas (commutateur MEMS à contact capacitif)	40-500	10	
Perte d'insertion (1-100 GHz)	0.05-2 dB	0.1-1.2 dB	0.4-2.5 dB
Isolation (1-100 GHz)	Très forte	Moyenne	Faible
Tenus en puissance (W)	<1	<10	<10
Fréquence de coupure (commutateur MEMS à contact ohmique)	20-80 THz	1-4 THz	0.5-2 THz

Tableau I.3 : Tableau comparatif des performances entre des commutateurs MEMS à actionnement et composants semi-conducteurs [12]

Les MEMS RF, grâce à leurs performances accrues, ont ouvert de nombreuses perspectives pour les applications radiofréquences. En effet, la technologie de fabrication MEMS pour les applications hyperfréquences s'est développée et diversifiée, rendant possible aujourd'hui la réalisation de plusieurs catégories de composants et circuits issus de cette technologie.

Parmi ces différents composants MEMS en application, nous pouvons citer [22] :

- Les résonateurs micromécaniques.
- Les inductances micro-usinées à fort coefficient de qualité, les lignes de transmissions, et les circuits sur membranes diélectriques.
- Les dispositifs FBAR (Film Bulk Acoustic Resonators).
- Les Micro-commutateurs (Figure I.28).
- Les Capacités variables ou varactors.

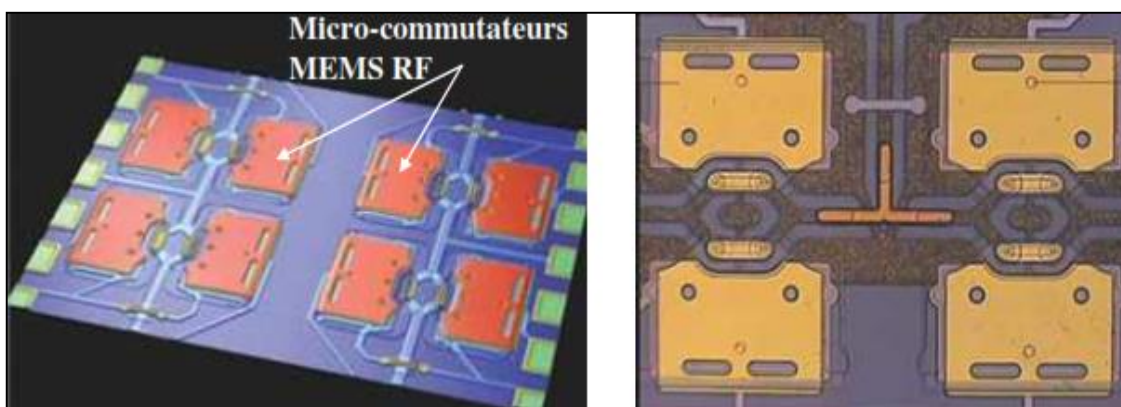


Figure I.28: Exemple de capacité digitale 4 bits (16 combinaisons) [22]

I.10. Les domaines d'applications des Microsystèmes

L'intérêt suscité par les MEMS depuis les années 80 repose sur leurs caractéristiques issues de la réduction des dimensions de ces dispositifs. D'un point de vue économique, la réduction des échelles (en masse et en volume) permet de limiter les encombrements et de multiplier les fonctionnalités sur un même substrat. On peut, par exemple, intégrer en parallèle des capteurs capables de mesurer des paramètres d'environnement (pression, accélération,...) et des actionneurs (micromoteurs,...). De plus, leur mode de fabrication permet de les produire (facilement, rapidement et simultanément) en grande quantité et à faible coût. L'intérêt, pour les microsystèmes, suscité également, par leurs performances liées à la réduction des échelles avec des fréquences de résonance élevées, de faibles inerties, des sensibilités importantes, de faibles consommations,... [23]

Issus de la technologie de la micro-électronique, les MEMS font appel pour leur fabrication aux micros technologies, qui permettent une production à grande échelle. Les MEMS sont le

plus souvent à base de silicium, mais on utilise également d'autres matériaux suivant l'adéquation de leurs propriétés physiques à certaines applications, comme les métaux, les matériaux piézoélectriques, divers polymères, etc. On trouve Les microsystèmes utilisés dans plusieurs et différents domaines civils comme l'informatique, l'automobile, la médecine, la biologie, les télécommunications et l'aérospatial aussi bien que dans les domaines militaires [24].

I.10.1. L'électronique domestique et les dispositifs informatiques

Les nouvelles générations de disque dur basé sur des MEMS se développent à cause de la nécessité toujours croissante de stockage des données. Les têtes des imprimantes à jet d'encre dominent les nouvelles techniques d'impression (Figure I.29). Dans ces dispositifs, une électrode est placée sur un substrat qui inclut une cavité pour l'encre, permettant la génération d'une force électrostatique qui agit sur les gouttes d'encre [15].

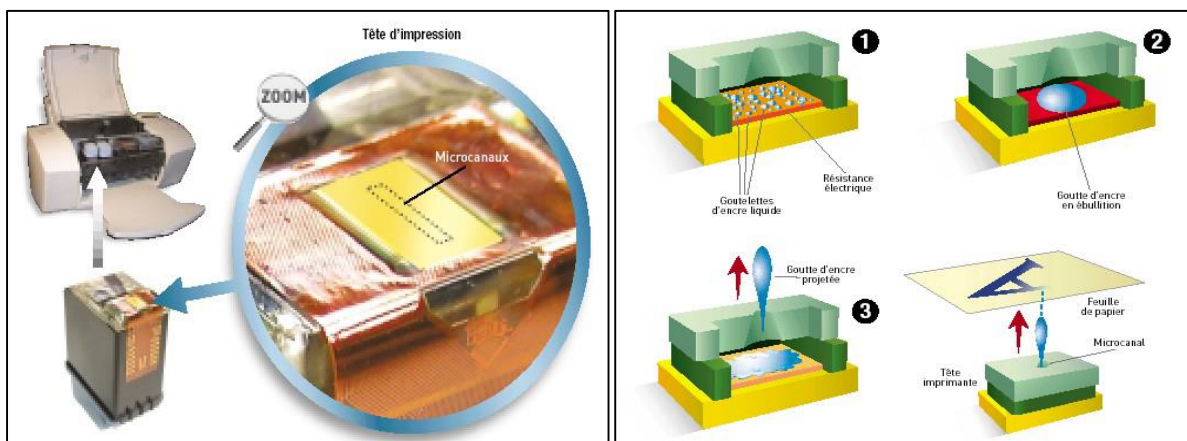


Figure I.29 : Imprimante à jet d'encre [14]

I.10.2. Insertion des MEMS en industrie automobile

C'est un autre domaine d'application important des dispositifs microsystèmes très prolifique point de vue économie et sécurité. Le déclencheur d'airbags a été un des premiers dispositifs microsystèmes appliqués dans ce domaine. Le cœur du déclencheur est formé d'un accéléromètre, dont le coût a été fortement réduit par les technologies de fabrication.

La micro-valve pour l'injection de fuel ou gaz est un autre dispositif microsystème utilisé dans l'industrie automobile. La micro-valve contrôle le débit d'entrée d'essence ou du gaz dans le moteur. En outre, on peut utiliser des capteurs piézo-résistifs MEMS pour mesurer la pression des pneus. Finalement, un autre exemple d'application de MEMS dans

l'industrie automobile inclut un gyromètre qui est utilisé avec le compteur kilométrique dans un système de position GPS (Global Positioning System) (voir Figure I.30), [23].

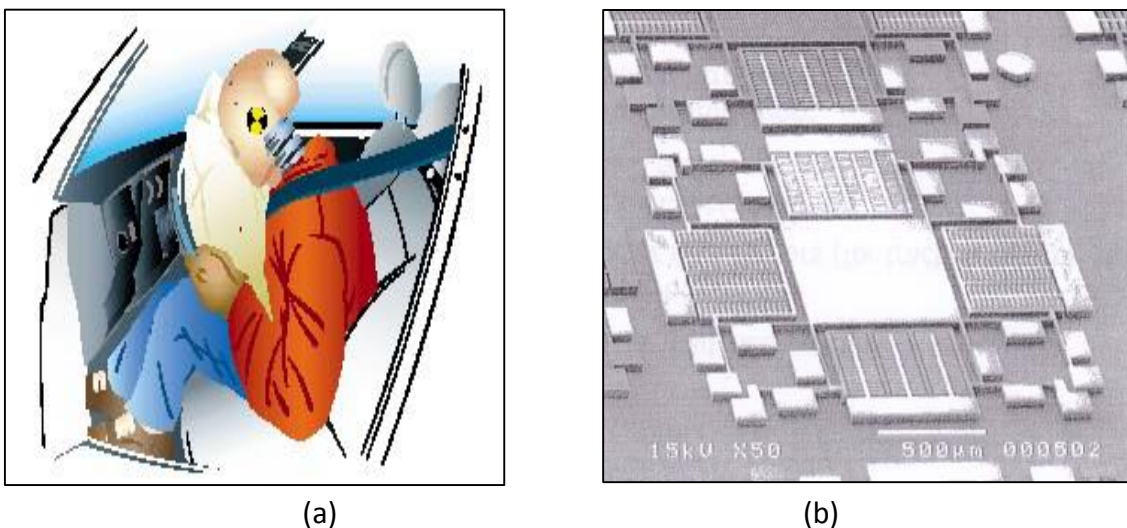


Figure I.30 : Application automobile [23].

- (a) Accéléromètre
- (b) micro gyromètre

I.10.3. Application MEMS en Télécommunications

Les nouvelles générations d'appareils de télécommunications disponibles dans le commerce contiennent des nouveaux dispositifs tels que le commutateur, la capacité variable, l'inducteur, le résonateur et le filtre MEMS. Ils sont intégrés sur le même substrat afin d'augmenter les fréquences de fonctionnement, de sélectionner une fréquence précise, de diminuer les parasites, de diminuer la taille, etc. Bien évidemment, les téléphones portables se trouvent parmi les appareils de télécommunications qui bénéficient de ces nouveaux dispositifs. Aussi, le téléphone portable peut être équipé d'un minidisque dur ou d'un appareil photo numérique, avec des encombrements de plus en plus faibles [25]. Les développements dans le domaine Telecom concernent notamment les capacités, les inductances, les transformateurs, les filtres et tout éléments formant une chaîne d'émission et de réception de signal pour différentes transmissions de données, (Figure I.31).

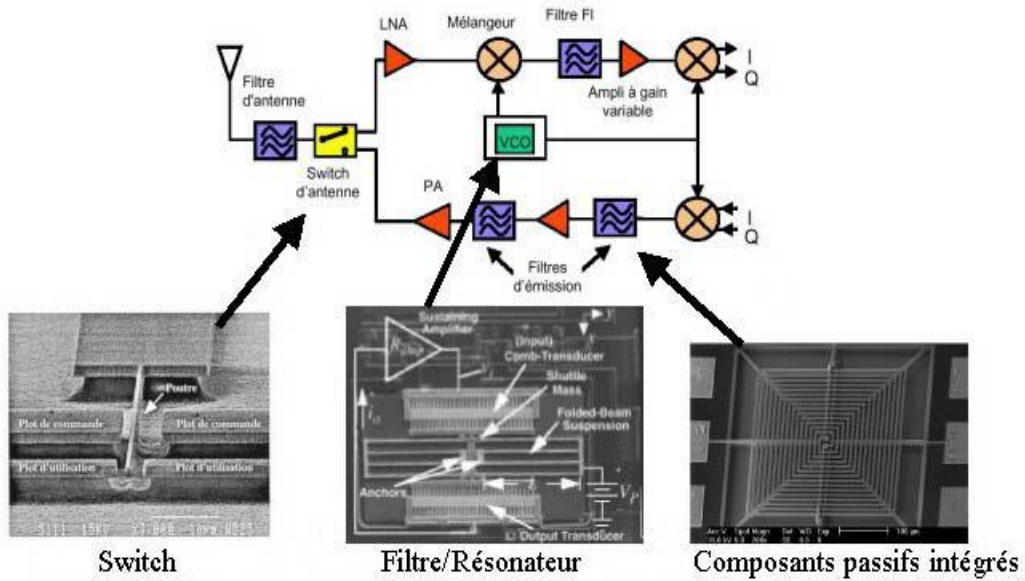


Figure I.31 Insertion de la technologie MEMS dans une chaîne d'Emission / Réception [25]

I.10.4. L'industrie chimique en Biologie et les équipements liés à la santé

Le domaine de biologie et conception d'équipements développent vite une importante source économique avec l'aide de MEMS. Les analyses et soins sont des demandes fréquentes liées à la santé humaine, par exemple : le tensiomètre, le capteur d'analyse chimique du sang, le système de micro-injection et le dispositif de stimulation cardiaque (pacemaker). Actuellement, un distributeur injecte l'insuline par aiguille: bientôt il le fera par une matrice de micro-aiguilles très fines, dont la profondeur de pénétration sera très faible, de l'ordre de 100µm, et qui seront presque insensibles pour le patient, (Figure I.32), [26].

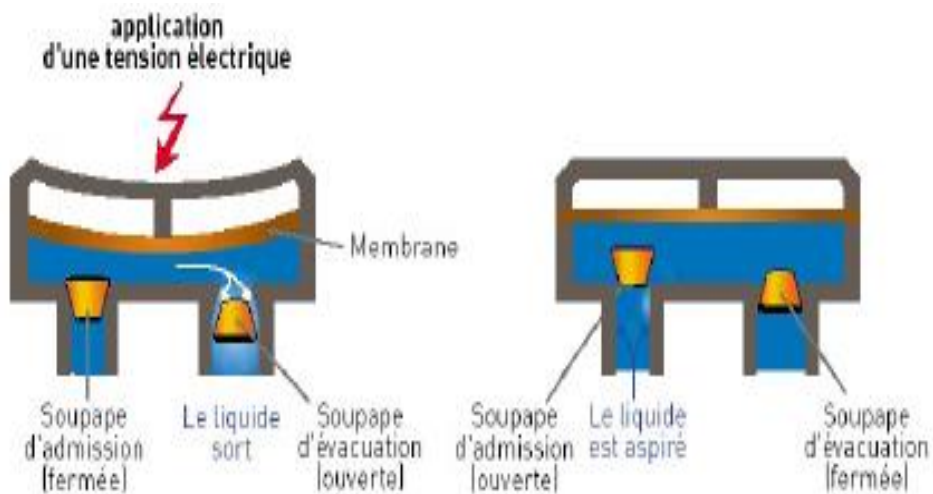


Figure I.32 : Distributeur d'insuline [26]

Les nanosciences permettent de mieux comprendre l'organisation et la structure des cellules, jusqu'aux protéines et à l'ADN. L'ADN, support du génome humain, peut parfois présenter des défauts lors de sa reproduction. Sa mutation ou des incohérences peuvent alors induire la survenue de cancers. Trouver des technologies qui permettent de détecter des tumeurs à un stade très précoce, alors même qu'elles sont indétectables avec les moyens d'imagerie médicale actuels, est un enjeu majeur (Figure I.33).

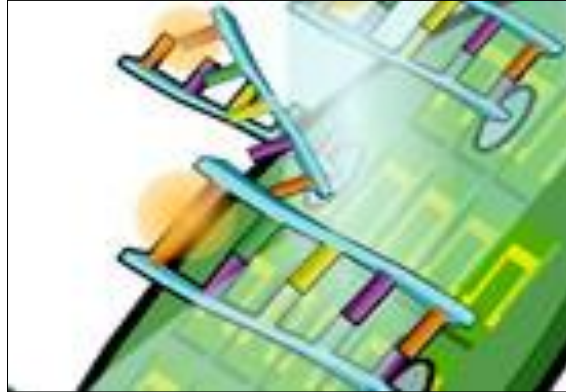


Figure I.33 : Les puces ADN [26]

I.10.5 Application MEMS en Optique

Il s'agit alors de microsystèmes dont les applications et les composants relèvent essentiellement du domaine de l'optique ou de la photonique avec des exemples de réalisations bien connues : miroirs, commutateurs, connecteurs, modulateurs optiques, multiplexeurs-démultiplexeurs en longueur d'onde, ... pour tendre vers des capteurs intelligents et des actionneurs dotés de caractéristiques supplémentaires comme l'auto test ou l'auto calibration.

La Figure I.34 montre un exemple concret de routage réalisé par MOEMS, à travers le déplacement d'un obturateur ou d'un réflecteur en silicium qui vient s'intercaler entre deux voies de communication. On peut remarquer dès à présent que la puce intègre également les extrémités de fibres optiques [20].

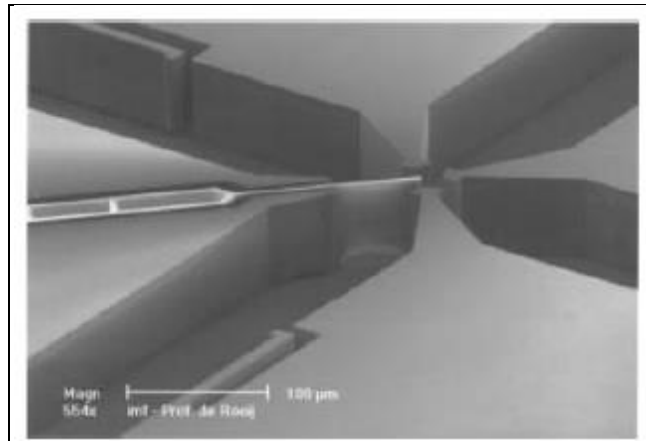


Figure I.34 : Fonction de commutation optique réalisée par un miroir mobile de type MEMS [19].

I.10.6 Application MEMS au domaine aérospatial

Le domaine aérospatial est un domaine qui exige un haut niveau de sécurité et une grande fiabilité, donc les prix de ses dispositifs sont élevés. Les dispositifs microsystèmes qui ont trouvé une application dans ce domaine comprennent l'accéléromètre, le gyromètre, le micro-propulseur, les capteurs de pression, les capteurs thermiques, etc. Les accéléromètres et les gyromètres sont utilisés pour la surveillance et pour le contrôle des mouvements des nano-satellites.

Il existe des projets de recherche, dans ce domaine, qui suggèrent des micro-propulseurs qui produisent des faibles forces pour imposer à un nano-satellite le mouvement demandé [20]. D'autres capteurs fournissent des informations d'environnement des satellites et vaisseaux spatiaux comme la pression, la température, etc., Figure I.35, [24].



Figure I.35 : Satellite autonome sur orbite

I.11. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des Microsystèmes ainsi qu'un descriptif de leurs méthodes de fabrication compatible avec les procédés standards de la microélectronique en focalisant principalement sur les technologies intégrées permettant d'obtenir des microsystèmes monolithiques. Nous avons ensuite décrit les différentes applications technologies actuelles utilisées.

Le développement en technologies confère aux microsystèmes des avantages fondamentaux comme la miniaturisation, le coût réduit par les procédés de fabrication collective, des performances et fonctionnalités nouvelles, et ainsi l'économies d'énergie.

Chapitre 2

**Les Micro commutateurs
MEMS et Modes
d'actionnement**

II.1 Introduction

L'appellation « MEMS RF » regroupe tous les microsystèmes intégrés dans des circuits pour applications Radio-Fréquences. Actuellement, ce sont les duplexeurs et filtres,... Ces composants sont surtout intégrés dans les téléphones mobiles, radar, GPS, etc.. Pour une application donnée, les différents MEMS RF peuvent être intégrés pour des fonctions différentes. Par exemple dans les téléphones mobiles, ils sont utilisés pour remplacer certains filtres, alors que les switches pourraient plutôt être intégrés comme commutateurs à effet de capacité variable.

II.2. Mouvement dans les MEMS : la physique des actionnements

Le fonctionnement et notamment le mouvement des MEMS repose sur des phénomènes physiques peu perceptibles à l'échelle macroscopique, car souvent négligeables devant l'attraction gravitationnelle. En raison de la petite taille des MEMS, les forces électrostatiques, magnétiques, thermiques et piézo-électriques peuvent ainsi entraîner des mouvements importants dans des parties mobiles de ces composants [26]

II.2.1. Forces mises en jeu durant l'actionnement

Les commutateurs MEMS s'articulent autour de trois parties : deux parties fixes qui sont le système d'actionnement et la ligne de transmission du signal RF, et une partie mobile qui assure la fonction de commutation. Le déplacement de la partie mobile peut être selon deux cas latéral ou vertical ceci suivant deux types de structures: les membranes de type pont (Figure II.1) et celles de type encastré libre ou poutre (cantilever en anglais) (Figure II .2). Dans les deux cas, la membrane est généralement située au dessus de la ligne de transmission et s'abaisse suite à la force exercée par le système d'actionnement [26].

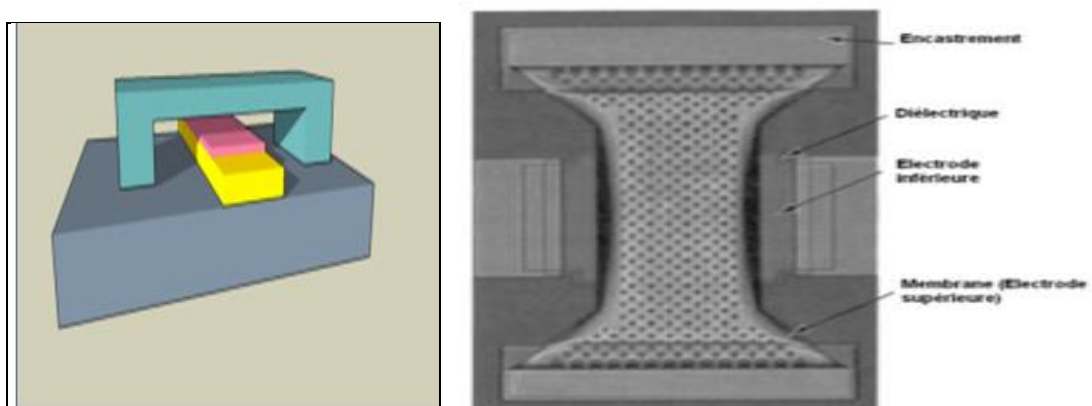


Figure II. 1 : Membrane pont (Raytheon) [26]

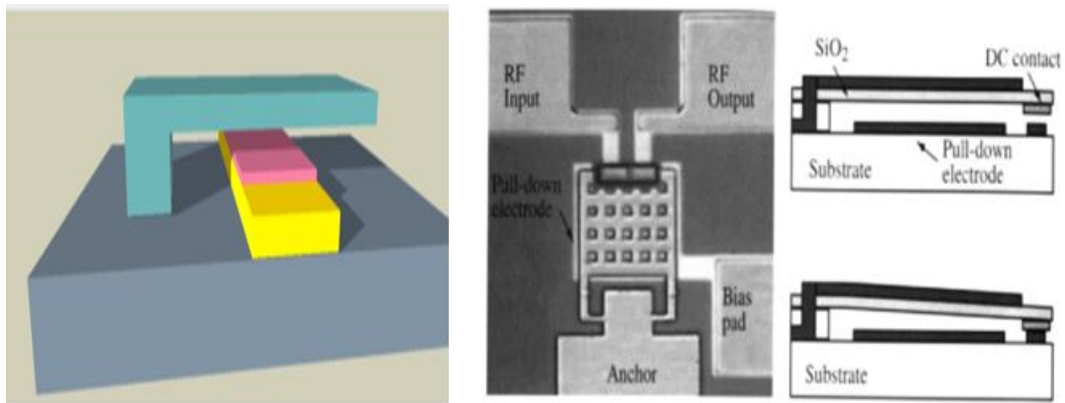


Figure II. 2 : Membrane cantilever (Motorola) [26]

Lors de l'actionnement de la structure, il apparaît deux forces : la force générée par le système d'actionnement et la force de rappel de la structure induite par sa raideur et s'opposant au mouvement. Lorsque la force d'actionnement générée est supérieure à la force de rappel, la structure se déforme jusqu'à entrer en contact. Une nouvelle force intervient alors, il s'agit de la force de contact. Le système composé de la membrane et de la ligne de transmission est alors à l'équilibre et selon le principe fondamental de la statique on obtient l'équation suivante [27] :

$$\vec{F}_{\text{actionnement}} + \vec{F}_{\text{rappel}} + \vec{F}_{\text{contact}} = \vec{0} \quad (\text{II.1})$$

Soit par projection verticale :

$$\vec{F}_{\text{actionnement}} = \vec{F}_{\text{rappel}} + \vec{F}_{\text{contact}} \quad (\text{II.2})$$

Compte tenu des dimensions des membranes les forces d'accélération peuvent être négligées puisque la masse des structures est extrêmement faible. De façon analogue, tant les forces de surface que celles de frottements sont bien supérieures à celles d'inertie ou de gravitation. L'équation précédente est donc valable dans la mesure où l'on ne tient pas compte des frottements, Figure II.3 [27].

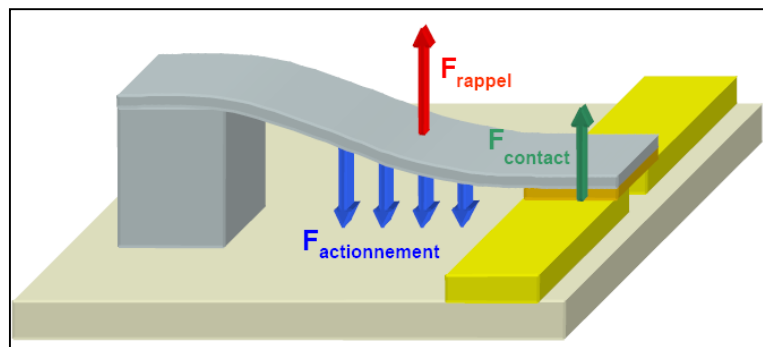


Figure II.3 : Bilan des forces appliquées à un cantilever [27]

Dès lors, il est possible d'estimer la valeur minimale nécessaire pour créer une déflexion. En effet, en se plaçant dans une hypothèse de faibles déplacements, la membrane mobile est assimilable à un ressort de constante de raideur k (N/m). De plus, tant que la membrane n'est pas en contact avec la ligne de transmission, l'équilibre des forces impose que la force d'actionnement soit égale à la force de rappel. Ainsi, il apparaît que le déplacement de la membrane est proportionnel à la force d'actionnement moyennant la raideur de la structure. La constante de raideur est uniquement en fonction de la géométrie et des matériaux utilisés. Le paragraphe suivant, quant-à lui, présente les différents types d'actionnement que l'on retrouve dans la littérature.

II.2.2. Types d'actionnements

La déformation mécanique et la mise en mouvement des micro-commutateurs MEMS nécessitent l'action d'une force extérieure. Plusieurs modes d'actionnement sont couramment utilisés pour assurer cette force qui peut être de nature électrostatique, électrothermique, magnétique ou piézoélectrique. Nous présenterons les principaux modes d'actionnement les plus utilisés jusqu'à présent [7].

II.2.2.1. Actionnement Électrostatique

Ce principe d'actionnement est à l'heure actuelle le plus utilisé, essentiellement pour sa simplicité de mise en œuvre. Nous allons présenter dans ce paragraphe les phénomènes mis en jeu lors de cet actionnement, ses avantages, ainsi que quelques exemples de structures réalisées sur ce même principe [23].

a. Principe

Pour qu'un actionnement électrostatique ait lieu dans une structure, il faut qu'elle ait au moins une électrode mobile et une autre fixe. En appliquant une différence de potentiel entre ces deux électrodes un champ électrique s'installe qui génère une force attractive qui attire l'électrode mobile vers l'électrode fixe. Dans le cas d'un actionneur hors plan, la tension à partir de laquelle l'électrode mobile vient s'effondrer sur l'électrode fixe est appelée « tension de seuil ou tension d'effondrement ». En effet la zone de déplacement stable est limitée par un phénomène d'instabilité au-delà de cette tension de seuil. Pour revenir à l'état ouvert, la tension d'actionnement est supprimée, l'électrode mobile revient à sa position initiale de part la rigidité mécanique de l'électrode mobile défléchie. La Figure II.4 illustre le principe de fonctionnement d'un actionneur électrostatique [7]

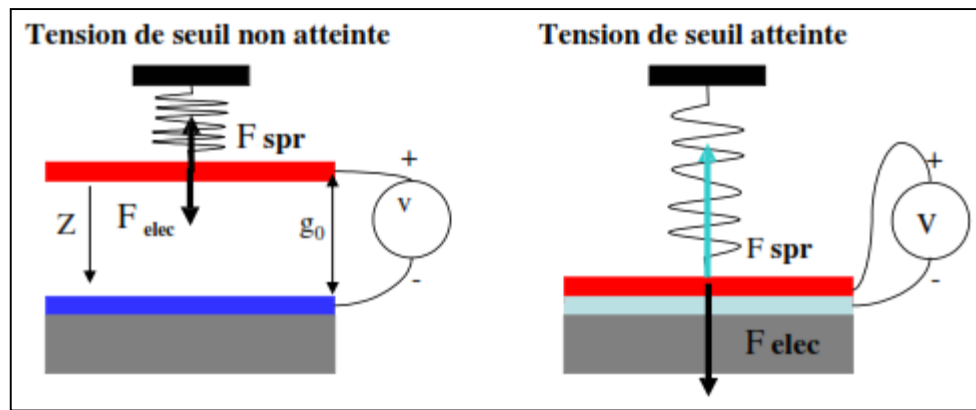


Figure. II.4: Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un actionneur électrostatique.

Lors de la polarisation des électrodes, une différence de potentiel s'installe entre les deux, l'électrode mobile est attirée électro-statiquement sous l'effet d'une force notée \vec{F}_{elec} . La rigidité de la poutre mobile s'oppose à ce déplacement, sous la forme d'une force de rappel \vec{F}_{spr} considérée comme linéaire avec le déplacement et qui peut être modélisée comme l'effet d'un ressort.

b. Exemples de composants

Il existe plusieurs types d'interrupteur à actionnement électrostatique dans ou hors plan comme suit :

✗ Déplacement hors plan

Il existe plusieurs types d'interrupteur à actionneur électrostatique hors plan, les structures de type pont et les cantilevers sont parmi les plus utilisées. La structure dans la Figure II. 5 est basée sur un cantilever multicouches oxyde de silicium/or/oxyde de silicium. Son extrémité est constituée d'un contacteur métallique qui permet d'assurer la commutation du signal RF. La poutre mobile dont une partie est métallique peut être polarisée pour entrer en contact avec l'électrode fixe qui est constituée par le substrat de silicium. Les couches d'oxyde de silicium constituent des couches isolantes qui ont pour rôle d'empêcher les courts circuits entre l'électrode d'actionnement et la poutre mobile. Grâce au flambement initial de la structure qui est induit par les contraintes résiduelles, une forte isolation peut être ainsi obtenue dans l'état non actionné. En appliquant une différence de potentiel entre la métallisation d'or de la poutre et l'électrode d'actionnement, une force électrostatique ainsi créée permet d'abaisser la barre de contact afin de refermer la discontinuité de la ligne [26].

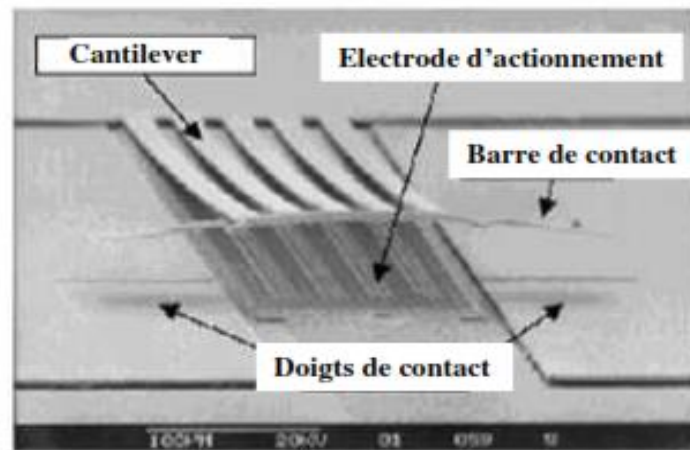


Figure II.5 : Micro-relais à actionnement électrostatique hors plan [27]

✗ Déplacement dans le plan

Le principe décrit précédemment est le principe de base utilisé ainsi par de nombreuses structures à actionnement électrostatique. La Figure II.6 présente un micro-relais muni d'un actionnement électrostatique latéral.

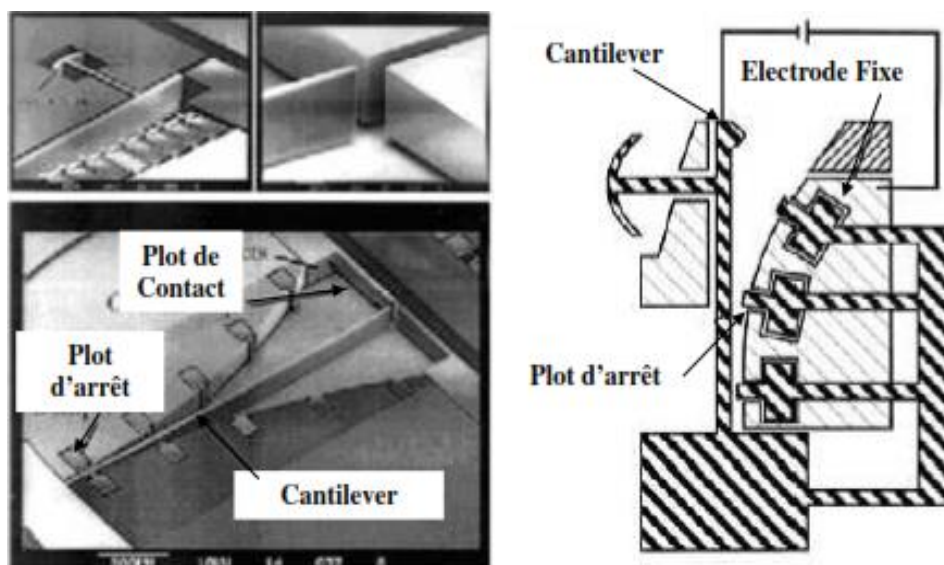


Figure II.6 : Micro-relais à actionnement électrostatique et déplacement dans le plan [13]

Dans l'exemple ci-dessus, la forme incurvée de l'électrode fixe de la structure est un avantage, puisqu'il lui permet de profiter d'un effet « zip » qui se traduit par une fermeture brusque, diminuant ainsi la tension d'actionnement. À l'extrémité du cantilever on peut distinguer les plots de contacts. Des plots d'arrêt ont été soigneusement placés pour empêcher le cantilever d'entrer en contact avec les électrodes d'actionnement.

La fabrication de ce dispositif se fait par gravure profonde du silicium et exige seulement trois niveaux de masques. Ce micro-relais, à actionnement latéral, offre une excellente isolation liée à la distance importante séparant les deux électrodes, ainsi qu'un très bon comportement en dynamique.

Le mode d'actionnement électrostatique présente de nombreux avantages qui en font un des modes d'actionnement les plus utilisés jusqu'à présent, parmi eux nous citons [13] :

- Sa simplicité de mise en œuvre : il suffit d'appliquer une différence de potentiel entre deux électrodes pour activer le composant. Ce n'est pas le cas dans un actionnement magnétique ou thermique.
- Sa compatibilité avec les filières technologiques actuelles.
- Sa faible consommation : l'apport d'énergie de l'actionnement électrostatique est négligeable car le courant consommé est très faible, cette consommation se fait uniquement durant les phases de déclenchement. Ce n'est pas le cas pour un dispositif actionné thermiquement ou magnétiquement.
- Sa vitesse de commutation est relativement rapide, de l'ordre de quelques μs .

II.2.2.2. Actionnement Magnétique

a-Principe

Le principe de ce mode d'activation est basé sur la force induite sur un matériau ferromagnétique (basé sur les propriétés de certains corps qui s'aimantent très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur) se trouvant sous l'influence d'un champ magnétique (Figure II.7). Ainsi, la poutre d'un micro-commutateur MEMS RF formée d'une couche d'un matériau ferromagnétique va subir une variation de forme sous l'effet d'un champ magnétique appliqué [25].

La force d'origine magnétique, résulte du champ magnétique qui est créé par le passage d'un courant dans une inductance située sous le MEMS ou à proximité de celui-ci. Elle permettra d'activer le composant MEMS RF. L'inconvénient majeur de ce mode d'actionnement réside dans la forte consommation de courant et donc de puissance qui reste un point critique dans la plupart des applications. En effet, cette consommation peut être forte parce qu'elle dépend de la durée de maintien du MEMS à l'état actif.

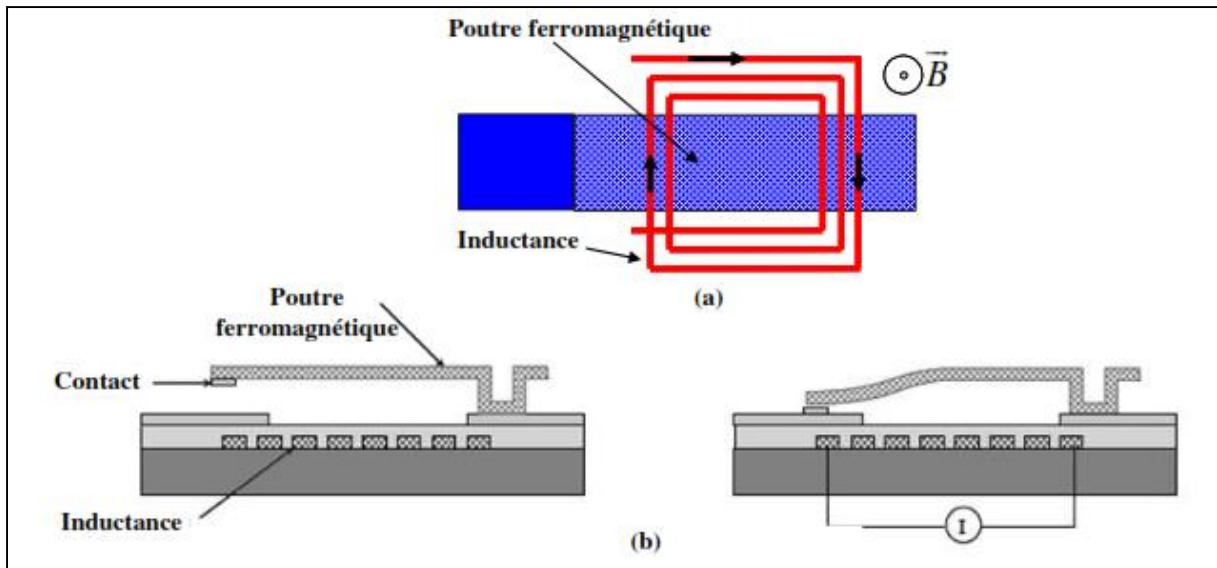


Figure II .7 : Mise en œuvre d'une commande magnétique [25]

(a) vue de dessus

(b) vue en coupe

Un second principe d'actionnement magnétique qui peut être utilisé est basé sur le phénomène de magnétostriction, représentant la variation des dimensions d'un matériau magnétique sous l'effet d'un champ magnétique. Une magnétostriction est dite négative lorsque le matériau se contracte dans la même direction que le champ magnétique avec une expansion dans la direction perpendiculaire à celui-ci. En effet, les domaines magnétiques des matériaux magnétostrictifs sont orientés aléatoirement. Ainsi, lorsqu'un champ magnétique est appliqué, ces domaines s'orientent perpendiculairement à sa direction, ce qui entraîne une dilatation du matériau dans cette direction et une contraction dans l'autre (Figure II.8), [25].

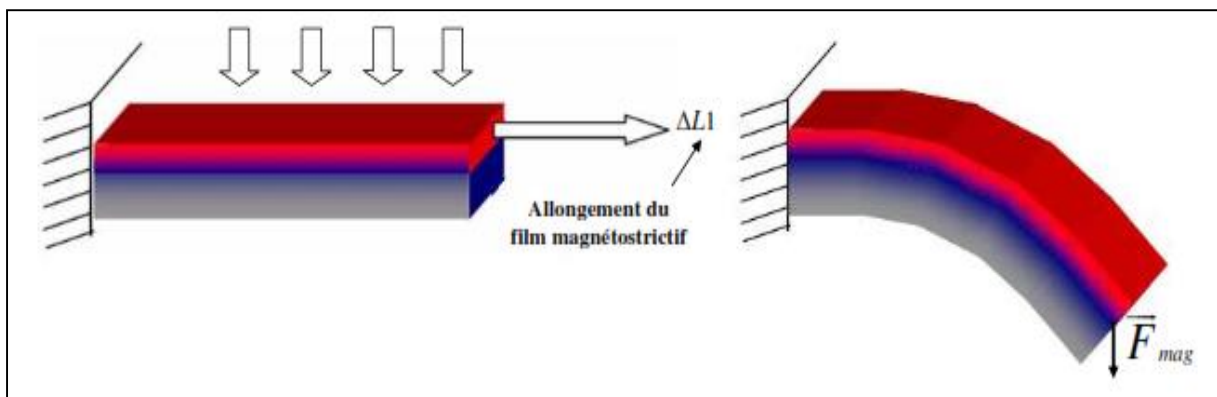


Figure II .8 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur magnétostrictif de type bilame [26]

b- Exemples de composants

Pour minimiser cette consommation en courant, une solution consiste à utiliser une structure bistable comme celle développée par la société Microlab. Ce micro- commutateur à contact ohmique a la particularité d'être actionné par une commande magnétique. Il se présente sous la forme d'une micro-poutre de type cantilever bistable (à deux états), réalisée à partir d'un matériau magnétique (figure II.9). Un pic de courant envoyé dans l'inductance placée sous la poutre, permet de modifier la magnétisation du cantilever. Le champ magnétique généré par l'aimant permanent placé sous le composant, permet d'actionner la poutre et ainsi le commutateur est activé.

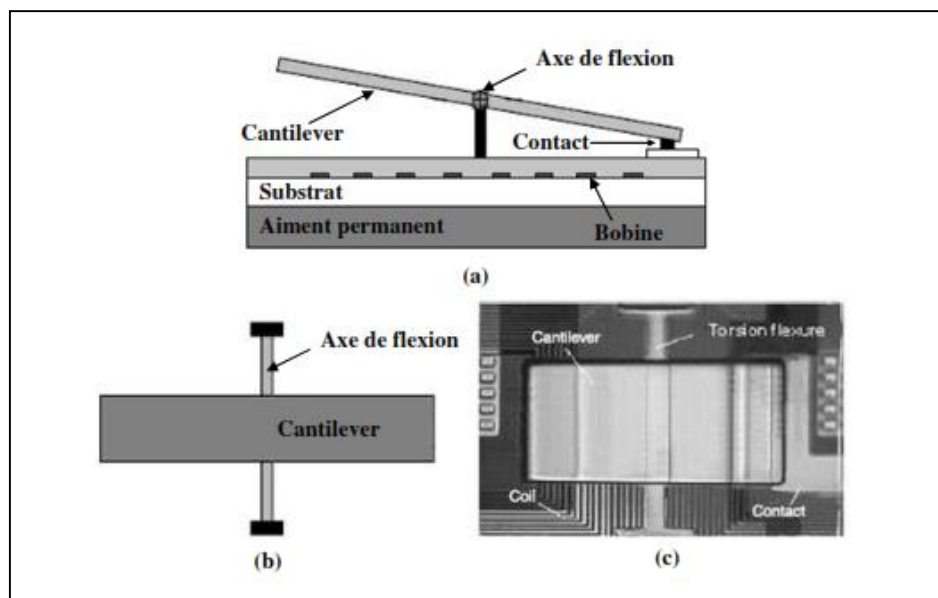


Figure II.9: Commutateur à commande magnétique développé par Microlab [26]

- (a) vue de coupe
- (b) vue de dessus
- (c) photographie

Une fois actionné, le cantilever se maintient dans cette nouvelle position sous l'effet de l'aimant permanent. En inversant la polarité du pic de courant, la magnétisation du cantilever est inversé, il bascule alors dans l'autre sens et revient dans sa position initiale. Une fois dans l'une de ses deux positions, la structure ne nécessite plus que du courant soit appliqué dans l'inductance. Cette méthode permet ainsi de limiter la puissance consommée pour actionner le composant [13].

Cependant, le principal avantage majeur de l'actionnement magnétique est de permettre la génération de forces très importantes de l'ordre de la dizaine de milli newton, permettant

d'exercer de fortes pressions de contact sur un contact métal-métal et donc d'atteindre de très bonnes résistances de contact et cela d'une manière très reproductible.

II.2.2.3. Activation Piézoélectrique

a- Principe

Certains matériaux ont la propriété de se polariser électriquement sous l'effet d'une force mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse), cette propriété est appelée la piézoélectricité. En effet, l'application d'un champ électrique à une structure mobile contenant une poutre, composée d'une couche de matériau piézoélectrique, entraîne un déplacement de la structure suivant une direction dépendant du signe de la polarisation (Figure II.10). En inversant la polarité de la tension appliquée à la couche, celle-ci se rétracte, contraignant ainsi la micro-poutre à revenir dans sa position initiale. Pour réaliser des micro-commutateurs, cette propriété permettrait d'augmenter la constante de raideur de la structure. Notons aussi que les temps d'activation de ce type de structure sont relativement minimes de l'ordre de la microseconde, pour des tensions d'activation variant autour de 20 V. Le matériau piézoélectrique principal utilisé jusqu'à présent est le PZT (Titanate Zirconate de Plomb) pour son fort coefficient piézoélectrique [28].

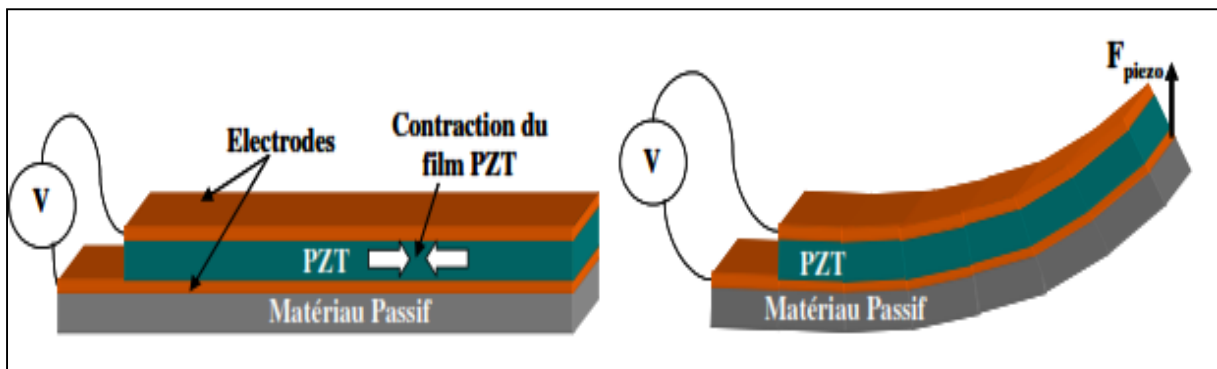


Figure II .10 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique de type bilame

b- Exemples de composants

La Figure II.11 présente un micro-relais à actionnement piézoélectrique l'actionnement s'effectue par le moyen d'un cantilever. Un film piézoélectrique est disposé entre deux électrodes et est placé sur une poutre micro-usinée en silicium. L'application d'une différence de potentiel entre les deux électrodes entraîne la contraction du film piézoélectrique, et produit un moment de flexion qui induit une déflexion du cantilever vers la ligne du signal jusqu'à l'établissement d'un contact.

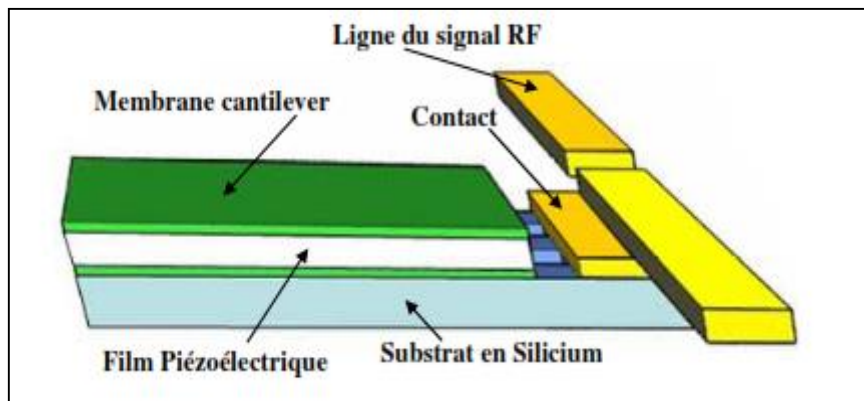


Figure II.11 : Micro-relais à actionnement piézoélectrique et déplacement hors plan [1]

Les avantages de l'actionnement piézoélectrique sont l'amplitude importante des forces générées, et les vitesses d'actionnement généralement courtes (de l'ordre de quelques microsecondes). Les tensions de polarisation du matériau piézoélectrique sont généralement de l'ordre de quelques volts et l'amplitude de la déflexion imposée à la structure dépend de l'épaisseur du matériau utilisé et de ses propriétés mécaniques intrinsèques.

II.2.2.4. Actionnement Thermique

a- Principe

L'actionnement électrothermique se base sur le principe de dilatation thermique des matériaux lorsque leur température augmente. Cette dilatation entraîne une modification des contraintes pouvant donner suite à un certain déplacement. Deux principes ont été utilisés jusqu'à présent, pour intégrer l'actionnement électrothermique dans des microsystèmes: soit en utilisant des couches de matériaux avec des coefficients de dilatation thermique différents, soit en disposant des structures géométriques non symétriques composées d'un seul matériau. Le premier principe est expliqué par le schéma donné par la Figure II.12. Le bilame est composé de deux matériaux différents superposés ayant chacun un coefficient d'expansion thermique différent, et donc qui ne se dilatent pas de la même manière. Ceci provoque une courbure de la structure et un déplacement de son extrémité mobile [10].

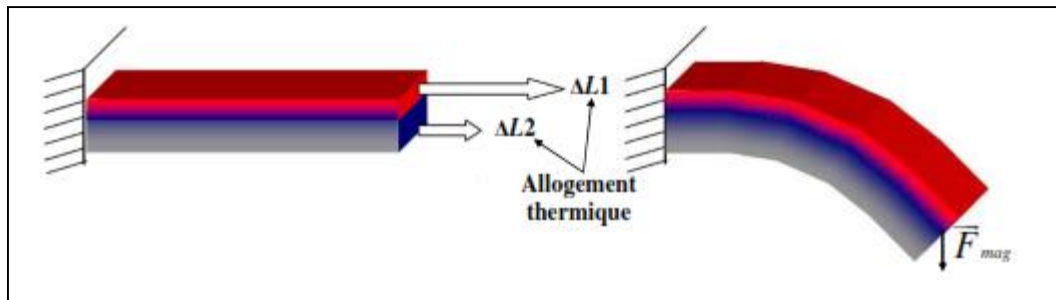


Figure II.12 : Schéma de principe (vue transversale) d'un bilame thermique.

La superposition des deux couches de matériaux avec deux coefficients thermiques différents permet d'avoir un déplacement vertical plus important par rapport à la dilatation obtenue pour une seule couche d'un seul matériau.

En revanche, le deuxième principe d'actionnement thermique utilise un seul matériau, mais avec des différences de géométrie dans un même niveau structurel pour engendrer des déplacements comme ceux illustrés par la Figure II.13, [3]. Avec ce deuxième type de structure, on obtient un déplacement parallèle au plan du substrat (latéral). La différence de taille entre les deux armatures de l'actionneur provoque une différence de densité de courant à l'intérieur des deux armatures lors du passage d'un courant. Cette différence de densité de courant provoque un allongement différent pour les deux bras ce qui entraîne un fléchissement de la structure dans le même plan des bras (sens indiqué par la flèche dans la Figure.13.c).

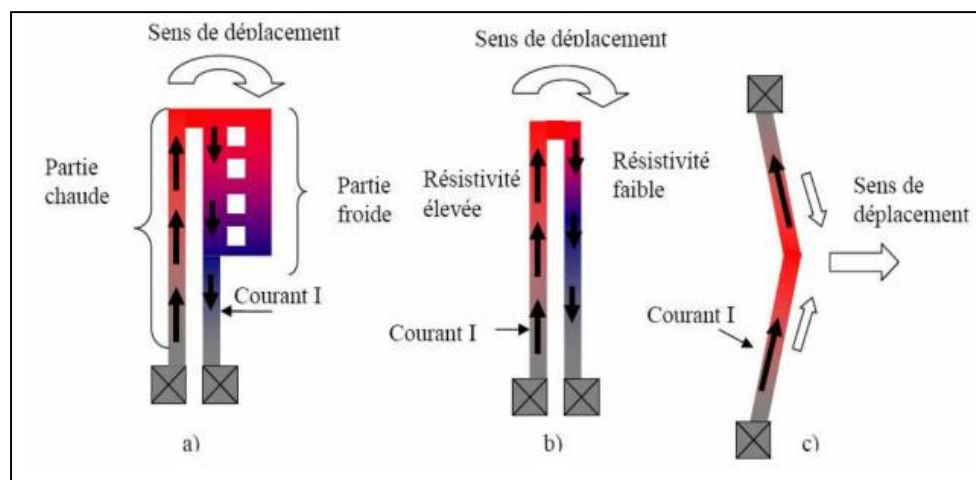


Figure II .13 : Schéma de fonctionnement de différents actionneurs thermiques dans le plan [3]

b- Exemples de composants

On cite quelques exemples de structures réalisées mettant en œuvre ce type d'actionnement.

✗ Déplacement hors plan

La figure II.14 présente un exemple d'une structure utilisant une poutre mono-encastree bilame en forme de U à activation hybride. La poutre cantilever est composée de deux couches l'une en oxyde de silicium et l'autre en siliciure de tantale (TaSi). Les contraintes résiduelles de ces différentes couches, entraînent un flambement initial qui permet d'obtenir une bonne isolation. Comme le coefficient de dilatation thermique du siliciure de tantale est plus grand que celui de l'oxyde de silicium et après le passage d'un courant à travers la structure provoquant ainsi une augmentation de température par effet Joule, un déplacement vertical aura lieu en direction de la ligne à commuter. Lorsque la température est suffisante, le contact électrique est réalisé.

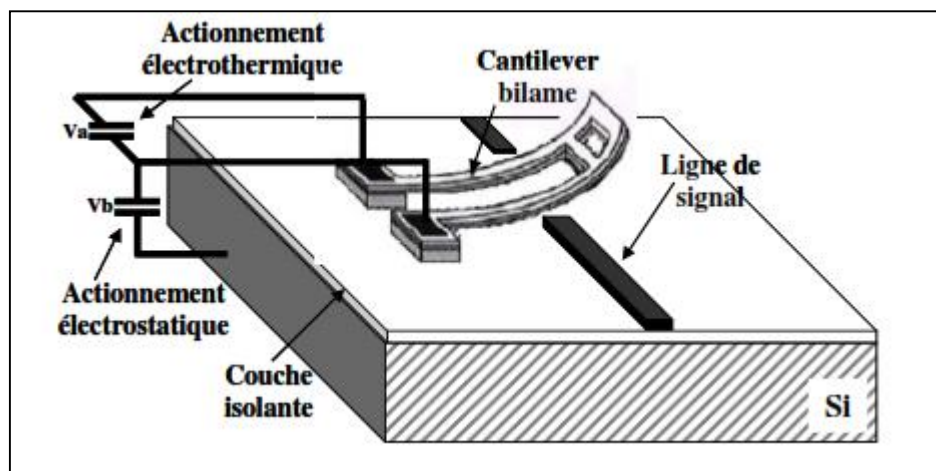


Figure. II.14 : Micro-relais à actionnement électrothermique et déplacement hors plan [7]

Dans cet exemple, l'actionnement thermique est complété par un actionnement électrostatique c'est-à-dire lorsque la poutre atteint sa position de contact, une différence de potentiel est appliquée entre le cantilever et une électrode d'actionnement déposée sur le substrat, pour la maintenir dans cette position. En ce moment, l'actionnement thermique peut être arrêté en coupant la propagation du courant dans la structure bilame. L'intérêt de ce type d'actionnement hybride est la limitation de la consommation importante de courant nécessaire pour garder la poutre dans son état bas.

✗ Déplacement Latéral

Dans la figure. II.15, nous présentons l'exemple d'une structure en poly-silicium en forme de chevron qui permet un déplacement mécanique dans le plan. Cette géométrie permet d'augmenter la déformation de façon proportionnelle à l'angle formé par les bras. Lorsqu'un courant électrique passe à travers la structure, une augmentation de température induit une expansion thermique du matériau. Cette expansion entraîne une élongation des bras

provoquant un déplacement latéral jusqu'à ce que le contact avec la ligne à commuter se produise.

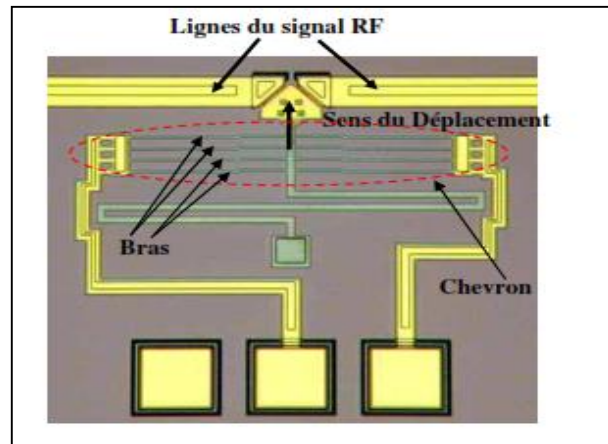


Figure. II.15: Micro-relais à actionnement électrothermique et déplacement dans le plan [14]

L'actionnement thermique dans ce micro-relais est assuré par une combinaison de quatre bras en chevron reliés entre eux comme le montre la figure. II.17, l'association de ces bras n'augmente pas le déplacement due à l'échauffement, mais augmente significativement la force de contact, ce qui implique un meilleur contact qui est dans ce cas de type ohmique, cette amélioration de la résistance de contact se traduisant par la réduction des pertes d'insertion. En revanche, les performances ce type de relais sont limitées par le flambement de la structure lorsque celui-ci opère aux hautes températures [14].

II.2.3. Comparaison entre les différents modes d'actionnement

D'après ce que nous avons vu précédemment, nous sommes capables de choisir un mode d'actionnement qui s'adapte mieux à nos exigences. En effet, nous pouvons tirer les remarques suivantes [1] :

- L'actionnement thermique est basé en principe sur la différence de dilatation des matériaux du composant. Il utilise le courant pour échauffer les électrodes d'actionnement, ce qui implique une forte consommation. D'autre part, le temps d'activation des structures électrothermique est relativement plus élevé que celui des autres modes (de 10 à 100 fois plus lent qu'un actionneur électrostatique par exemple).
- Il en est de même pour un dispositif à actionnement électromagnétique, qui nécessite des champs magnétiques importants, donc une forte consommation de courant. La solution proposée pour limiter cette consommation, consiste à intégrer un aimant permanent dans la structure, ce qui reste toujours trop encombrant. D'autre part, le dépôt d'aimants en couches minces pourrait apporter une autre

solution, cependant le procédé de réalisation paraît encore difficile à mettre en œuvre.

- Pour l'actionnement piézoélectrique, malgré l'importance des amplitudes des forces développées, la faible interférence avec d'autres composants électroniques, et le temps d'activation généralement court, ce mode nécessite l'intégration de matériaux piézoélectriques qui présentent encore aujourd'hui des pertes diélectriques importantes aux fréquences microondes et nécessite des procédés de dépôts qui ne sont pas forcément compatibles avec les procédés standards.

Le Tableau. II.1 ci-dessous présente un comparatif entre ces différents modes d'actionnement en montrant pour chacun d'eux leurs points forts et leurs points faibles.

Mécanismes d'activation et caractéristiques						
Mécanismes d'activation	Tension d'activation(V)	Courant (mA)	Puissance (mW)	Encombrement	Temps de commutation (μ S)	Force de contact (μ N)
Electrostatique	20-80	0	0	Faible	1-200	50-1000
Thermique	3-5	5-100	0-200	Grand	300-10000	500-4000
Magnétostatique	3-5	20-150	0-100	Moyen	300-1000	50-200
Piézoélectrique	3-20	0	0	Moyen	50-500	50-200

Tableau. II.1 : Tableau comparant les différentes caractéristiques des modes d'actionnement [29]

II.3. Exemples modèles de microsystèmes MEMS RF

II.3.1 Introduction

L'acronyme « MEMS RF » est un terme commun pour différents types de dispositifs fabriqués par des techniques de micro-usinage. Parmi des exemples de ces dispositifs, nous pouvons citer les capacités variables, les commutateurs, les interrupteurs, les filtres électromécaniques et les filtres à ondes acoustiques. Les dispositifs MEMS RF sont appliqués majoritairement dans le domaine de télécommunication. Ils font partie des téléphones mobiles, des radars, des satellites, de la radio militaire, etc. En comparaison, avec des dispositifs RF traditionnels, les MEMS RF offrent des avantages apportés par leurs tailles. Ils

sont plus petits, ils consomment moins, et ils sont moins chers. Le marché des MEMS RF a le potentiel de devenir le plus grand marché du domaine des composants MEMS.

II.3.2 Les Micro commutateurs MEMS RF

Parmi les différents composants MEMS RF, nous nous sommes intéressés plus particulièrement dans notre étude aux micro-commutateurs et à leur fonction de commutation. Dans ce paragraphe, nous allons présenter le principe de leur fonctionnement, ainsi que quelques aspects de conception importants tels que les types de contact et les différentes configurations qui peuvent être utilisées [30].

II.3.2.1. Définition et principes de fonctionnement d'un commutateur

Un commutateur présente généralement deux états (Figure II.16): un état passant assurant la transmission du signal et un état bloqué où le signal ne peut pas traverser le composant. Le commutateur idéal se présenterait alors comme un court-circuit (impédance nulle) à l'état passant et comme un circuit ouvert (impédance infinie) à l'état bloqué.

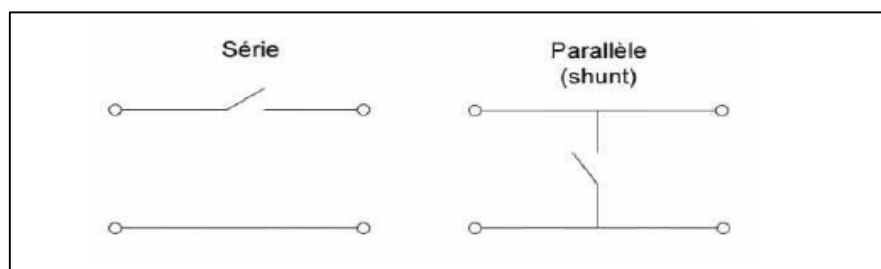


Figure II.16 Commutateur en configuration séries ou parallèle.

Les micro-commutateurs MEMS RF présentent des géométries de conception très variées et sont généralement constitués d'une structure mobile ou d'une poutre mécaniquement déformable, (Figure II.17) [6].

En réalité, un commutateur micro-électromécanique peut être, soit considéré comme une capacité variable commutable entre deux états, il sera alors appelé commutateur capacitif, soit une capacité à l'état haut et une résistance à l'état bas, il sera ainsi appelé commutateur ohmique.

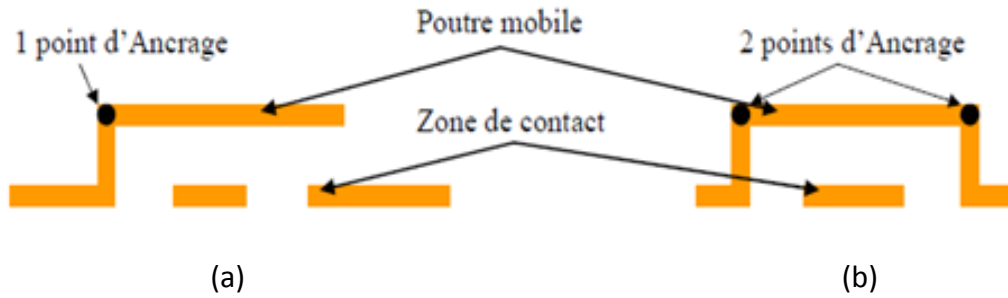


Figure II.17 : Les différentes configurations des micro-commutateurs MEMS RF [6].

(a) Poutre mono-encastree de type cantilever

(b) Poutre bi-encastree de type pont

Ces composants peuvent être implémentés en configuration série ou en configuration parallèle sur une ligne de transmission et cela selon les performances recherchées (Figure II.18), [6].

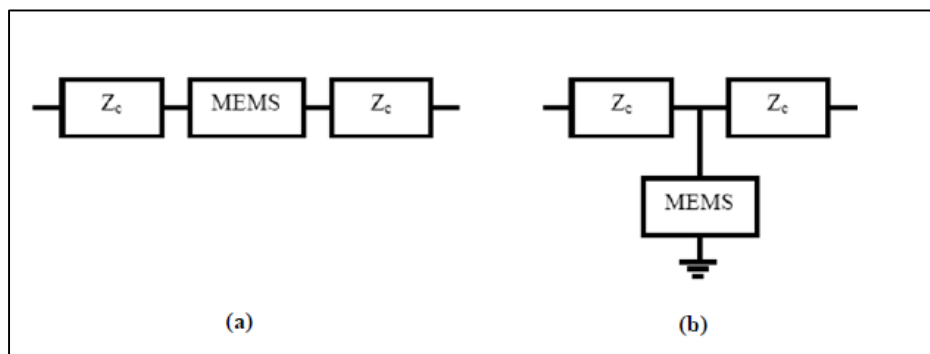


Figure II.18 Implémentation d'un commutateur MEMS RF

(a) en série

(b) en parallèle.

Afin de permettre à la poutre mobile d'entrer mécaniquement en contact avec son électrode fixe, il est nécessaire de lui appliquer une force d'actionnement. Dans le cas d'un actionneur électrostatique, une électrode spécifique appelée l'électrode d'actionnement est nécessaire pour générer cette force. Généralement, elle est séparée de la zone de contact, mais pour des raisons de simplicité et de réduction de taille, la zone de contact et l'électrode d'actionnement peuvent être parfois confondues dans le cas d'un commutateur capacitif. Ainsi, plusieurs configurations peuvent être possibles suivant le type de contact et la zone de contact (Figure II.19). Le temps de commutation, représentant la durée nécessaire pour passer de l'état bloqué à l'état passant (et inversement), est également un paramètre important pour le fonctionnement d'un commutateur. Ce temps de commutation dépend

fortement de la conception mécanique du composant, mais aussi de la façon dont il va être actionné[16].

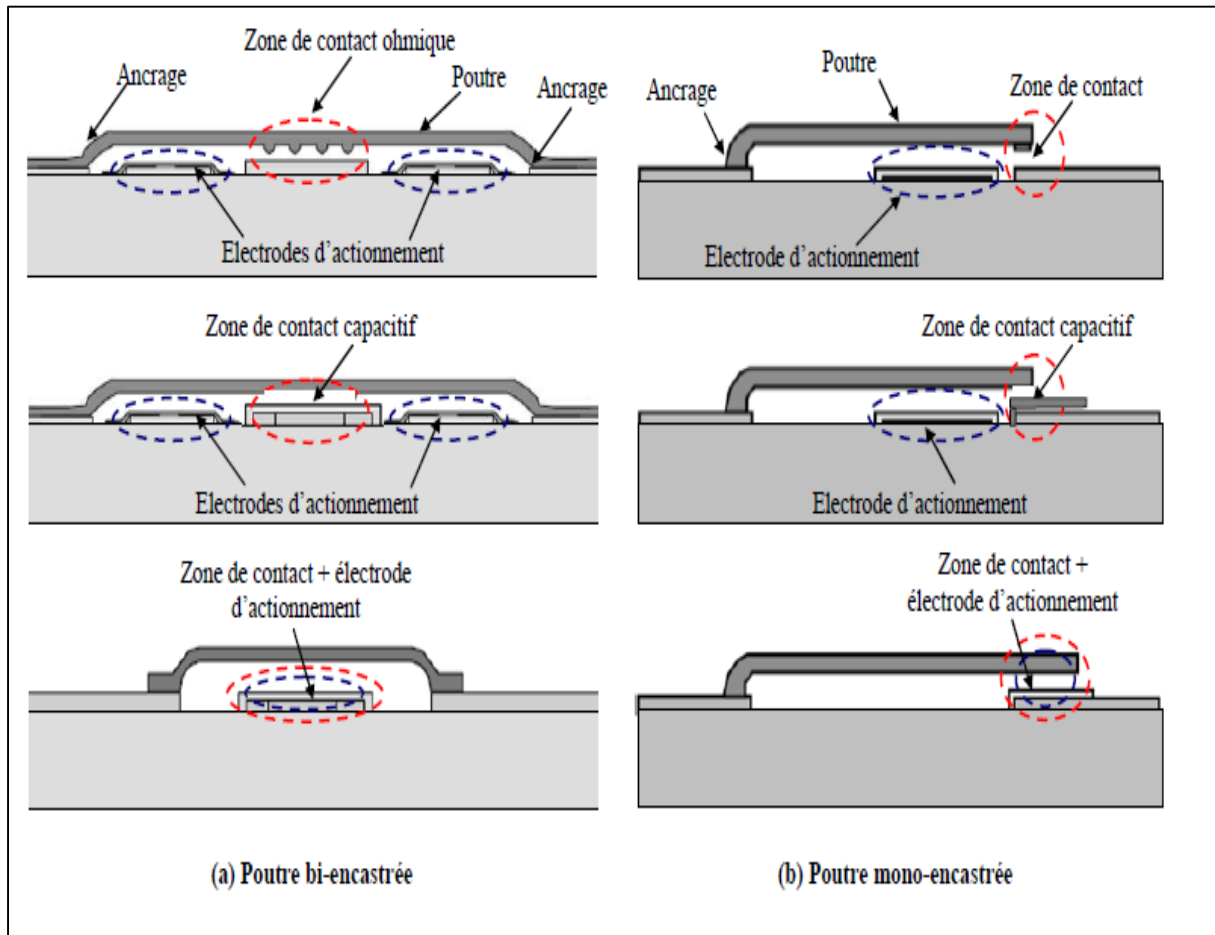


Figure II.19 : Quelques configurations possibles de micro-commutateur MEMS RF suivant le type de contact et la zone de contact recherché [16].

Ainsi, les principes d'actionnement peut être de plusieurs natures : magnétique, thermique, électrothermique, piézoélectrique ou encore électrostatique. En s'appuyant sur ces données, il existe un très grand nombre de configurations possibles afin de concevoir un micro-commutateur à base des MEMS RF. Des compromis doivent par conséquent être faits en fonction des performances et ou de l'application visée [12].

II.3.2.2. Les type de contact des micro-commutateurs MEMS RF

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe deux types de contact possibles pour un micro-commutateur MEMS RF: un contact ohmique entre deux électrodes métalliques, ou un contact capacitif [8] :

II.3.2.2.1. Micro-commutateurs à contact ohmique

Les micro-commutateurs ohmiques sont les interrupteurs qui utilisent un contact résistif (contact métal-métal) entre la ligne métallique qui transmet le signal et une partie métallique composant l'électrode mobile du micro-commutateur.

La valeur de la résistance présentée au signal RF lors de sa propagation dépend de la qualité du contact et du matériau de contact utilisé. Aux vues des faibles dimensions des zones de contact, lorsque le MEMS est à l'état passant, ce type de contact peut être généralement modélisé par une simple résistance localisée (Figure II.20 (b)). Alors que lorsqu'il est ouvert, une capacité $C_{off} = \frac{C_u}{2}$ (Figure II.20 (a)), dont la valeur dépendra de la surface de contact de la distance entre les deux électrodes et de la géométrie de la zone de contact.

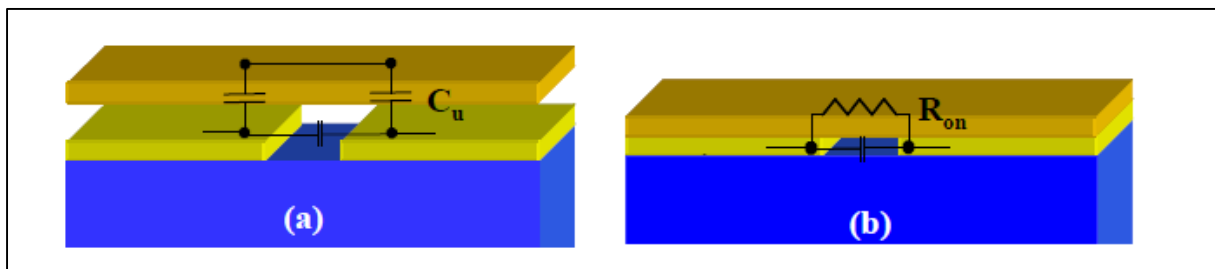


Figure II.20 : Représentation schématique d'un contact ohmique

(a) à l'état inactif

(b) à l'état actif

L'utilisation des commutateurs à contact ohmique est généralement privilégiée pour les applications basses fréquences. En effet, pour des basses fréquences car les performances en isolation se dégradent généralement rapidement lorsque la fréquence augmente en fonction de la géométrie du composant. De nombreuses compagnies et de laboratoires de recherche universitaires (Radant MEMS, Teravicta, Omron, Rockwell, CEA-LETI, ST Microelectronics, Motorola,) ont développé des micro-commutateurs à contacts ohmiques. Deux types de structures sont plus couramment développés (Figure II.21), [31].

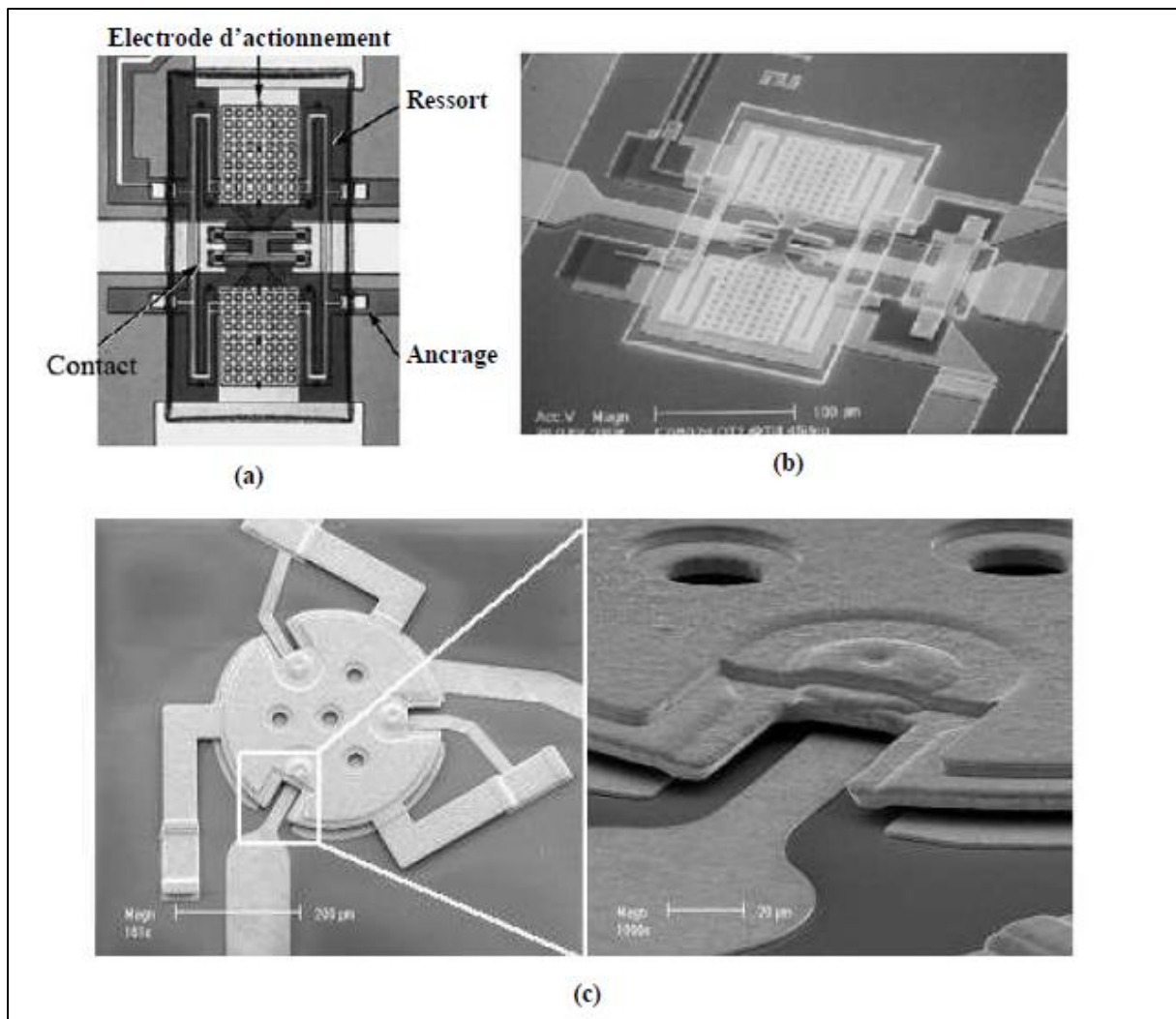


Figure II.21 Micro-commutateur de Rockwell [31]

(a) structure,

(b) photographie

(c) micro-commutateur de TERAVIDTA.

II.3.2.2.2. Les Micro-commutateurs à contact capacitif

Les commutateurs MEMS RF à contact capacitif fonctionnent sur les mêmes principes que leurs homologues ohmiques. A la différence qu'une fine couche de diélectrique isolante généralement recouvre l'électrode inférieure, pour former une capacité C_{on} avec l'électrode mobile du composant lorsque le contact est fermé. La transmission du signal se fait à travers de cette capacité. La taille de la zone de contact est en principe beaucoup plus importante dans le cas d'un micro-commutateur capacitif, afin d'atteindre une impédance suffisamment faible lorsque le contact est fermé, Figure II.22.

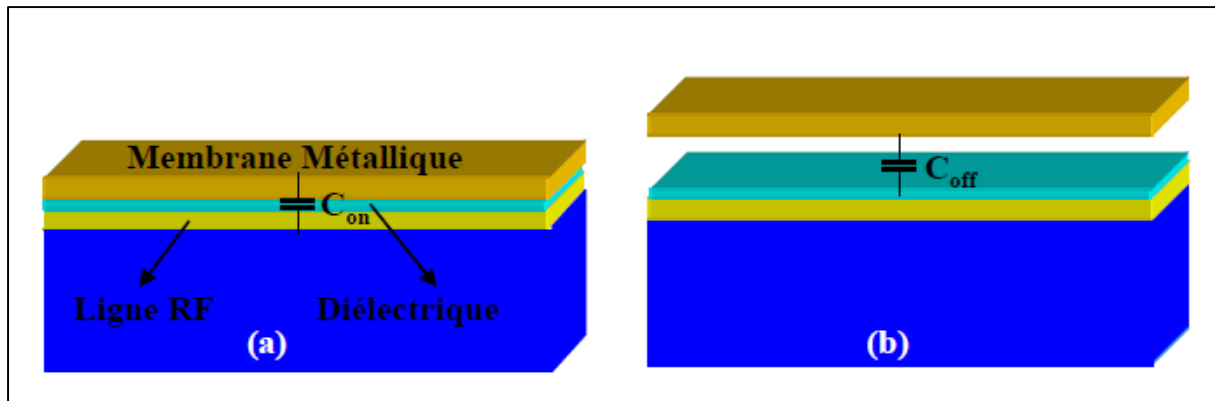


Figure II.22 : Représentation schématique d'un contact capacitif

- (a) à l'état actif
 (b) à l'état inactif

Les commutateurs capacitifs MEMS RF ont généralement des performances intéressantes pour des fréquences supérieures à 10 GHz puisque certains composants ont démontré de forte isolation supérieure à 40 dB pour des fréquences pouvant aller jusqu'à 120 GHz. Leurs pertes d'insertion sont généralement faibles avec des valeurs comprises entre 0,05 et 0,2 dB pour des fréquences pouvant aller de 10 GHz à 60 GHz [3].

Les micro-commutateurs capacitifs peuvent présenter une isolation aux hautes fréquences supérieures aux micro-commutateurs ohmiques, mais ils ont des performances en basse fréquence limitées par le contact capacitif. Il est en effet difficile d'obtenir des valeurs de capacités très élevées à l'état bloqué et faibles à l'état passant, nécessaires à une isolation élevée aux basses fréquences. Généralement, de part leurs performances, ces commutateurs peuvent convenir à des applications militaires hautes fréquences (radars, antennes...) ou des applications spatiales. En outre, il est également possible d'associer des commutateurs ohmiques et capacitifs dans le même dispositif, peut être une solution qui permet d'obtenir des composants opérant sur une gamme de fréquence étendue pouvant aller jusqu'à 120 GHz suivant la topologie étudiée [6]

II.3.2.3. Les type de configurations de micro-commutateurs MEMS RF

Nous allons présenter dans ce paragraphe les topologies qui permettent de réaliser soit un commutateur série ou bien un commutateur parallèle [32].

II.3.2.3.1. Configuration série

Dans le cas de la modélisation d'un dispositif série, les éléments localisés sont placés en série avec les lignes du signal RF, comme le montre les schémas dans la Figure II.23 dans laquelle nous distinguons les deux cas correspondant à un contact ohmique ou capacitif:

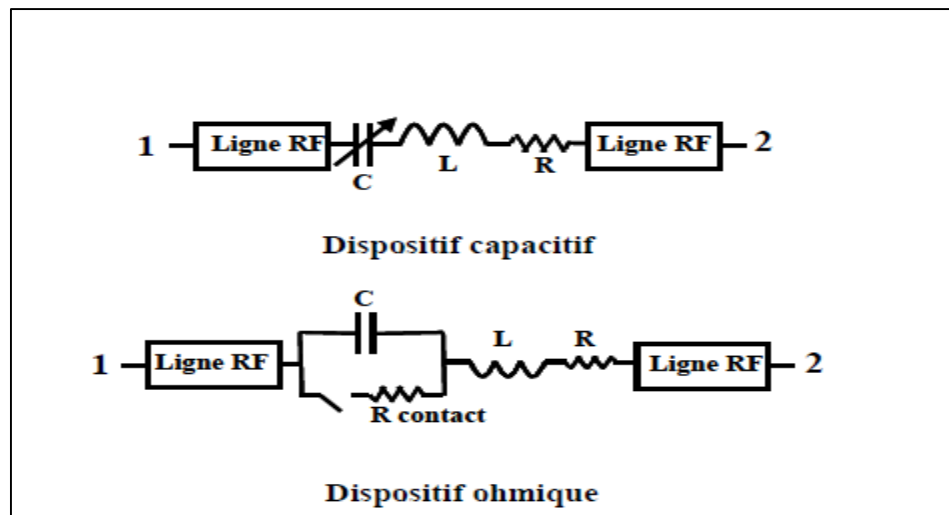


Figure II.23 Schémas électriques équivalents de dispositifs série [32].

Dans une configuration série, la micro-poutre fait partie intégrante de la ligne de transmission. La Figure II.24 présente le cas d'un cantilever à contact capacitif implanté dans une configuration série spécifiquement conçu pour supporter des signaux de forte puissance.

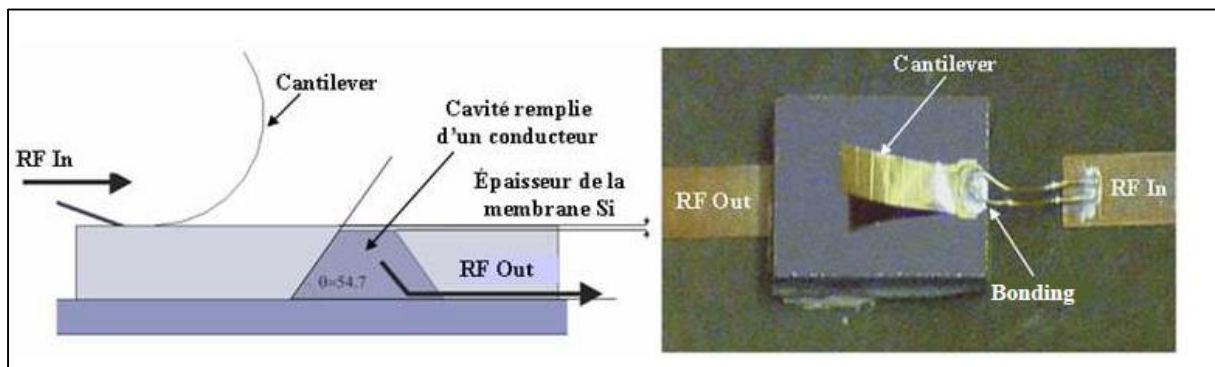


Figure II.24 Schéma et photographie d'un commutateur série MEMS RF à contact capacitif [32].

II.3.2.3.2. Configuration parallèle

La figure II.25 (a) présente le schéma équivalent d'un micro-commutateur parallèle et la (b) présente un exemple de commutateur implémenté dans une configuration parallèle à partir de composant de type cantilever à contact ohmique, développé en technologie[16].

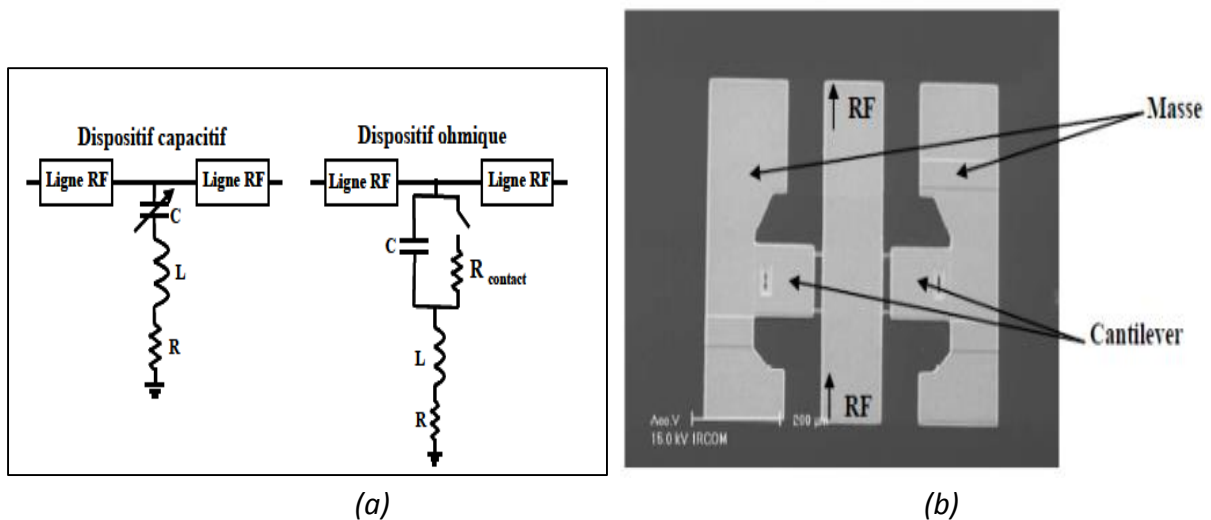


Figure II.25 Commutateur MEMS RF de type parallèle

- a) Schémas équivalents de dispositif
 b) Exemple de structure [30].

II.3.3. Microsystèmes MEMS RF comme Filtre

II.3.3.1. Intérêt des filtres

Le développement important des systèmes de télécommunications multistandards ou multinormes conduit à la conception de nouveaux systèmes à caractéristiques commutables. Ce caractère agile se traduit par la nécessité de concevoir, entre autres, des filtres sélectifs à fréquence centrale commutable qui présentent des performances hyperfréquences améliorées tant ils sont critiques pour la qualité globale du système dans lequel ils sont insérés.

Les filtres sont donc des dispositifs qui sélectionnent, éliminent ou séparent des signaux dans des bandes de fréquences prédéfinies. Ils constituent donc des éléments fondamentaux dans de nombreux systèmes de transmission en radiofréquence et en hyperfréquence (radio-mobiles, satellites, radars...). Le rôle du filtre dans les systèmes est fondamental puisqu'il s'agit de débarrasser d'un signal utile toutes les composantes parasites, qui peuvent provenir de sources diverses. Elles peuvent être externe, c'est-à-dire apporté par le canal, ou interne, apporté par les éléments passifs et actifs constitutifs du système lui-même. Selon l'architecture retenue pour le système, l'apparition de fréquences parasites est aussi un problème. Les signaux émis et reçus sont parasités les uns par rapport aux autres, et de ce fait, une bonne séparation de ces signaux est nécessaire. Dans ces cas, on fait appel à des techniques de filtrage [33].

La réalisation de nouvelles architectures avec des filtres bandes étroites accordables en fréquence permettraient alors le relâchement de contraintes fortes sur les performances

des circuits constituant les émetteurs/récepteurs. En réception, un filtre d'antenne agile permettra de filtrer des signaux bloquants dans la bande de réception dès l'antenne, diminuant ainsi les contraintes de réalisation de convertisseurs analogique / numérique en fréquence intermédiaire.

En émission, un filtre accordable peut résoudre les problèmes liés au bruit des mélangeurs dans les structures, bruit que l'on retrouve à l'antenne en terme d'émission parasite.

II.3.3.2 Exemples de structures filtrantes accordables

Les premières structures accordables sont basées sur des topologies classiques de filtres à lignes couplées ou à stubs quart d'onde selon les largeurs de bandes requises. Les capacités micro-usinées sont intégrées dans les résonateurs pour démontrer l'accordabilité en fréquence du dispositif. L'accord sera obtenu en modifiant la longueur électrique du résonateur comme le montre la Figure (II.26.b). Il est possible aussi d'associer plusieurs composants reconfigurables (discrets ou distribués) pour former un élément résonant accordable (Figure II.26.a).

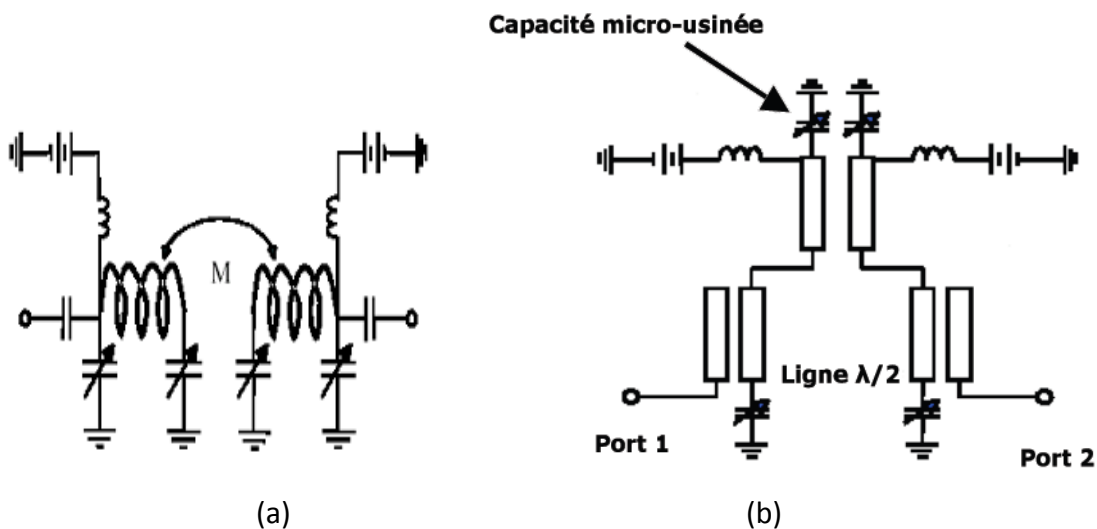


Figure II.26: Topologies de filtres accordables en 2 pôles:

(a) à élément localisé ;

(b) à résonateur

Une topologie de filtre en technologie coplanaire a été rendu accordable en ajoutant quatre capacités variables micromécaniques (Figure II.27). Leur présence doit modifier la fréquence de résonance des résonateurs sans changer de façon trop importante le couplage inter résonateurs qui dérèglerait le filtre. Les quatre cantilevers MEMS sont ancrés dans le conducteur central. Les électrodes supérieures sont au-dessus des plans de masse. Grâce à l'application d'une tension de polarisation entre le conducteur central et le plan de masse,

les électrodes supérieures se déplacent vers le bas modifiant légèrement la valeur de capacité présente entre elles et le plan de masse. Cette différence de capacité change la fréquence de résonance des résonateurs en les rendant accordables [33].

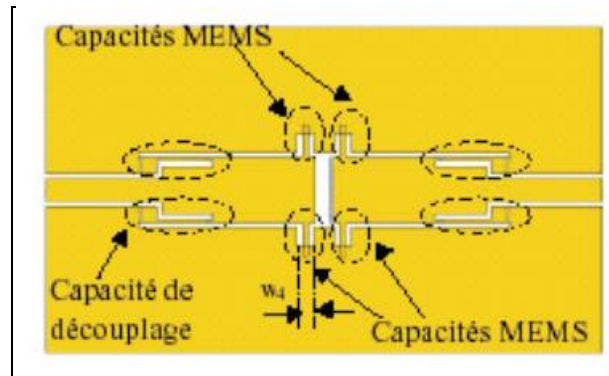


Figure II.27: Schéma du filtre accordable MEMS [18].

Un autre exemple de filtre LC à élément localisé accordable relativement simple, ultra compact et très large bande est illustré en Figure II.28. Il met en évidence les potentialités des commutateurs MEMS à la réalisation de composants passifs variables de type inductances et capacités et leur intégration dans des filtres compacts et reconfigurables [32].

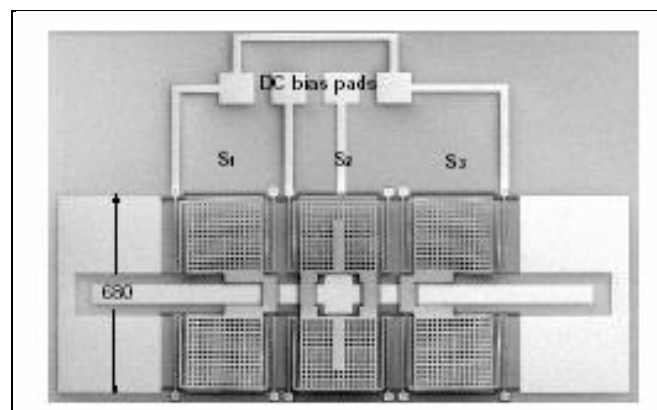


Figure II.28: Filtre LC passe-bande [32].

Une autre topologie présente un filtre accordable qui associe des inductances fixes en spirale, obtenues par micro usinage de volume, et des capacités variables MEMS, Figure II.29, [13].

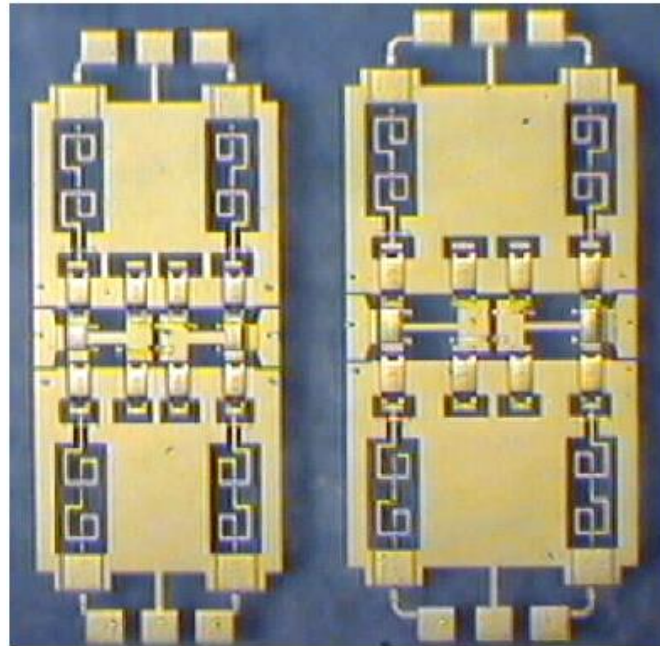


Figure II.29 : Photographies des filtres accordables avec inductances fixes [13]

II.4. Conclusion

Parmi les différents composants MEMS, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux MEMS RF. Dans ce chapitre, nous avons présenté leurs modes d'actionnement, ainsi que quelques aspects de conception importants tels que les types de contact et les configurations qui peuvent être utilisées. Il existe deux types de contact possibles : un contact ohmique entre deux électrodes métalliques, ou un contact capacitif dans lequel au moins une des deux électrodes de contact est recouverte par un film mince isolant ceci suivant deux topologies série ou parallèle car les principes d'actionnement peut être de plusieurs natures : magnétique, thermique, électrothermique, piézoélectrique ou encore électrostatique. En s'appuyant sur ces données, il existe un très grand nombre de configurations possibles afin de concevoir un micro-commutateur à base des MEMS RF. Des compromis doivent par conséquent être faits en fonction des performances et ou de l'application visée.

Enfin dans ce chapitre, nous avons présenté aussi un rapide état de l'art des topologies de filtres hyperfréquences pouvant être rendu accordables grâce à la technologie MEMS au moyen de membranes flexibles obtenues par les technologies de micro usinage.

Deux exemples de micro-commutateurs et filtre seront pris pour étude et modélisation dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Etude et Modélisation de

Microsystèmes à base

MEMS RF

III.1. Introduction

Les microsystèmes ont la particularité de pouvoir mesurer, contrôler et agir à une échelle micrométrique. Ils associent sur un même substrat des capteurs et des actionneurs avec des circuits analogiques et numériques d'interface. A l'heure actuelle, alors que les technologies pour fabriquer des systèmes MEMS sont bien maîtrisées [32], leurs comportements mécaniques et physiques restent en développement pour la recherche ainsi, une modélisation complète du système suivant l'application est nécessaire pour affiner la mise au point de chaque modèle MEMS proposé.

Les microsystèmes se développent également dans le domaine des télécommunications. Les nouvelles générations d'appareils de télécom contiennent des nouveaux dispositifs tels que les commutateurs, les capacités variables, les résonateurs et les filtres MEMS [31]. Grâce au couplage des propriétés mécaniques et électriques, les MEMS sont devenus intéressants en termes de rapidité de temps de réponse (cas des commutateurs), de linéarité, de pertes d'insertion. Tous ces avantages ont poussé les chercheurs à développer des nouvelles architectures de communication pour introduire ces technologies dans les systèmes de communication.

III.2. Les différents microsystèmes MEMS RF

Les composants MEMS sont très intéressants pour les circuits Radio Fréquence (RF), particulièrement pour les réseaux de communication sans fil, pour leurs avantages en terme [34]:

- De miniaturisation des circuits et systèmes (aboutissant à un faible coût)
- D'intégrations, motivées par les mêmes techniques que celles des circuits intégrés
- D'économie de puissance (circuits fonctionnant à de faibles puissances)
- De grandes performances (fort coefficient de qualité Q pour les composants passifs)
- De nouvelles fonctions, notamment l'utilisation de composants capacités variables ou inductances variables MEMS dans des filtres variables.

Les téléphones portables utilisent des fonctions multiples et offrent un accès à différents prestataires de services émettant dans différentes bandes RF/micro-onde. Les différentes fréquences associées à ces prestations nécessiteront l'utilisation de fonctions internes large bande au niveau des antennes de réception. La tendance actuelle est de travailler sur des signaux large-bande en compactant au maximum les fonctions nécessaires à leur traitement. C'est pourquoi, certains circuits sont réalisés à partir de composants variables, tels que les filtres accordables, les déphaseurs, les oscillateurs de contrôle... Dans ces différents cas, la variation est assurée par des capacités variables.

Les MEMS RF, grâce à leurs performances accrues, ont ouvert de nombreuses perspectives pour les applications radiofréquences. Parmi ces différents composants nous pouvons citer [35] :

a. Les résonateurs micromécaniques : Certains composants utilisent les fréquences de résonance mécanique de micro-poutres pour former des résonateurs. Selon les dimensions de ces micro-poutres, ils peuvent présenter des fréquences de résonance de quelques kilohertz à plusieurs centaines de mégahertz. Couplés de manière capacitive, ils peuvent être utilisés afin de réaliser des filtres ou des oscillateurs avec une forte pureté spectrale.

b. Les Inductances micro-usinées : Ces structures ne sont généralement pas mobiles ou déformables mais ils utilisent les procédés de fabrication issus de la microélectronique pour isoler les lignes de métallisations du substrat et réduire l'influence sur les pertes des composants.

c. Les Dispositifs FBAR (Film Bulk Acoustic Resonators) : Ces résonateurs mécaniques utilisent les propriétés de vibrations mécaniques de couches minces piézoélectriques placées en sandwich entre deux électrodes d'excitation.

d. Les Micro-commutateurs : Ils sont basés sur le contrôle du mouvement d'une partie mécanique miniaturisée quand ils sont actionnés, commutant ainsi entre deux positions. Ils présentent des performances accrues pour des opérations des basses fréquences pouvant aller jusqu'à 120 GHz dans certains cas.

e. Les Capacités variables: Elles fonctionnent sur le même principe que les commutateurs. Les capacités variables MEMS sont souvent utilisées afin d'assurer une accordabilité continue. Ainsi, de nombreux sous systèmes accordables ont été développés à partir de commutateurs ou de capacités variables MEMS : des résonateurs à fort coefficient de qualité (pour réaliser des oscillateurs à faible bruit de phase), des antennes, des filtres planaires, des adaptateurs d'impédance reconfigurables, ainsi que d'autres composants pour des applications plus spécifiques.

III.3. Modélisation électromécaniques d'un Micro-commutateur MEMS RF

III.3.1. Introduction

L'utilisation des micros technologies pour la fabrication des composants hyperfréquences passifs monolithiques constitue un attrait principal. Néanmoins, les interactions entre les comportements mécanique et électrique doivent être modélisées, en particulier en présence de signaux hyperfréquences de forte puissance. De nombreux

modèles ont été développés pour permettre de décrire simultanément les comportements mécanique et électrique [8].

III.3.2. Modèle de mouvement de la poutre d'un Micro-commutateur

Le mouvement de la poutre d'un micro-commutateur peut être considéré comme un système masse-ressort amorti à une dimension excité par une force électrostatique (Figure II.5). Ce système permet de décrire l'équation mécanique du mouvement de la poutre suivante [36] :

$$m \frac{dz^2}{dt^2} + \xi \frac{dz}{dt} + kz = F_t \quad (\text{III.1})$$

Où m est la masse, k constante de raideur du ressort, z est la variation de l'épaisseur, ξ est le coefficient d'amortissement du système et F_t est la somme des forces extérieures qui permettent d'actionner la poutre. La solution de cette équation donne la déflexion de la poutre et l'étude du mouvement de micro-commutateur se fait suivant sa forme rectangulaire (ou carré) ou circulaire (pont).

La pièce mobile d'un commutateur électrostatique MEMS RF, pour les deux cas de pont ou d'une poutre rectangulaire, peut être décrite sous une forme compacte à l'aide d'un modèle de capacité formé de plaques parallèles traditionnelles (Figure III.1). Dans ce cas, les ancrages de la membrane sont assimilés par un ressort linéaire k , fixé à l'électrode supérieure du condensateur, qui est libre pour se déplacer le long de la direction Z .

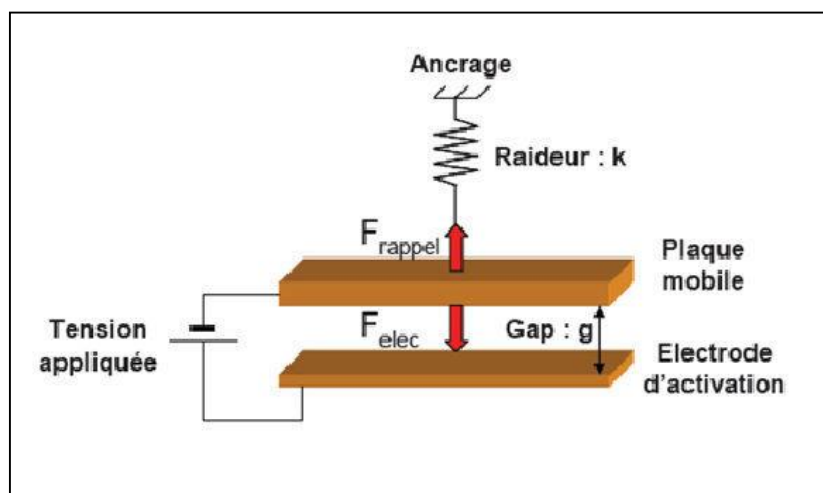


Figure III.1 Modélisation du principe de fonctionnement électromécanique d'un MEMS-RF à actionnement électrostatique.

L'actionnement électrostatique est la technique d'actionnement la plus utilisée dans le domaine des MEMS RF, puisqu'elle est très simple à mettre en œuvre et consomme peu de courant. Seulement deux électrodes métalliques sont nécessaires, l'une est fixe et l'autre est constituée par la partie déformable. En appliquant une différence de potentiel entre les deux électrodes, il se crée une force électrostatique F_{elec} attirant les électrodes l'une vers l'autre. F_{elec} , explicitée par l'équation (III.2), représente la force attractive appliquée aux deux électrodes métalliques et engendrée par la tension V_A . Cette force permet de déformer le composant et donc de modifier ses propriétés électriques. Elle peut être calculée par l'équation suivante [26], [5] :

$$F_{elec} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V_A^2}{g^2} \quad (III.2)$$

Où :

V_A : tension appliquée,
 g : distance instantanée entre les électrodes,
 S : aire de l'électrode mobile,
 ϵ_0 : permittivité du vide,
 E : champ électrique.

Une force de rappel F_{rappel} apparait et a une direction opposée à la force électrostatique et elle est proportionnelle à la distance entre les électrodes comme suit:

$$F_{rappel} = K(g_0 - g) \quad (III.3)$$

Où g_0 est la distance initiale entre les électrodes et K est la constante de rappel calculée à l'extrémité libre de la poutre et a pour expression (III.4), [14]:

$$K = \frac{2 \check{Y} W w t^3}{8 \ell^3 W - 6 \ell^2 w^2 + w^4} \quad (III.4)$$

Où \check{Y} est le module d'Young, ℓ la longueur de la membrane, t son épaisseur ; w sa largeur et W est la longueur de recouvrement poutre – conducteur, Figure III.2.

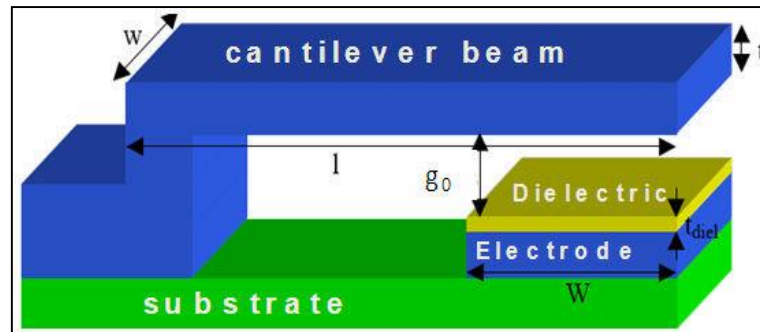


Figure III. 2: La géométrie du commutateur MEMS [5]

Une autre force doit être prise en considération, c'est la force de contact, elle peut être vue de deux manières différentes : En effet, elle représente à la fois la force appliquée par la micro-poutre sur l'électrode de contact RF sous l'action de la force électrostatique, ou celle exercée par l'électrode de contact sur la micro-poutre par pression exercée par la poutre ou la membrane du commutateur (Figure III.3). Cette force va permettre d'assurer alors un bon contact lors du OFF de fonctionnement du micro-commutateur.

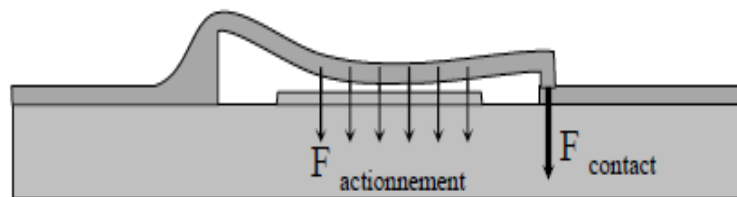


Figure III.3 Présence de force de contact

Comme indiquée en équation (III.2), la force électrostatique F_{elec} dépend de la tension appliquée V_A . En fait, lorsque l'on accroît progressivement la tension appliquée, la force électrostatique croît et la micro-poutre se fléchit graduellement ainsi la distance g séparant les deux électrodes diminue. Puisque l'électrode s'abaisse, la force de rappel s'accroît aussi, mais moins rapidement que la force d'actionnement. Et lorsque la force de rappel ne suffit plus à contenir l'attraction électrostatique, l'équilibre se rompt entraînant la chute brusque de la micro-poutre sur le substrat.

A partir de l'expression des deux forces (III.2) et (III.3), la tension de seuil pour laquelle la membrane est brutalement attirée vers l'électrode peut être déterminée. Pour cela, il faut considérer l'équilibre de la structure c'est-à-dire lorsque les deux forces se compensent. D'où :

$$F_{elec} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V_A^2}{g^2} = K(g_0 - g) \quad (III.5)$$

On peut déduire alors la tension minimale nécessaire pour établir un contact physique entre les électrodes (l'électrode mobile se pose sur l'électrode fixe), appelée V_p exprimé par:

$$V_p = \sqrt{\frac{2K g^2 (g_0 - g)}{\epsilon_0 S}} \quad (\text{III.6})$$

On montre en plusieurs références [37], [38], [5] et [26] que la micro-poutre se déplace de plus d'un tiers de la distance la séparant de l'électrode d'actionnement (Figure III.4) soit les $2/3$ de g_0 . Ainsi, la tension V_p devienne:

$$V_p = \sqrt{\frac{8 K g_0^3}{27 \epsilon_0 S}} \quad (\text{III.7})$$

On remarque que la tension V_p dépend de trois paramètres définis par la géométrie et par des matériaux constituant le commutateur MEMS RF, nous pouvons agir alors sur :

- Choix des matériaux de l'élément mobile afin d'obtenir une constante de ressort (rigidité) K faible.
- La distance g_0 entre les électrodes.
- La surface de l'électrode

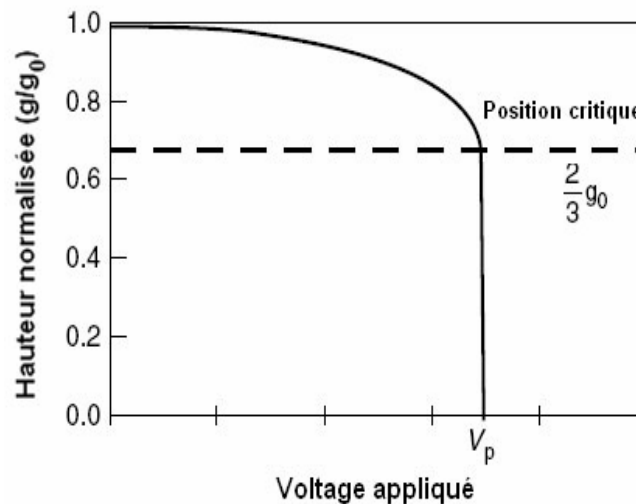


Figure III.4 Relation entre la tension appliquée et la distance entre les électrodes [26]

Electriquement, Le modèle équivalent d'un composant à poutre suspendue actionnée électro statiquement est composé d'une capacité, d'une self inductance et d'une résistance qui sont en série ou en parallèle suivant la structure considérée. Un commutateur micro-électromécanique peut être, soit considéré comme une capacité variable commutable entre deux états, il sera alors appelé commutateur capacitif, soit une capacité à l'état haut et une résistance à l'état bas, il sera ainsi appelé commutateur ohmique [26].

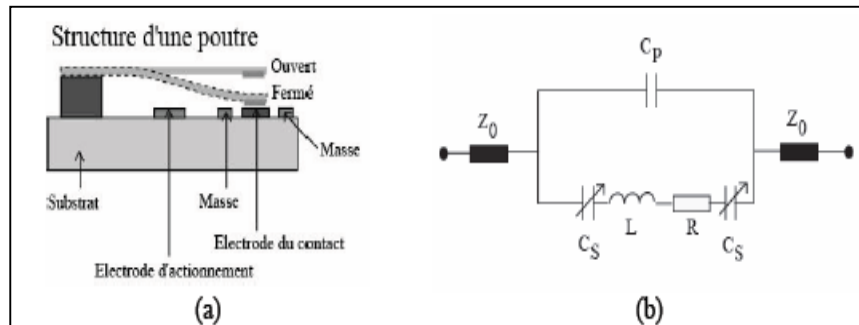


Figure III.5: Commutateur de type série

(a) schéma de principe

(b) circuit équivalent

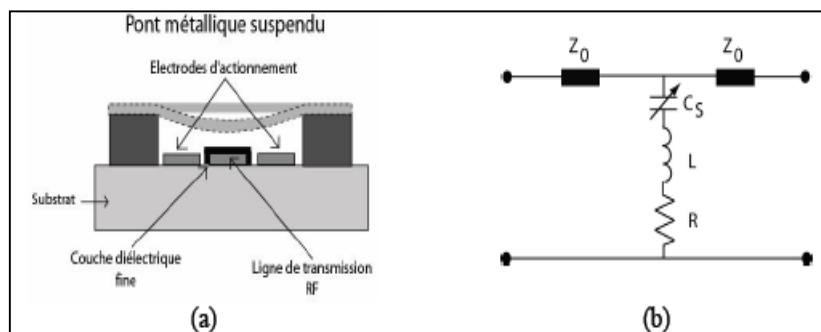


Figure III.6 : Commutateur de type parallèle

(a) schéma de principe

(b) circuit équivalent

III.3.3 Topologies des différentes formes de commutateur MEMS RF

Les micro-commutateurs MEMS RF présentent des géométries de conception très variées et sont généralement constitués d'une structure mobile ou d'une poutre mécaniquement déformable. La simulation de l'aspect de déflexion de la poutre n'est qu'une variation de l'effet capacitif. Parmi les capacités variables MEMS, on distingue les capacités à plaque carré et circulaire.

Les commutateurs sont utilisés pour créer un court-circuit ou bien un circuit-ouvert dans une ligne de transmission. Ils se présentent généralement sous la forme d'une poutre ou d'un pont mobile qui à l'état initial ont une position haute, puis sous l'action d'une force

physique (électrostatique, électrothermique, magnétostatiques ou piézoélectrique) les parties mobiles s'actionnent, c'est-à-dire qu'elles se mettront en état bas due à l'attraction issue de cette force.

Les deux types de contact : ohmique-série et capacitif-parallèle ont été mentionné au chapitre précédent. A l'état haut, leur capacité est de l'ordre de quelques farads, alors qu'en état bas, le commutateur ohmique définit un court-circuit par un contact résistif. D'où l'importance d'avoir une valeur de la résistance de contact faible afin de minimiser les pertes d'insertion. Le commutateur capacitif à l'état bas court-circuite le signal RF grâce à la forte valeur de la capacité. Ces structures peuvent être conçues pour fonctionner à des fréquences allant de quelques GHz à des fréquences supérieures à 200GHz [39]. Il y a plusieurs considérations impliquées dans la conception d'une structure microsysteme MEMS tels que le développement de modèles précis pour prévoir le comportement mécanique et électrique et ainsi prédéfinir le domaine de fonctionnement comme la bande de fréquences et ainsi spécifier l'application du microsysteme.

Un des modèles les plus utilisés est la géométrie carrée comme indique la Figure III.7 ou en géométries circulaires illustré en Figure III.8. Cette dernière figure représente le un quart de symétrie. Une fois que ces géométries sont choisies, les propriétés matérielles sont imposées par la nature des matières employées dans le modèle du commutateur [40].

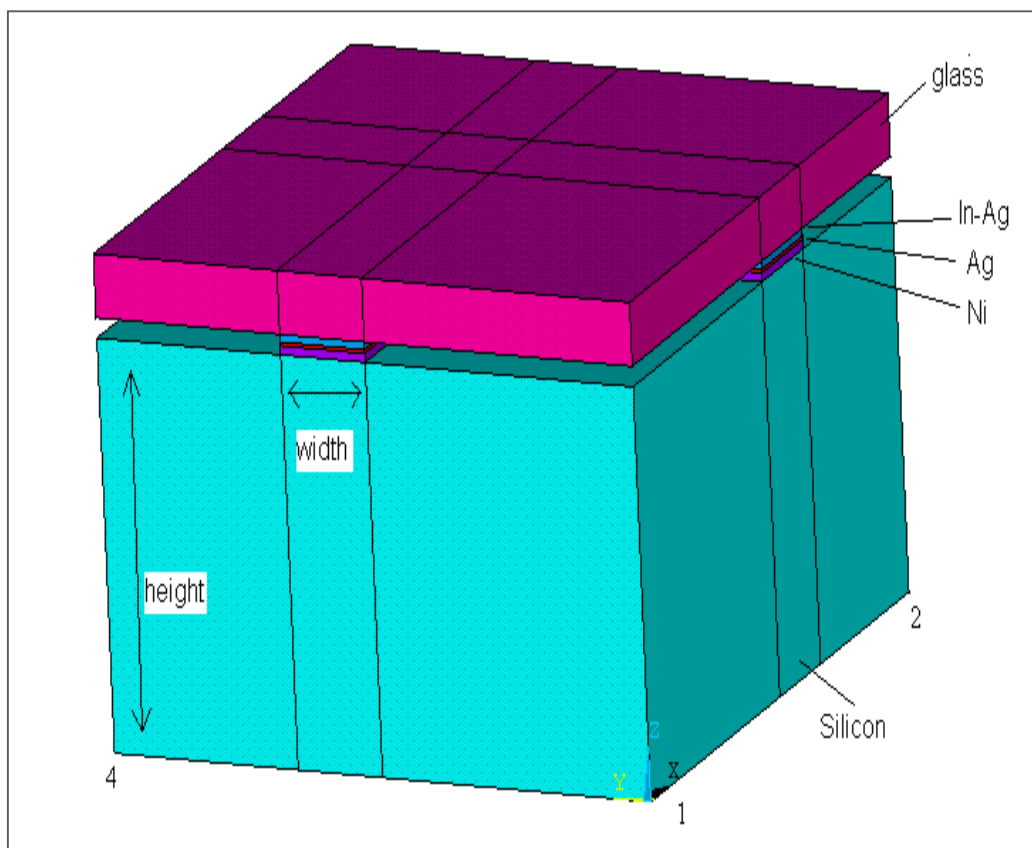


Figure III.7: Plaques de contact à géométries carré

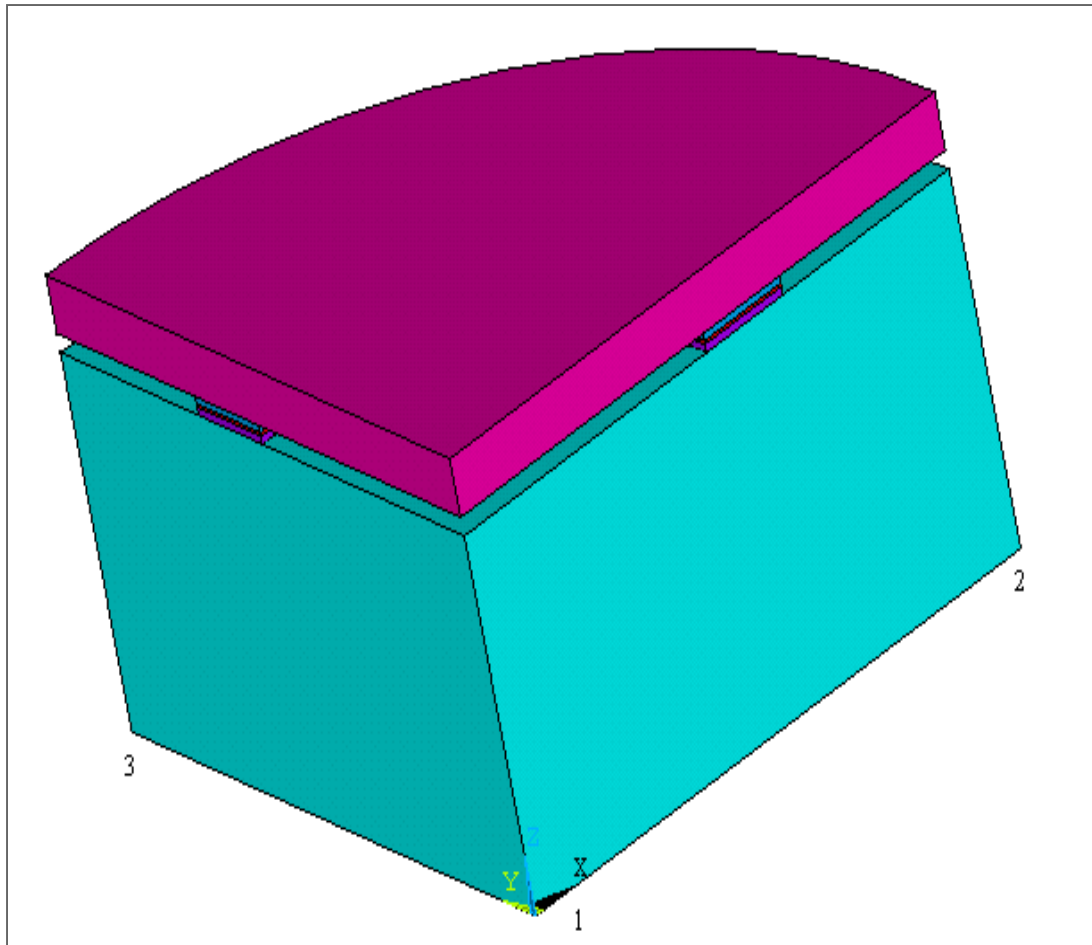


Figure III.8: Plaques de contact à géométries circulaire

III.3.4 Simulation MATLAB du commutateur MEMS RF

III.3.4.1 Modèles proposés

Un commutateur de MEMS est fait d'une membrane conductrice suspendue contrainte à un appui fixe (substrat). La membrane peut être une poutre mono-encastree ou une poutre bi-encastree selon le type et le nombre de points d'attache. Dans des commutateurs électrostatiques de MEMS, la membrane suspendue est assez flexible pour être considérée élastique mobile. Le commutateur de MEMS utilisé comme modèle est illustré en Figure III.9. Ses caractéristiques sont données dans le tableau III.1 [40].

La constante de Raideur	K	$1,1034.E.W \left(\frac{T}{L}\right)^3$
La Permittivité d'air	ϵ_0	$8,85.10^{-12}$ f/m
La surface de l'électrode d'actionnement	S	1200 μm
Langueur de commutateur a géométrie carrée	L	200 μm
Largueur de commutateur a géométrie carrée	W	60 μm
L'épaisseur de commutateur a géométrie carrée	t	3 μm
Le Gap (le déplacement de la poutre)	g_0	2.5 μm
Longueur d'électrode d'actionnement	W	100 μm
Le module d'Young	$\check{Y}(\text{si}_3\text{n}_4)$	38.10^{10} Pa

Tableau III.1 : Les caractéristiques du modèle commutateur [40].

La spécification des structures géométriques est une étape importante pour la conception technologique (notamment pour le dimensionnement de la structure), et leur modélisation permet de prédire le comportement électrique des microstructures (plaques de contact du commutateur) en cas de variation de fréquences.

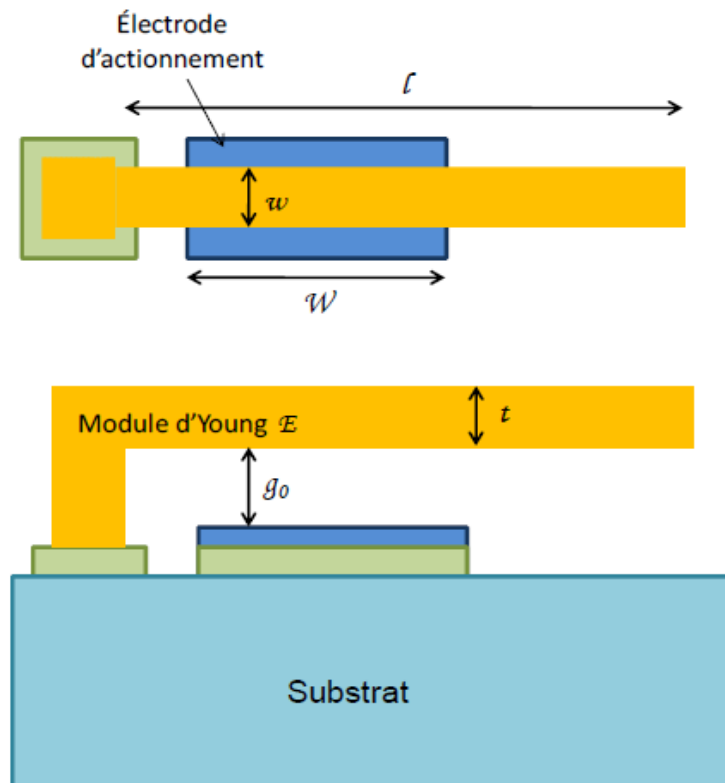


Figure III.9: Structure schématique d'un micro-commutateur poutre [40].

Comme modèles de simulation, on prendra deux cas de structures : carré et circulaire et on déduit l'effet de la déflexion en fonction de la variation de l'épaisseur du commutateur lui-même. Puis étudier la variation de la force électrostatique en fonction de la tension de commande et du gap (indiquant le déplacement de la poutre).

III.3.4.2 Résultats obtenus

La déflexion maximum et minimum est prévu pour les deux configurations carrées et circulaires. L'épaisseur de l'électrode est changée pour examiner leur effet sur la variation de la déflexion. Les simulations sont faites par le logiciel Matlab. En général, le taux de déflexion a été défini par les équations théoriques développées par Timoshenko [41], donné par la relation pour la structure carrée :

$$\text{def}_{\max} = 0.0137 \frac{q a^4}{\check{y} h^3} \quad (\text{III.8})$$

Où q est la pression appliquée, a est la longueur et h l'épaisseur de la plaque, et \check{y} est le module de Young. Le 0,0137 est une constante prise dans le cas d'une géométrie carrée

unitaire. De même, les équations développées par Timoshenko [41] pour la structure circulaire sont exprimées comme suit :

$$\text{def}_{\max} = \frac{q a^4}{64 D} \quad (\text{III.9})$$

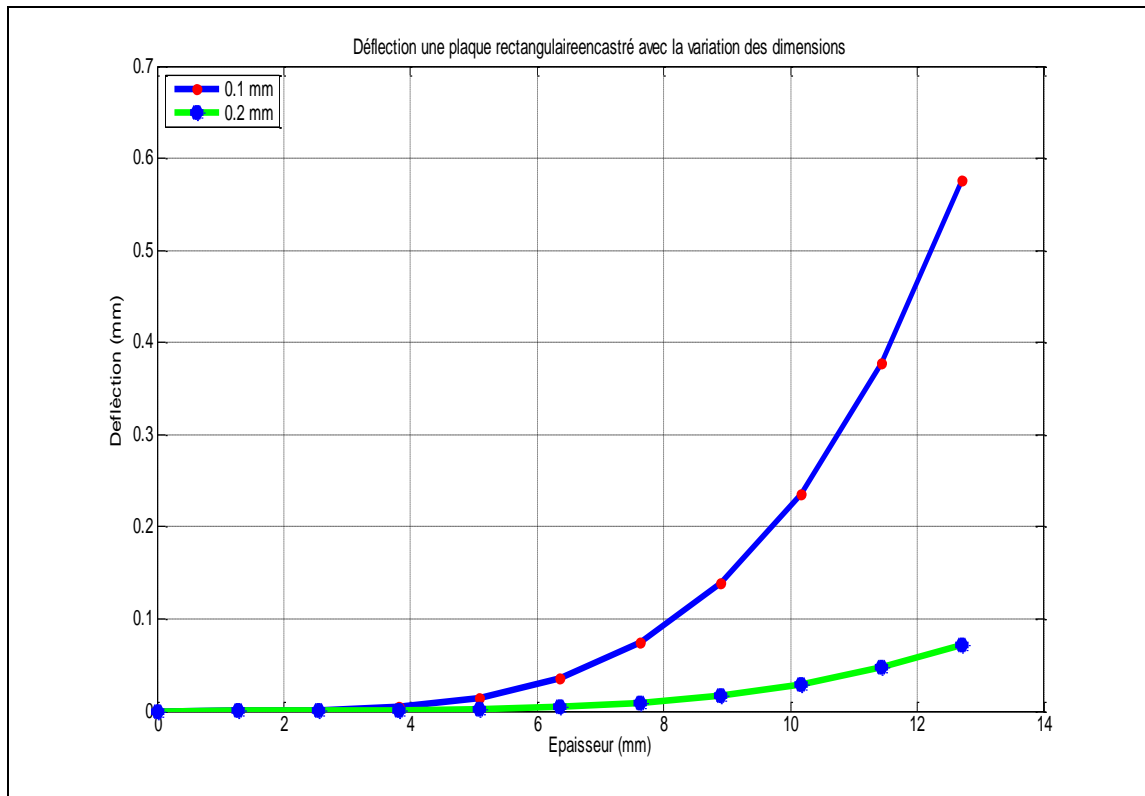
Où le facteur D est exprimée par :

$$D = \frac{\check{Y} h^3}{12 (1-\nu^2)} \quad (\text{III.10})$$

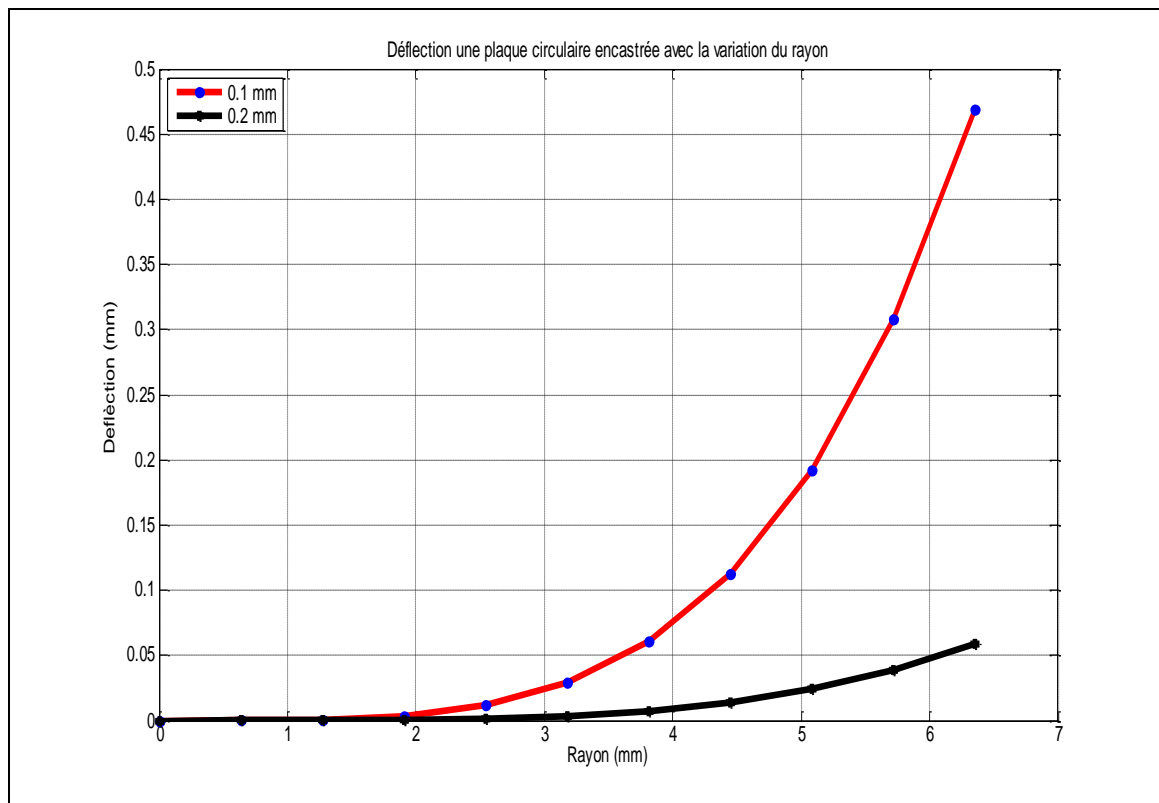
Où a est le rayon, D la rigidité, \check{Y} le module de Young, h l'épaisseur et ν module de Poisson. Les équations (III.8) et (III.9) sont utilisées pour calculer la déflexion de la plaque de contact du commutateur RF pour les géométries carré et circulaire. Les résultats de simulation sont présentés en Figures III.10 (a) et (b).

Ces figures montrent que pour le cas contact carré, la déflexion varie de 0 à 12,7 mm mais pour le contact à géométrie circulaire, elle varie de 0 à 6,35 mm, ceci pour deux épaisseurs d'électrodes de poutre ($t=0,1$ mm et 0,2 mm, Figure III.9). On en déduit alors que les commutateurs à géométries carrés en conception des MEMS RF sont mieux que ceux circulaires car on a une meilleure déflexion de poutres.

L'actionnement électrostatique prend naissance entre les deux électrodes métalliques portées à un potentiel différent. On a vu que la force est générée par le potentiel V_A (tension de commande). La variation de la force électrostatique en fonction de cette tension est présentée en figure III.11, et sa variation en fonction de la distance g (distance instantanée entre les électrodes) est présentée en figure III.12.



(a)



(b)

Figure III.10: Simulations de la variation de la déflexion de la plaque pour deux épaisseurs 0,1 et 0,2 mm pour deux cas :(a) Plaque de contact carrée (b) Plaque de contact circulaire.

On remarque que dès l'on accroît progressivement la tension appliquée (peu à peu : petits tensions), la force électrostatique croît et ainsi il y aura un actionnement de la poutre et donc un mouvement du micro-commutateur RF. D'autre part lorsque la micro-poutre se fléchit graduellement (variation de la distance g séparant les deux électrodes), La force électrostatique diminue, il y aura alors un contact entre les deux électrodes (poutres mobile et fixe). Donc, l'augmentation de la tension de commande va entrainer la force de la mise en marche du commutateur ainsi avoir la rapidité du ON/OFF et la diminution de la distance g_0 séparant les électrodes du Switch en marche.

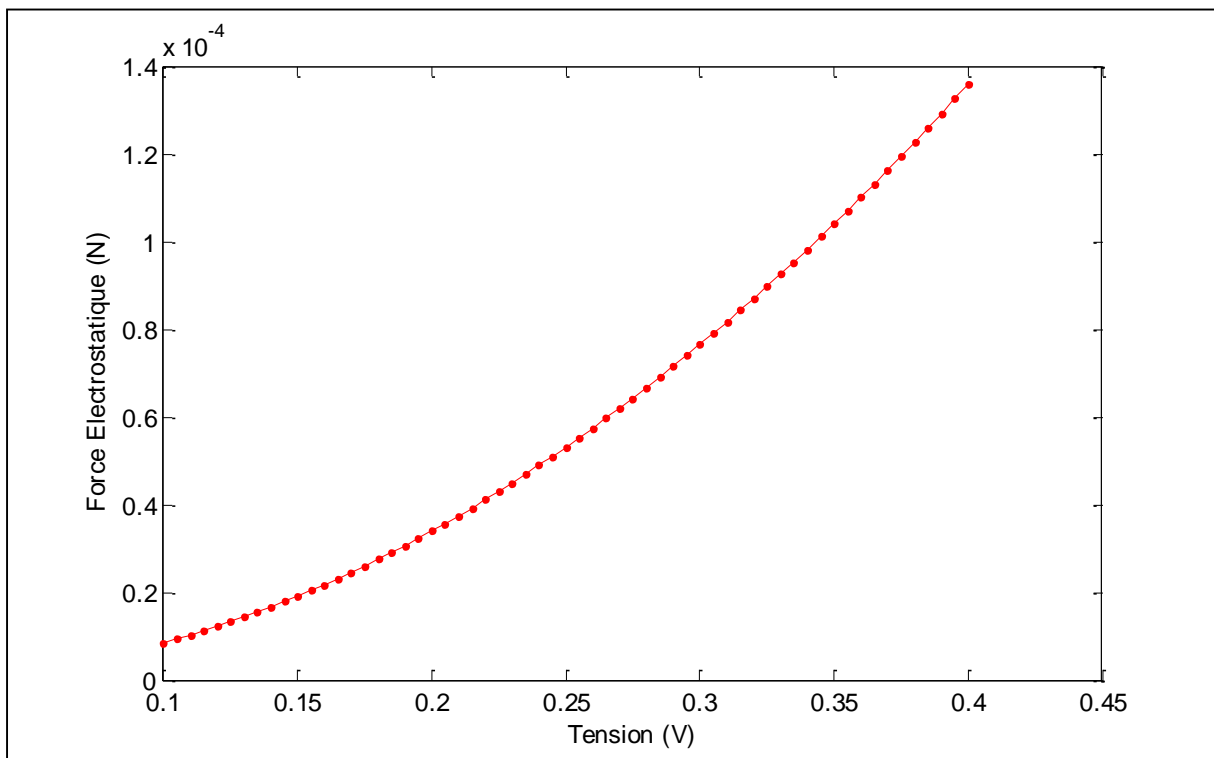


Figure III.11 : Variation de la force électrostatique en fonction de la tension de commande

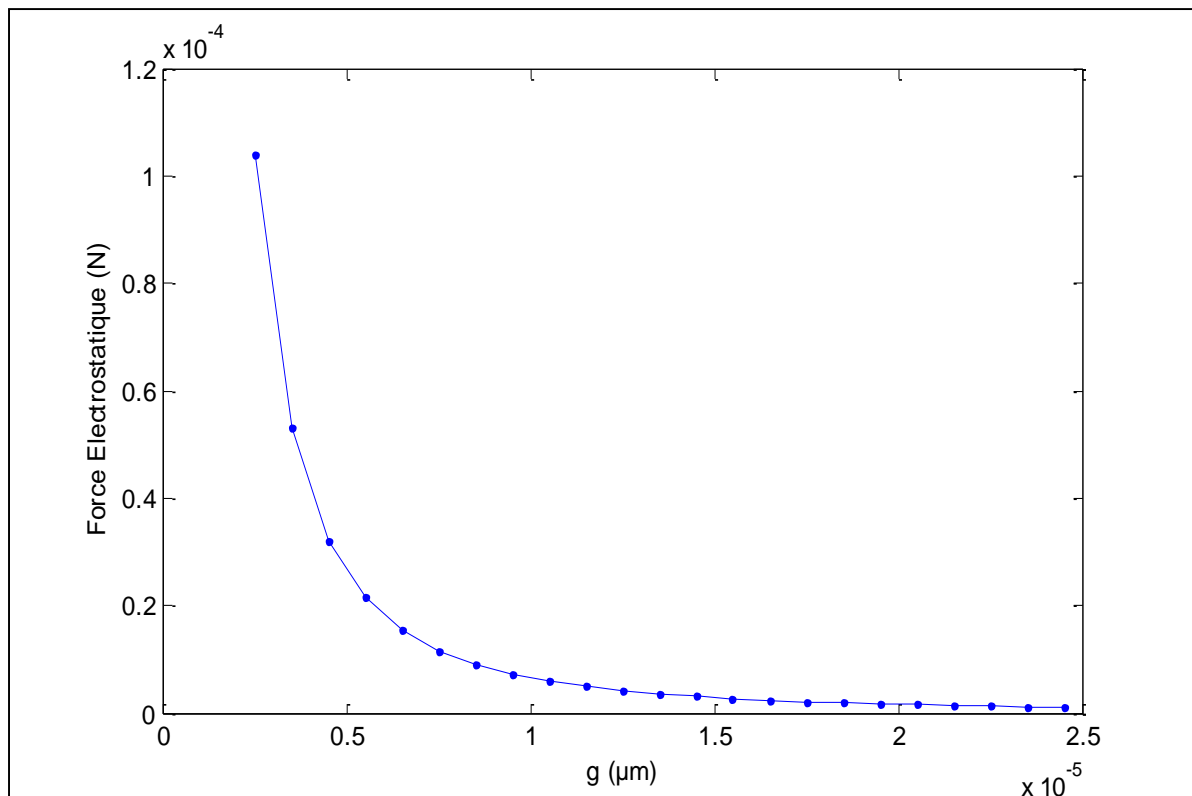


Figure III.12: Variation de la force électrostatique en fonction du déplacement en déflexion de la micro-poutre (g)

Le choix du modèle suivant sera un filtre MEMS réalisé à l'aide de capacités commutées à base de poutres unités. Le paragraphe suivant cite les importants paramètres qu'il faut spécifier avant de choisir ce modèle pour simulation.

III.4 Les Micro systèmes MEMS RF comme Filtre passe-bande

III.4.1 Paramètres importants des capacités variables MEMS

Nous allons présenter les paramètres importants qui définissent une capacité variable MEMS. On choisit une structure simple, constituée de deux électrodes parallèles (Figure III.13) pour présenter ces paramètres.

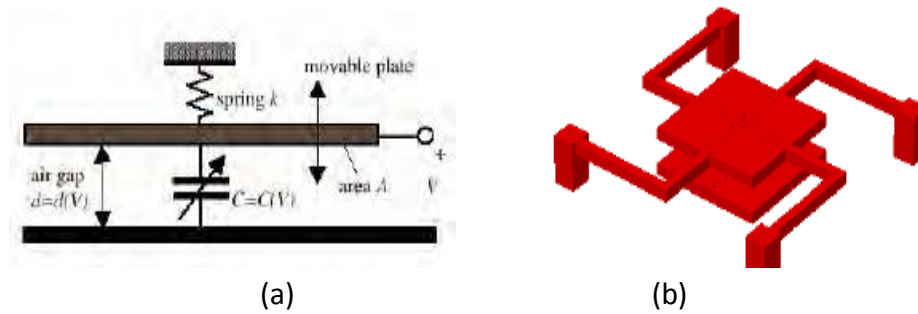


Figure III.13 Modèle schématique d'une capacité variable MEMS à électrodes parallèles, basé sur un actionnement électrostatique [42] :

(a) Vue en coupe,

(b) Vue 3D

III.4.1 .1 Capacité nominale

La Figure III.13 montre un modèle de capacité variable MEMS [36]. Ce modèle est constitué de deux électrodes parallèles ; une électrode fixe au substrat et une autre suspendue et mobile verticalement. La surface des électrodes est notée A , le gap initial est noté d et x est le déplacement vertical. En appliquant une tension DC entre les deux électrodes, l'espace entre les deux électrodes devient $d-x$. La capacité C_0 entre les deux électrodes est donnée par :

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (\text{III.11})$$

Avec ϵ_0 la permittivité du vide, A la surface de la capacité, ϵ_r la permittivité relative du diélectrique qui sépare les électrodes et d le gap entre les deux électrodes. Cette formule est reconnue comme valable pour des électrodes finies lorsque le gap d est très inférieure à la surface A . Généralement, pour des applications hautes fréquences, quelques GHz, des valeurs de capacités de l'ordre du picofarads sont souhaitées.

III.4.1.2 Tuning range

Le « Tuning range » ou variation de la capacité est un facteur important pour les capacités variables MEMS. Nous le définissons comme :

$$T_R = \frac{C_{Max} - C_{Min}}{C_{Min}} \quad (\text{III.12})$$

Ce paramètre dépend principalement de la variation de la capacité (variations du gap, de surface du diélectrique,) et du système d'actionnement : électrostatique, thermique ou piézoélectrique [43].

III.4.1.3 Facteur de qualité

Le facteur de qualité Q d'un composant est un paramètre important. En effet, il détermine les pertes d'un filtre variable ou encore le bruit d'un VCO, utilisant une capacité variable. Il définit le rapport entre l'énergie emmagasinée par le composant sur l'énergie perdue par ce dernier [43]:

$$Q = \frac{\text{Energie Totale par cycle}}{\text{Energie Perdue par cycle}} \quad (\text{III.13})$$

Ce paramètre dépendant de la résistance série R_s va donc définir les performances électriques de la capacité variable MEMS. Dans le cas d'une capacité variable, l'équation (III.13) devient:

Cas 1 : Circuit série : $Q = \frac{X}{R_s}$ (III.14)

Cas 2 : Circuit parallèle : $Q = \frac{R_p}{X}$ (III.15)

X est la réactance de la capacité à la résonance, R_s est la résistance série et R_p la résistance parallèle. La capacité variable peut se modéliser sous forme de circuit RLC série ou parallèle comme le montre la Figure III.14.

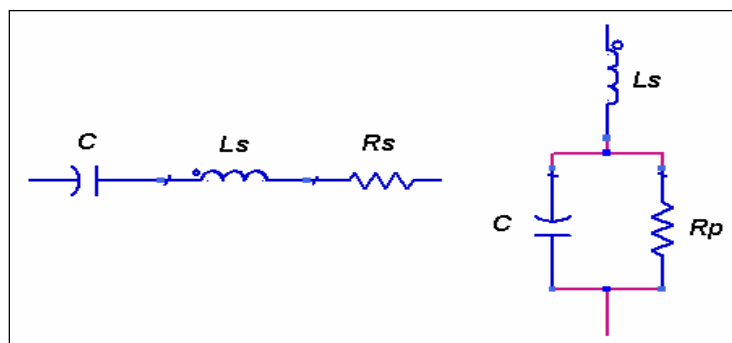


Figure III.14: Circuits équivalents : série et parallèle.

L'expression du facteur de qualité devient dans les 2 cas :

Circuit série : $Q = \frac{1}{\omega C R_s} = \frac{\omega L}{R_s}$ (III. 16)

Circuit Parallèle : $Q = \omega C R_p = \frac{R_p}{\omega L}$ (III. 17)

Pour obtenir un fort facteur de qualité, il est nécessaire de réduire au maximum les résistances séries et donc utiliser des bons matériaux conducteurs. Par contre, ces matériaux présentent souvent de mauvaises propriétés mécaniques. Généralement aussi, plus l'épaisseur du métal sera grand et la longueur des lignes de connexions courtes et plus le facteur de qualité sera élevé [17].

III.4.1.4 Fréquence de Self Résonance électrique FSR

Une capacité est toujours associée à une inductance. Cela engendre le phénomène de self-résonance. Il est mis en évidence en traçant l'impédance de la capacité en fonction de la fréquence. On exprime d'abord les expressions de l'impédance dans les deux cas série et parallèle comme suit [43]:

$$\text{Cas 1 : Circuit série: } Z = R_s + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (\text{III.18})$$

$$\text{Cas 2 : Circuit parallèle: } Z = \frac{1}{\omega^2 C^2 R_p} + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (\text{III.19})$$

La fréquence de self-résonance est définie par :

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (\text{III.20})$$

Le module de l'impédance est représenté en figure III.15 [6]. L'importance de l'inductance propre des connexions augmente avec la fréquence jusqu'à ce qu'elle entre en résonance avec la capacité. Au-delà de la fréquence de self-résonance FSR, la capacité se comporte comme une inductance.

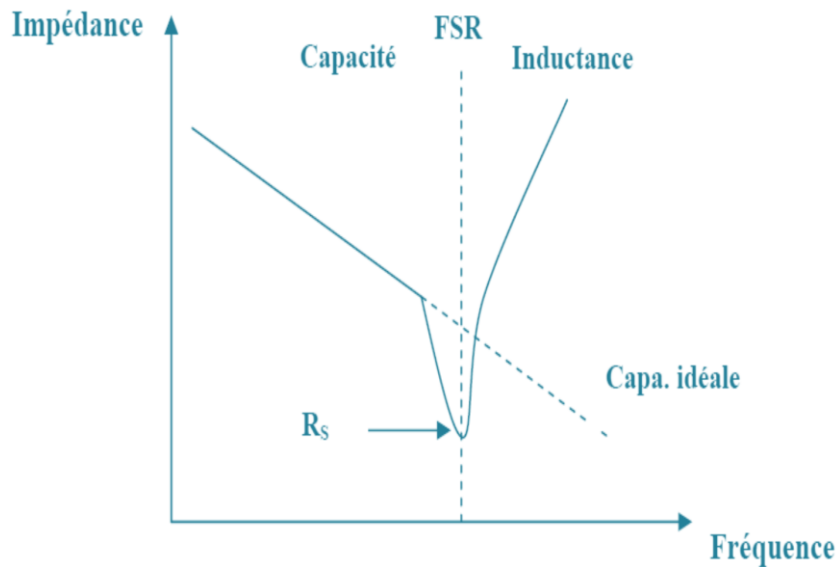


Figure III.15 : Module de l'impédance de la capacité en fonction de la fréquence [6].

De plus, la fréquence de résonance de la capacité détermine la gamme de fréquence dans laquelle la capacité peut être utilisée d'une manière effective. Il est donc intéressant d'obtenir la fréquence la plus élevée possible. En général, la plage d'utilisation en fréquence balayée est la moitié de la fréquence de self résonance.

III.4.1.5 La linéarité

La non-linéarité des systèmes est une donnée importante et exigeante pour les applications Radiofréquence. Il est souhaitable d'obtenir, en effet, une valeur de la capacité linéaire en fonction de la fréquence et linéaire en fonction de la tension d'actionnement. Une capacité variable MEMS très performante est caractérisée une spécification précise du Tuning range, du facteur de qualité, de la fréquence self-résonance et du point de fonctionnement dans le domaine de linéarité [43].

III.4.2 Applications des capacités variables aux MEMS RF

III.4.2.1 VCO: Voltage Controlled Oscillator

Un VCO RF (Voltage Controlled Oscillator) est utilisé dans les chaînes d'émission/réception pour couvrir des hautes fréquences venantes du signal aux basses fréquences. Les VCO doivent assurer une fréquence stable malgré les éléments variables comme la température, le vieillissement des composants ou le bruit du circuit. On utilise des capacités variables pour ajuster la fréquence désirée. On a besoin pour répondre aux exigences de capacités variables à un fort facteur de qualité et d'une bonne linéarité.

Les capacités variables MEMS sont très intéressantes, mais, elles sont sensibles aux basses fréquences, à la pression, aux vibrations et aux bruits thermiques. En exemple de référence [44], on a utilisé plusieurs capacités variables dans différents circuits VCO (Figure. III.16).

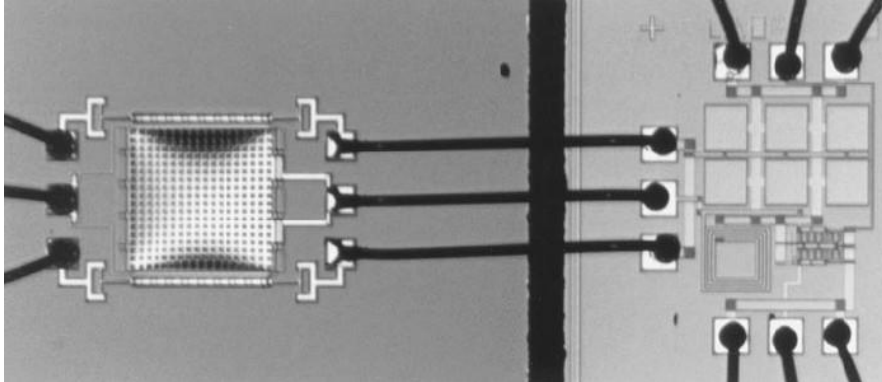


Figure III.16 Image prise au microscope optique du VCO basé sur les composants MEMS [44].

III.4.2.2 Filtrés accordables

Les filtres multi-usages utilisent des capacités variables pour ajuster leur bande passante. Les déflexions de poutres sont utilisées pour varier la bande passante (Figure III.17).

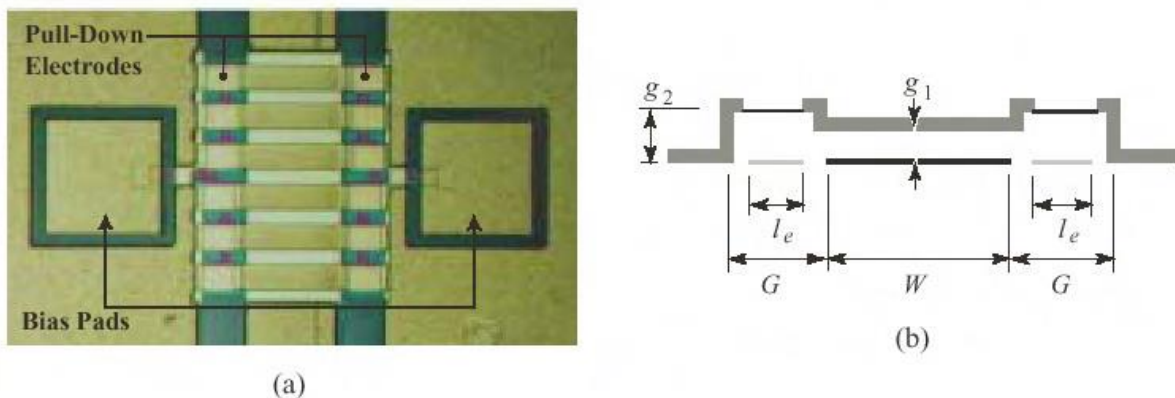


Figure III.17 (a) Image au microscope optique des poutres, (b) Leur vue en coupe [40].

III.4.2.3 Déphaseur

Les déphaseurs sont des systèmes essentiels dans les applications radar et les télécommunications modernes, notamment pour les matrices d'antennes, ils permettent l'ajustement en phase des différents éléments constituant l'antenne. Les déphaseurs sont sous forme de poutre distribués périodiquement sur une ligne coplanaire. La valeur de la

capacité est modifiée lorsqu'une polarisation électrostatique est appliquée à chaque composant MEMS, ceci permet de contrôler électriquement la phase équivalente de la ligne. La figure III.18 montre une photo de la ligne de transmission et des poutres suspendues au-dessus.

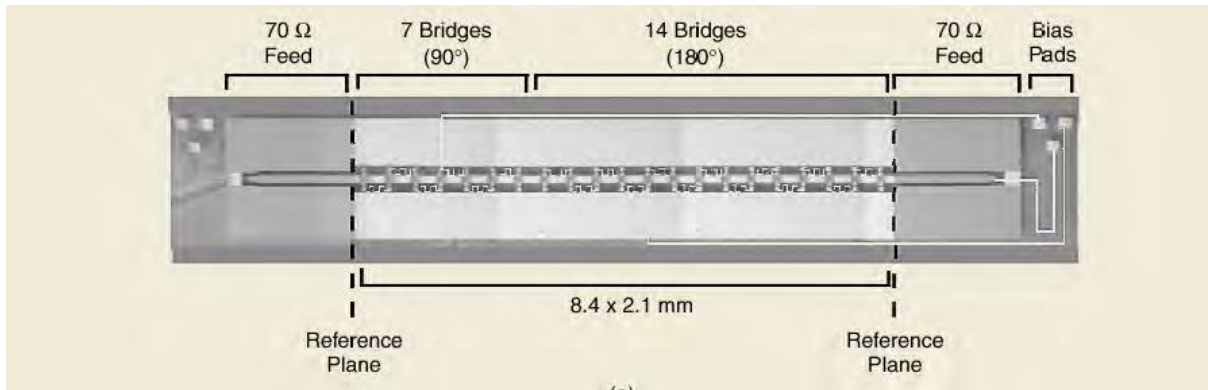


Figure III.18 Exemple de déphaseur 'Ka-band' [45]

III.4.2.4 Composants à capacités variables MEMS

Les composants à capacités variables MEMS RF ont par leur fonction un grand domaine d'applications à couvrir. Leur utilisation est primordiale dans l'optique de systèmes multi-bandes reconfigurables en apportant une réduction des coûts, une miniaturisation des surfaces occupées et une réduction de la consommation des circuits. La conception des circuits reconfigurables impose certains choix sur la géométrie et la topologie des structures MEMS. Ces considérations nous imposent la réalisation de capacités entre deux tronçons de ligne et pour cela on coupe la ligne du signal RF au dessous de la membrane, sur une largeur spécifique. Ainsi cette discontinuité permet de créer deux capacités entre les deux tronçons de ligne et la membrane comme représenté sur la Figure III. 19, [46].

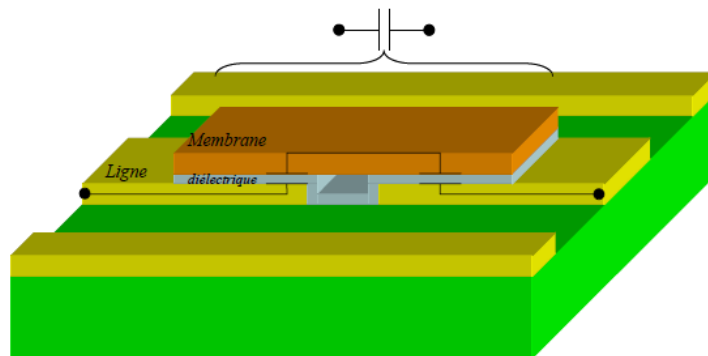


Figure III.19 : Réalisation de la capacité série [46]

Les MEMS étant directement connectés au circuit intégré, il n'est pas envisageable que la tension de commande soit appliquée sur la ligne centrale RF pour les activer directement, on insère deux électrodes déportées qui serviront donc à commander la membrane. Un exemple de structure est réalisé ici sur une ligne coplanaire dont les dimensions comme celles de la membrane dépendent des capacités souhaitées, Figure III.20 [46].

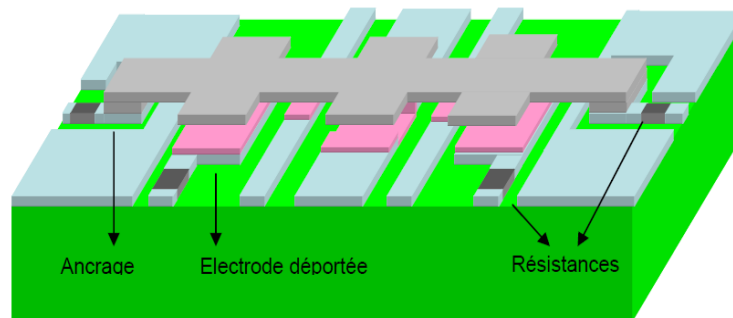


Figure III.20 Schématisation d'un commutateur capacitif série avec électrodes déportées et résistances intégrées [46]

La Figure III.21 présente le schéma électrique de la structure précédente avec comme considération que le pont est constitué d'une membrane métallique. Les capacités C_l et inductances L_l représentent la modélisation de la ligne coplanaire, les deux capacités C_{S1} et C_{S2} sont les deux capacités créées entre la membrane et les deux tronçons de ligne, qui associées forment la capacité série C_S qui nous intéresse. Les capacités C_m sont quant à elles la représentation des deux bras du pont passant au-dessus des deux tronçons de masse de la ligne coplanaire. Les capacités créées par les deux électrodes sont représentées par les éléments C_e . Nous avons mis à leur suite une résistance pour bloquer le signal radiofréquence. De même au niveau des ancrages, nous avons représenté des résistances afin d'éviter que le signal ne se propage au-delà.

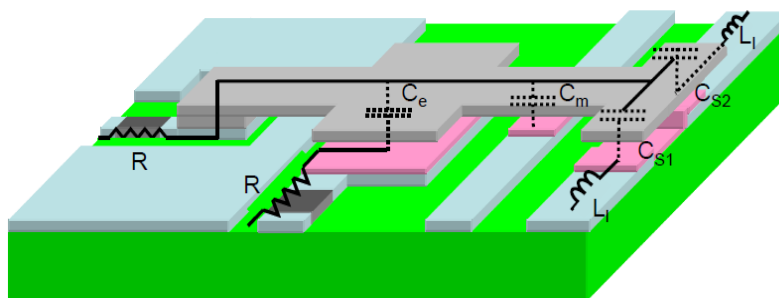


Figure II. 21 : Moitié d'une structure MEMS RF avec ses éléments électriques [46]

III.4.3 Modèle du MEMS RF comme Filtre passe-bande

III.4.3.1 Présentation du modèle

Un filtre passe-bande est un filtre ne laissant passer qu'une bande ou intervalle de fréquences compris entre une fréquence de coupure basse et une fréquence de coupure haute du filtre. Ainsi, uniquement les fréquences comprises dans cet intervalle sont conservées intactes ou avec une faible atténuation.

Les microsystèmes MEMS RF utilisés comme filtre passe-bande peuvent répondre au besoin d'intégration de : faible dissipation de puissance, faible facteur de bruit, linéarité élevée et avec un facteur de qualité compatible et la diminution de perte dans la configuration d'architectures de récepteur. Les microsystèmes MEMS RF utilisés comme filtre passe-bande à base de capacités reconfigurable doivent avoir meilleur Tuning et un meilleur facteur de qualité par rapport à d'autres condensateurs sur puce tels que des diodes varactors ou région d'accumulation des MOS.

Les MEMS peuvent assumer des fonctions mécaniques, telles que des moteurs, des pivots, des maillons ainsi que des composants électriques et optiques, comme des commutateurs, le tout sur une seule puce d'une taille allant d'une douzaine de microns à une douzaine de millimètres. Différents types de micromoteurs ont déjà été réalisés. Les premiers micromoteurs furent électrostatiques appelés aussi moteurs à capacité variable. La forme du rotor est conçue de manière à obtenir une capacité variable entre lui et les électrodes statoriques. Le micromoteur est composé d'une embase fixe (stator), d'un actionneur électrostatique (générateur de force), d'un rotor et d'un couvercle de protection (encapsulation). Le principe d'actionnement électrostatique utilise une configuration en peigne inter-digité, cette dernière permettant une densification de la force par unité de surface (compacité de la partie génératrice de force).

Les Filtres MEMS RF ainsi insérés, sont formés d'éléments micro-commutateurs où chacun est composé de deux poutres (fixe et mobile). Un exemple d'utilisation de structure de filtre est illustré en Figure III.22 où le rotor est connecté à des actionneurs électrothermiques latéraux gauche et droit, alors que le stator est formé par un ensemble de poutres parallèles ancrés et liée aussi aux interconnexions du rotor. L'actionneur de l'embrayage est utilisée à verrouiller les poutres du rotor à la position désirée lorsque la tension est présente, sinon les actionneurs sont mis hors tension [46].

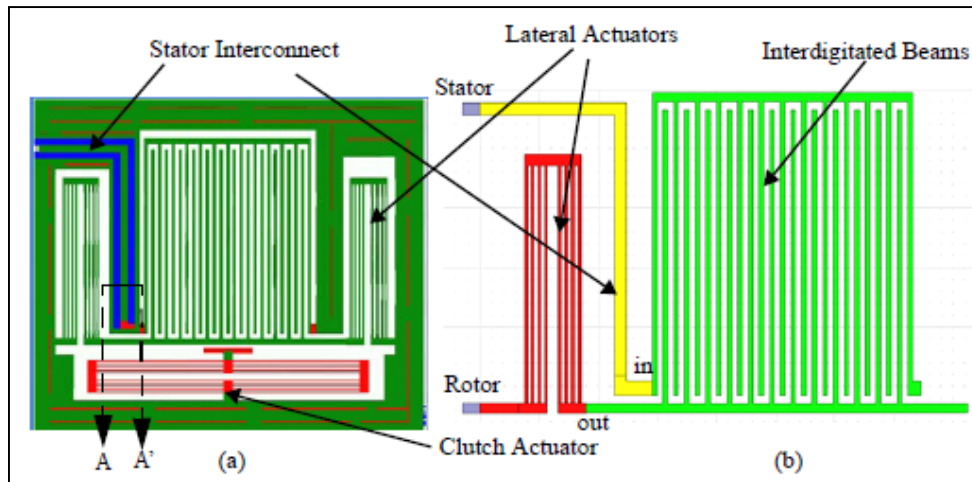


Figure III.22 : Présentation d'exemple d'application des MEMS RF [48]

(a) Vue de dessus de la capacité MEMS

(b) Voix du signal entre poutres entrecroisées parallèles

Dans notre étude de filtre MEMS RF à capacités variables, les modèle électriques doivent être pris avec précision. Les effets de l'actionneur et les interconnexions de stator doit être aussi pris en considération car ils sont comme éléments parasites. Pour cela on représente le model de poutres à capacités reconfigurable avec des résistances et inductances parasites (L_{fin} , R_{fin}) comme le montre le schéma équivalent de la Figure III.23 ou leurs expressions seront spécifiées dans ce qui suit.

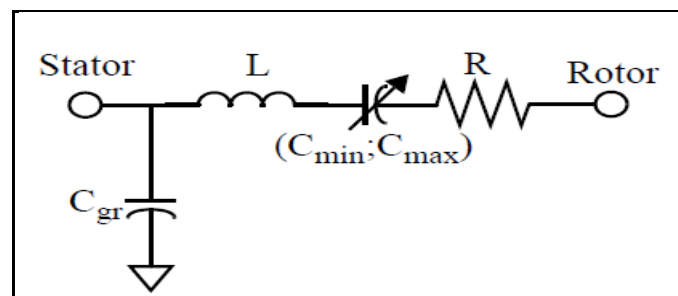


Figure III.23: Modèle schématique de l'application du MEMS RF

Chaque poutre génère une capacitance variable ou sa bonne estimation est extrêmement importante car elle influe sur la prédiction de la fréquence de transmission ou celle de résonance d'un filtre. Pour déterminer les capacités totales entre les poutres (C_{min} , C_{max}) en fonction des dimensions, on doit prendre en considération la conception

technologique et physique des poutres ainsi que les ballonnements métalliques créés durant le micro-usinage des MEMS RF, comme indiqué en Figure III.24.

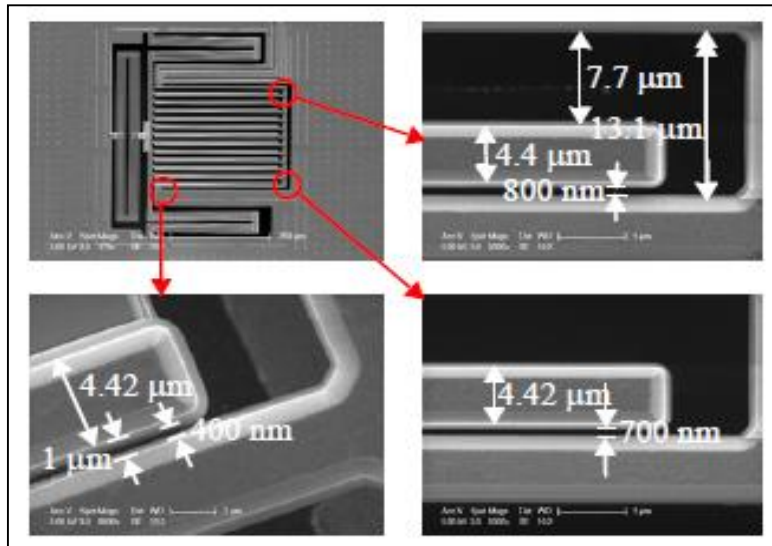


Figure III.24: Vues technologiques durant le micro-usinage des poutres intercalées en présence du ballonnements métallique et changement de l'épaisseur de polymère [46]

Le modèle en coupe transversale d'un ensemble de poutres intercalées à deux états de configurations : Cas de capacité minimale et cas de capacité maximale est illustré en Figure III.25 [48].

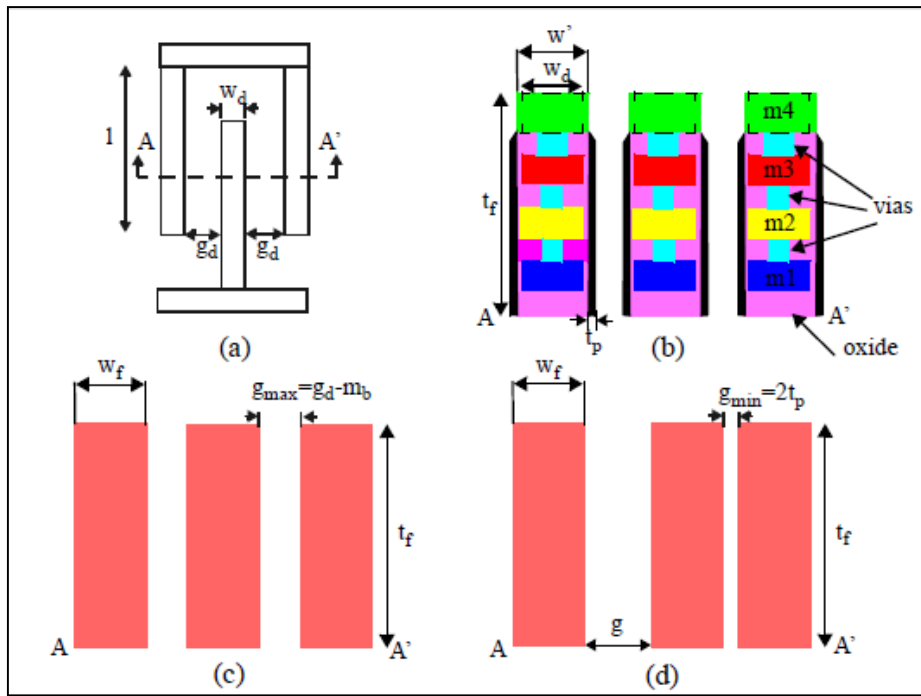


Figure III.25: Modèle en coupe transversale de poutres intercalées à deux états de configurations [48]

- (a) Vue de dessus d'une poutre intercalée
- (b) Coupe de poutres avec ballonnement du métal et du polymère
- (c) Modèle de position de poutres pour le cas de capacité minimale
- (d) Modèle de position de poutres pour le cas de capacité maximale

Les expressions de capacités du modèle de poutres intercalées sont données ci-dessous [48]:

$$C_{\min} = N \cdot I_{\text{fin}} \left(\frac{2 \epsilon_0 t_f}{g_{\max}} + \frac{2 \epsilon_0 K(\sin((\pi w')/4(w' + g_{\max})))}{K(\cos((\pi w')/4(w' + g_{\max})))} \right) \quad (\text{III.21})$$

Avec

$$K(x) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1-x^2} (\sin(\theta))^2} d\theta \quad (\text{III.22})$$

L'augmentation de la C_{\min} est en fonction du facteur $K(x)$ qui traduit les déplacements de plus en plus faibles lors de la vibration de poutres mobiles à petites dimensions, ce qui limite les possibilités de détection de l'angle θ par rapport à l'axe x de déflexion de la poutre.

$$C_{\max} = N \cdot l_{\text{fin}} \left(\frac{\epsilon_0 t_f}{g_{\min}} + \frac{\epsilon_0}{\pi} \ln \left(\left(\left(\frac{w'}{g_{\min}} + 1 \right)^2 - 1 \right) \left(1 + \frac{2g_{\min}}{w'} \right)^{\left(1 + \frac{w'}{g_{\min}} \right)} \right) \right) \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Avec} \quad w' = w_d + m_b, \quad g_{\max} = g_d - m_b, \quad g_{\min} = 2t_p$$

Où N est le nombre de poutres, w_d est la largeur tracée, t_f est l'épaisseur de la poutre, w_f est la largeur de la poutre, m_b est la quantité de ballonnements métallique, t_p est l'épaisseur du polymère déposé sur les parois latérales des poutres. Comme il est illustré en Figure III. 23 et spécifié en détail pour chaque poutre en Figure III. 26, les selfs et des inductances mutuelles sont insérées pour les deux cas où la capacité sera à son minimum ou à son maximum. En conséquence, l'équation (III.24) donne l'expression de l'inductance équivalente finale:

$$L_{\text{fin}} = 2l_{\text{fin}} \left(\frac{(N+1)}{N} \left(\ln \left(\frac{2l_{\text{fin}}}{w' + t_f} \right) + \frac{1}{2} + \frac{w' + t_f}{3l_{\text{fin}}} \right) + Q \right) \quad (\text{III.24})$$

Avec

$$Q = \ln \left(\frac{l_{\text{fin}}}{w' + g} + \sqrt{1 + \left(\frac{l_{\text{fin}}}{w' + g} \right)^2} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{w' + g}{l_{\text{fin}}} \right)^2} - \frac{w' + g}{l_{\text{fin}}} \quad (\text{III.25})$$

Les expressions de résistances du modèle de poutres intercalées sont exprimées par l'expression ci-dessous et présentées en Figure III.26 [48]:

$$R_s = \left(\frac{1}{R_{sM1}} + \frac{1}{R_{sM2}} + \frac{1}{R_{sM3}} + \frac{1}{R_{sM4}} \right)^{-1} ; \quad R_{\text{fin}} = \frac{(N+2)}{N} \frac{R_s l_{\text{fin}}}{w_f} \quad (\text{III.26})$$

Cette dernière figure présente un schéma équivalent réel du cas de configuration de poutres intercalées ou l'effet de présence d'inductances mutuelles entre self et plus l'effet résistif qui se craie, influençant ainsi sur la bonne réponse du filtre.

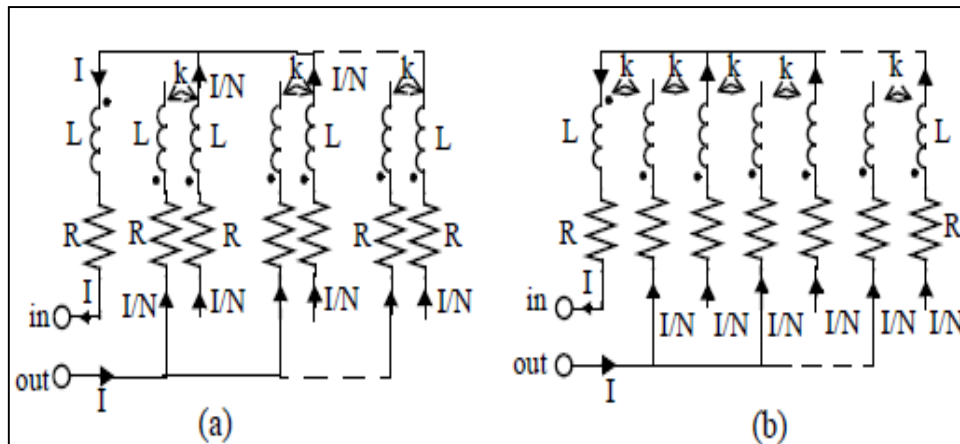


Figure III.26: Présentations des inductances et résistances d'insertion créées au niveau des poutres intercalées pour :

(a) Positions prise pour avoir une capacitance maximale

(b) Positions prise pour avoir une capacitance minimale

Par conséquent, l'augmentation de la bande de fréquences est en fonction de deux catégories de paramètres: Les paramètres dimensionnels (largeur de la poutre, sa longueur, etc.) et les paramètres matériaux (module d'Young et la permittivité, etc.). On pourra alors jouer sur les différents paramètres afin de déterminer précisément la bande de fréquences souhaitée pour une application donnée.

III.4.3.2 Simulation du Modèle

La modélisation du modèle d'un MEMS RF utilisé comme filtre passe-bande à base de capacités reconfigurable est faite par le logiciel Matlab en introduisant tout les paramètres du modèle considéré. La Figure III.27 présente les résultats de simulation de la variation de la déflexion de l'une des poutres pour des largeurs des parois qui varie de 20 et 40 microns mètres en fonction de l'épaisseur que peut prendre la position de la poutre mobile pour deux plaques de contact de 100 et 200 μm d'épaisseurs entre eux.

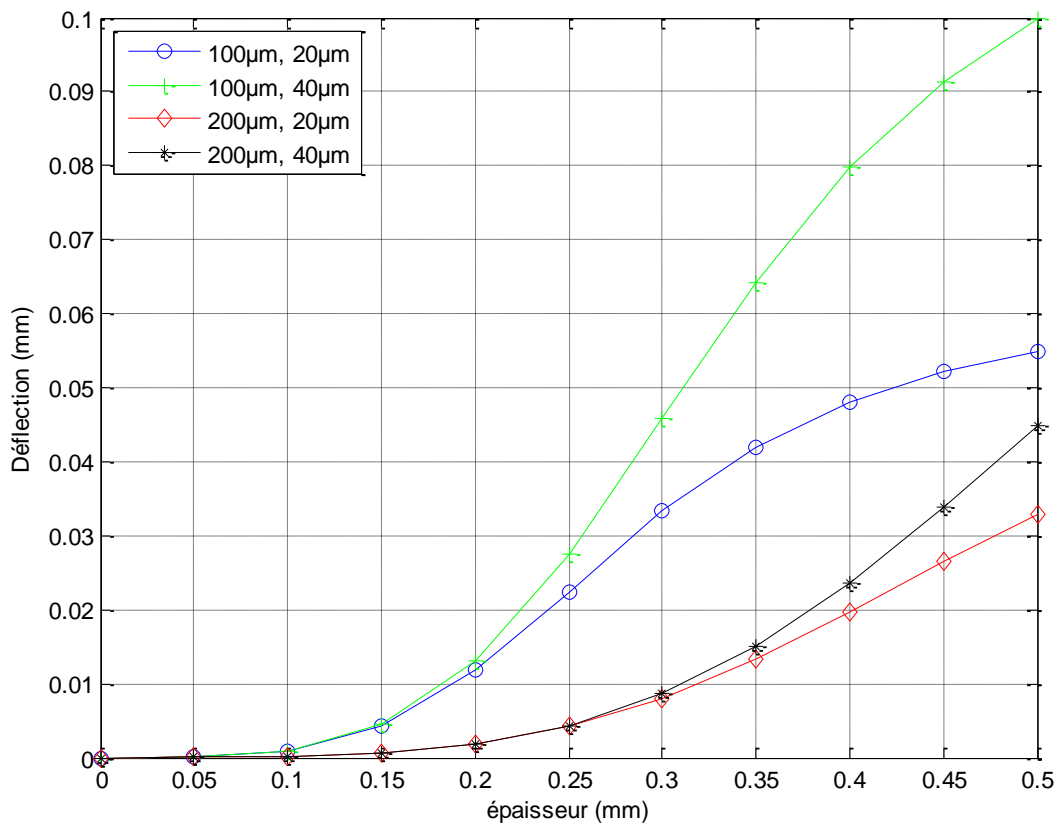


Figure III.27: Variation de la déflexion en fonction de l'épaisseur que peut prendre la position de la poutre

On remarque que la plus grande déflexion peut être vue pour une épaisseur entre plaques de contact de 100µm et d'une largeur de 40µm de la poutre. Cette variation de déflexion est presque deux fois la déflexion de celle de 20 µm, signifiant ainsi que la déflexion atteindra une valeur maximum pour une largeur spécifique qu'on peut attribuer au commutateur RF qui doit utiliser comme une capacité variable digitale (2 états : On/Off)

La Figure III.28 représente la variation de la déflexion de l'une des poutres en fonction de la hauteur de ses plaques pour deux épaisseurs entre plaques également de 100 et 200µm. Ainsi on peut déduire que la sélection des dimensions de plaques constituant les commutateurs à base de poutres à capacités reconfigurable, influe ou joue un rôle important dans la détermination du taux de déflexion de la poutre et ainsi spécifier les valeurs des capacités entre les poutres (C_{min} , C_{max}). Les dimensions sélectionnées seront nos paramètres de base pour le filtre passe bande.

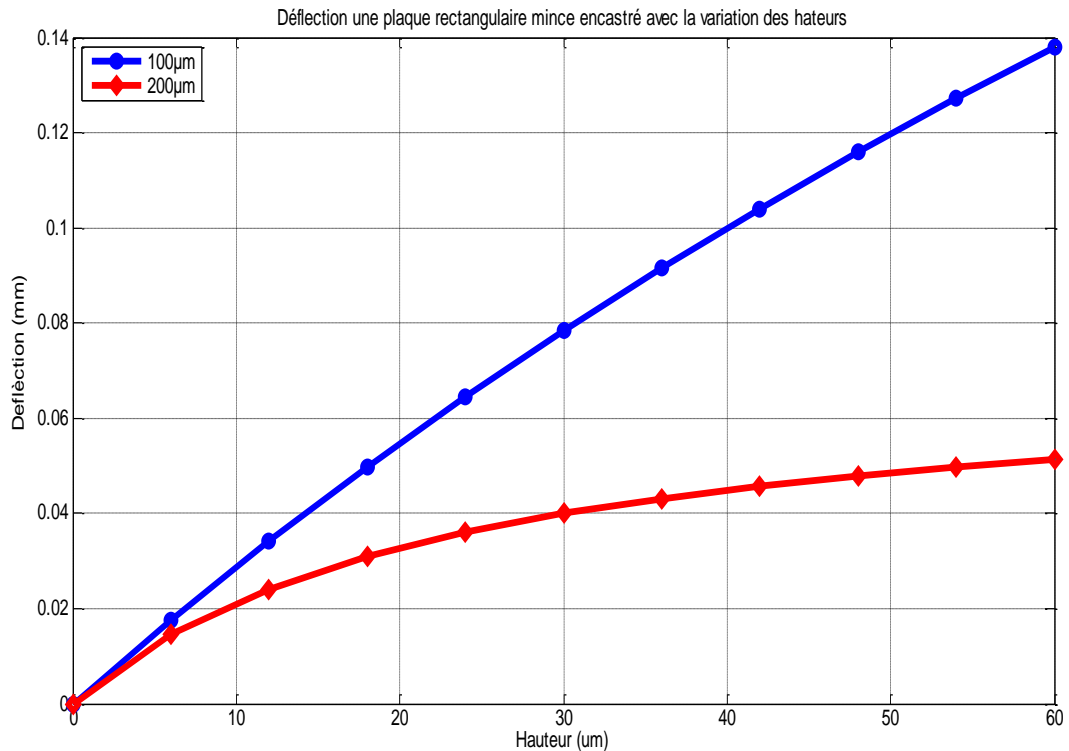


Figure III.28: Simulation de la déflexion en fonction de la hauteur de la poutre pour deux épaisseurs de plaque : 100 µm et 200 µm

En premier, on présente la variation de la capacité d'une micro-poutre en fonction de différentes fréquences supposées appliquées. La Figure III.29 présentant ainsi la capacitance en fonction du changement de fréquence et la Figure III.30 présente celle du facteur de qualité caractérisé à la fois pour les cas de fréquences minimale et maximale de fonctionnement. Leurs valeurs sont comprises entre 9 GHz et 15.5 GHz. Suivant le choix des valeurs possibles pour les capacités MEMS RF en technologie, on a fixé des valeurs minimale et maximale des capacités variables. Nous n'observons que la variation de capacité varie plus rapidement pour certaines fréquences spécifiques maximales et minimales, limitant ainsi un intervalle de fréquences pour notre filtre.

Ces simulations démontrent la faisabilité de réaliser un filtre passe bande en ne modifiant que la valeur des capacités présentées par les MEMS RF conçus. Ces derniers sont destinés principalement à être utilisés pour des applications en émission et réception de signaux, par exemple dans les stations de base, pour cela il faut augmenter le facteur de qualité, puisque plus le facteur de qualité est grand moins il y a de risques de diaphonie sur une gamme de fréquences. La Figure III.30 présente la variation du facteur de qualité en fonction du changement de fréquences ou une spécification a été seulement faite pour les cas de fréquences minimale et maximale de notre filtre passe bande, indiquant ainsi que Q le facteur de qualité décroît pour des variations de fréquences hautes.

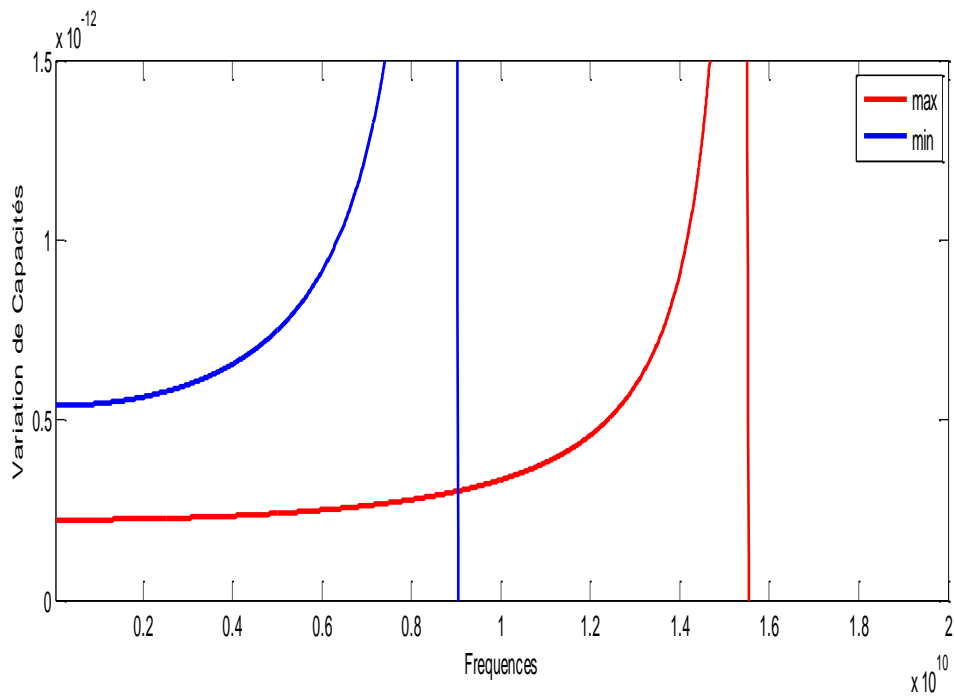


Figure III.29: Variation de la capacitance en fonction de la fréquence (Spécification seulement pour les cas de fréquences minimale et maximale)

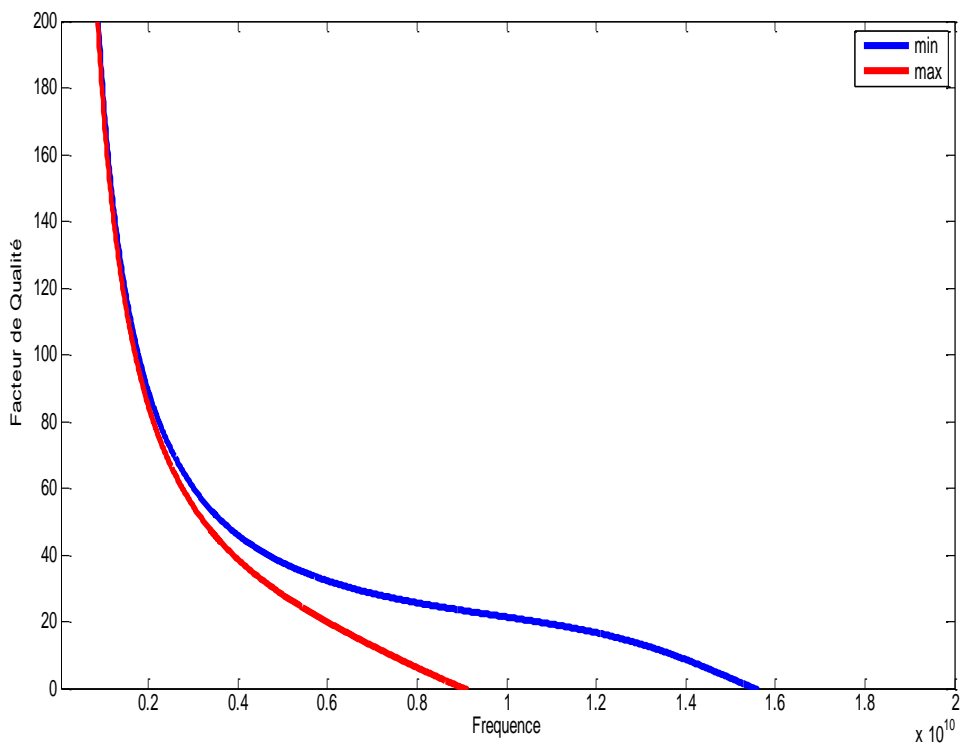


Figure III.30 : Variation du facteur de qualité en fonction de la fréquence (Spécification seulement pour les cas de fréquences minimale et maximale)

Ces simulations démontrent la faisabilité de réaliser un filtre passe bande en ne modifiant que les valeurs des capacités présentées par les MEMS RF conçus. L'intervalle de fréquences sélectionné sera spécifié par un facteur de qualité pour les cas de fréquences minimale et maximale et ainsi prédire la résonance propre de chaque unité de capacité intégrée.

III.5 Conclusion

Notre travail est basé sur l'étude et simulation de deux exemples très répondue et utilisables en microsystèmes MEMS RF : Les commutateurs et les filtres passe bandes. Dans une première partie, nous nous sommes intéressés à la modélisation de structures géométriques. C'est une étape importante de la conception (notamment pour le dimensionnement de la structure), car elle permet de prédire le comportement électrique des microstructures (plaques de contact du commutateur) aux hautes fréquences. Nous avons vu deux structures carré et circulaire et présenter l'effet de la déflexion en fonction de la variation de l'épaisseur du commutateur lui-même. La détermination du taux de déflexion est en fonction des dimensions de plaques constituant les commutateurs, et joue un rôle important dans la spécification de valeurs des capacités entre les poutres (C_{min} , C_{max}).

Ensuite, l'étude du modèle MEMS RF utilisé comme filtre passe-bande à base de capacités reconfigurables. On a remarqué que la variation de déflexion atteint une valeur maximum et minimum pour une largeur spécifique entre poutres des micro-commutateurs supposés comme capacités variables digitales (2 états : On/Off), car ce filtre possède deux fréquences de fonctionnement lorsque les micro-poutres sont à état haut ou à état bas limitant ainsi une bande de fréquences.

Nous avons observé que la variation de capacité varie plus rapidement pour certaines fréquences spécifiques maximales et minimales, limitant ainsi un intervalle de fréquences pour notre filtre. La disposition, les dimensions et les valeurs des paramètres du modèle de la capacité sont en fonction du changement de fréquence et du facteur de qualité caractérisé à la fois pour les cas de fréquences minimale et maximale de fonctionnement.

Cette étude et simulations nous ont permis non seulement de comprendre la nature et les modes de fonctionnements physique et électriques du model comme exemple de MEMS RF mais aussi d'estimer l'ordre des grandeurs des fréquences attendues et sa passe bande comme étant un filtre.

Cette étude est très importante pour la prévision et même pour l'optimisation des configurations des MEMS RF en spécifiant par exemple deux catégories de paramètres: les paramètres dimensionnels (largeur de la poutre, sa longueur,..) et les paramètres matériaux (module de Young, permittivité, ..) des poutres insérées et la faisabilité de réaliser un filtre passe bande en ne modifiant que les valeurs des capacités créés entre ces micro-poutres.

L'intervalle de fréquences sélectionné sera spécifié par un facteur de qualité pour les cas de fréquences minimale et maximale et ainsi prédire le comportement du MEMS RF en différentes applications.

En conclusion, les modes de fonctionnement des MEMS RF sont en fonction du mode de flexion des éléments micro-commutateurs qui les constituent et doivent être décrit précisément sur les plans physiques mécaniques et électroniques.

Conclusion

CONCLUSION GENERALE

Les microsystemes sont un détournement des technologies utilisées pour l'industrie microélectronique, se déployant sur silicium et qui ajoute des parties « mobiles », et des couches actives ou non. On se rapproche alors de la définition généralement admise des MEMS et des MOEMS, qui représentent un sous-groupe de microsystemes et littéralement signifient «des microsystemes électromécaniques ou opto-électromécaniques ».

La fabrication des microsystemes MEMS repose sur les notions fondamentales d'intégration spatiale, de fabrication et d'assemblages collectifs des différents éléments du produit final. Les technologies de fabrication sont plus ou moins toutes dérivées de celles mises au point pour la réalisation de circuits de le micro-électronique. On a essayé de définir les MEMS par leurs applications invoquées dans l'historique des microsystemes en électronique et informatique, bien sûr, mécanique, mais aussi optique, chimie, fluide, et de plus en plus, biologie...Mais, il s'agit d'un champ technologique encore en plein développement qui n'a pas encore établi ses propres frontières.

Notre premiers pas faits dans ce mémoire était de présenter des généralités sur la technologie MEMS ainsi que leurs méthodes de fabrication compatible avec les procédés standards de la microélectronique en focalisant principalement sur les technologies intégrées en spécifiant les différentes applications technologiques actuelles utilisées comme micro-capteurs, micro-actionneurs et micro-commutateurs.

Le développement des télécommunications s'est fortement intensifié depuis le début du 20ème siècle avec la généralisation d'équipements tels que la radio, la télévision, la téléphonie, etc. Aujourd'hui, c'est un domaine incontournable de notre vie quotidienne, qui couvre un large éventail d'applications, que ce soit dans notre vie privée ou au sein des entreprises. L'utilisation de ces outils de communication est maintenant très courante : téléphones portables, utilisation d'internet (connexion haut débit et sans fil), transmissions satellites, l'automobile, ou encore l'aéronautique.

Notre travail s'est orienté dans le cadre d'une recherche préliminaire du microsysteme MEMS-RF signifiant : systemes micro-électro-mécaniques radiofréquence. Ce type de composants peut être intégré dans les dispositifs radio et hyperfréquences (RF). Le principe

est d'utiliser des éléments mécaniques, sur des circuits électriques et électroniques hautes fréquences. Les MEMS-RF sont généralement de taille micrométrique, et vont remplir une fonction de commutation grâce à une composante mobile, couplée à un système de contrôle. Les propriétés électroniques du dispositif RF seront alors modifiées. En outre, ces composants sont développés pour rendre une fonction électronique « agile », permettant par exemple d'adapter un appareil de communication à une fréquence de fonctionnement donnée, sur différentes normes de transmission. C'est le cas en téléphonie mobile avec les normes Bluetooth, GSM, 3G, 4G, WIMAX, etc.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail est basé sur l'étude et simulation de deux exemples très répandus et utilisables en microsystèmes MEMS RF : Les commutateurs et les filtres passe bandes. Dans une première partie, nous nous sommes intéressés à la modélisation de structures géométriques. C'est une étape importante de la conception (notamment pour le dimensionnement de la structure), car elle permet de prédire le comportement électrique des microstructures (plaques de contact du commutateur) aux hautes fréquences. Nous avons vu deux structures carré et circulaire et présenter l'effet de la déflexion en fonction de la variation de l'épaisseur du commutateur lui-même. La détermination du taux de déflexion est en fonction des dimensions de plaques constituant les commutateurs, et joue un rôle important dans la spécification de valeurs des capacités entre les poutres (C_{min} , C_{max}).

Ensuite, l'étude du modèle MEMS RF utilisé comme filtre passe-bande à base de capacités reconfigurables. On a remarqué que la variation de déflexion atteint une valeur maximum et minimum pour une largeur spécifique entre poutres des micro-commutateurs supposés comme capacités variables digitale (2 états : On/Off), car ce filtre possède deux fréquences de fonctionnement lorsque ses micro-poutres sont à état haut ou à état bas limitant ainsi une bande de fréquences. La variation de la capacité des micro-poutres en fonction de différentes fréquences supposées appliquées ainsi celle du facteur de qualité spécifie les cas de fréquences minimale et maximale de fonctionnement. Leurs valeurs sont comprises entre 9 GHz et 15.5 GHz. Suivant le choix des valeurs possibles pour les capacités

MEMS RF en technologie, on a fixé des valeurs minimale et maximale des capacités variables. Ainsi, nos simulations démontrent la faisabilité de réaliser un filtre passe bande en ne modifiant que la valeur des capacités présentées par les MEMS RF conçus. Ces derniers sont destinés principalement à être utilisés pour des applications en émission et réception de signaux, par exemple dans les stations de base, pour cela il faut augmenter le facteur de qualité, puisque plus le facteur de qualité est grand moins il y a de risques de diaphonie sur une gamme de fréquences.

Cette étude est très importante pour la prévision et même pour l'optimisation des configurations des MEMS RF en spécifiant par exemple deux catégories de paramètres: les paramètres dimensionnels (largeur, longueur,..) et les paramètres matériaux (module d'Young, permittivité, ..) des micro-poutres et la faisabilité de réaliser un filtre passe bande en ne modifiant que les valeurs des capacités créées entre les électrodes de ces poutres. L'intervalle de fréquences sélectionné sera spécifié par un facteur de qualité pour les cas de

CONCLUSION GENERALE

fréquences minimale et maximale et ainsi prédire le comportement du MEMS RF en différentes applications.

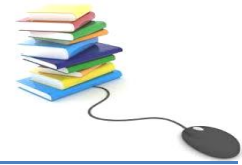
En conclusion, l'étude d'autres types de microsystèmes MEMS sera possibles comme perspective en précisant la technologie utilisée et le mode de fonctionnement physiques mécaniques et électroniques.



BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE



- [1] Denis MERCIER, "Conception, modélisation, fabrication et caractérisation de composants MEMS RF "le 10 décembre 2003.
- [2] Pierre Puget, Philippe Nerin,"Les microsystèmes : technologies et traitement de l'information",15-19 SEPTEMBRE 1997.
- [3] GAURAV NAIR,"DYNAMIC SIMULATION AND DESIGN OFRF-MEMS SWITCHES MADE OF STEEL", A PROJECT REPORT BY Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Science, 2012.
- [4] G. Matthei, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, Artech house books, 1980, pp. 432 – 433
- [5] Mohamed_Kazem El Khatib, « Fonctions de commutation à base de micro commutateurs MEMS RF appliquées à la conception de matrices de commutation », Université de Limoges, Années 2008.
- [6] Francois Blard, « Conception et réalisation de références de tensions alternatives à base de MEMS », Université de Toulouse, le 29 septembre 2011.
- [7] Gatien FLEURY, « Etude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, le 21 décembre 2006.
- [8] Arnaud De Grave, « Conception intégrée de micro système électromécanique », thèse en Institut national polytechnique de Grenoble, le 8 septembre 2004.
- [9] C. Nguyen, "Micromachined devices for wireless communications," in Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, August 1998, pp. 1756 – 1768.
- [10] Luc HEBRARD, « systèmes compatibles CMOS », (Master SPI – Spécialité M.N.E, Université de Strasbourg, 2003.
- [11] Laurent Latorre « Evaluation des techniques microélectroniques contribuant à la réalisation de microsystèmes : application à la mesure du champ magnétique » Thèse de Doctorat- l'Université Montpellier II, Université Montpellier II, le 25 juin 1999.
- [12] Aboubacar Chaehoi « Conception et Modélisation de MEMS monolithique CMOS en technologie FSBM : Application aux accéléromètres » Thèse de Doctorat – Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc – 2005.
- [13] Renaud ROBIN, « Conception et réalisation de composants MEMS pour les communications bases sur un concept de membrane simplement supportée », Université des Sciences et Technologies de LI LLE (U.S.T.L.), le 09 décembre 2008.
- [14] J. Soen, "Contribution à la modélisation et à la commande des microsystèmes capteurs non linéaires", Phd thesis report, Université Joseph Fourier Grenoble1, 2007.
- [15] R. Mahameed, M. El-Tanani et G. Rebeiz, « A zipper RF MEMS tunable capacitor with interdigitated RF and actuation electrodes », Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 20, no. 3, 2010.

- [16] David Peyrou « Etude theorique et experimentale des techniques d'assemblage et de mise en boitier pour l'integration de Microsystemes Radio-Frequences » Thèse de Doctorat- Université Paul Sabatier de TOULOUSE, 2009.
- [17] Voir site : <http://www.amkor.com/enablingtechnologies/MEMS/index.cfm>
- [18] <http://www.yole.fr/pagesAn/Micronews/newslett.asp>
- [19] B. P. Solano, A. J. Gallant et D. Wood, " Design and optimisation of a microgripper : Demonstration of biomedical applications using the manipulation of ocytes". In DTIP of MEMS and MOEMS, 2009.
- [20] Y. Clavet, *Définition de solutions de filtrage planaires et multicouches pour les nouvelles générations de satellites de télécommunications*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale - LEST, Brest, 2006.
- [21] Katia GRENIER, « Les micro-nanotechnologies pour les systèmes hyperfréquences: au-delà des conventions » MEMOIRE l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.
- [22] Tata Groups. Tata Nano - \$10 airbag [en ligne]. Disponible sur : <http://www.carttech.fr/news/essai-tata-nano-39385466.htm>.
- [23] S. Muratet, J.Y. Fourniols, Microsystems and applications to space: reliability modeling methodology, *Advancing Microelectronics Magazine*, Vol.31, N°2, Mars/Avril 2004.
- [24] Harijaorra Lalao Rakotoarison, « Méthode et outil de génération automatique de module pour l'optimisation fortement contrainte des microsystemes magnétiques », Université Joseph Fourier, le 29 novembre 2007.
- [25] O. Mumford, "Auto-injecteurs." [Online]. Available: <http://www.owenmumfordfrance.com/fr/content/1/314/auto-injecteurs.html>.
- [26] Hoang-Nam NGUYEN, « Technique alternative de test pour les interrupteurs MEMS RF » thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'Institut polytechnique de Grenoble 1, 2007.
- [27] Zhu, and al., "Micro machined on-chip inductor performance analysis", *IEEE MEMS*, January 2003, pp. 165-168.
- [28] F.Lepoitevin, « Développement et réalisation de briques de base pour la conception de microrelais électromagnétiques et magnétostrictifs », HAL Id: tel-00599261, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00599261>, 2011.
- [29] Dec and K.Suyama, 'Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's', *Trans. On Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, No. 12, p. 2587-2596, 1998.
- [30] S. Muratet, "Thèse de doctorat : Conception, caractérisation et modélisation : Fiabilité prédictive des MEMS à actionnement électrothermique", INSA de Toulouse, 2005.
- [31] W. H. Weedon, W. J. Payne, G. Rebeiz, J. Herd, and M. Champion, "MEMS switched reconfigurable multiband antenna: Designe and modeling" *Antenna Applications Symp.*, Allerton Park, Monticello, IL, September 1999.
- [32] M.Desvergne, « Etude des résonateurs MEMS à ondes de Lamb – Application au filtrage en fréquence intermédiaire dans les récepteurs de radio-télécommunication », thèse de doctorat, l'université bordeaux 1, 2007.

- [33] SANDIA, <http://www.mdl.sandia.gov/>
- [34] Y.K. Kuo, C.H. Chen, "Novel reduced-size Coplanar-Waveguide Bandpass Filters", IEEE MTT-S, vol. 11, pp. 65-67, Feb. 2001.
- [35] Gatien FLEURY, « Etude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, le 21 décembre 2006.
- [36] A.Pothier, « Conception, Réalisation et test de micro-commutateur micro électromécanique et application aux circuits hyperfréquences reconfigurable », Université de Limoges, le 11 décembre 2003.
- [37] R.H. Grace, "The growing presence of MEMS & MST in automotive applications", [en ligne]. Sensors Magazine, September 1999, p. 89-96. Disponible sur : <http://archives.sensormag.com/articles/0999/89/index.htm>.
- [38] M. Desvergne, « Etude des résonateurs MEMS à ondes de Lamb – Application au filtrage en fréquence intermédiaire dans les récepteurs de radiotélécommunication », thèse de doctorat, l'université bordeaux 1, 2007
- [39] S.Banerjee, , "Design and simulation of an RF-MEMS switch," *Master of Engineering Report*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, June 2011. Application disponible sur: <http://www.microstrain.com>.
- [40] J. Muldavin, R. Boisvert, C. Bozler, S. Rabe, C. Keast, "Power handling and linearity of MEMS capacitive series switches", IEEE International Microwave Symposium Digest, 8-13 June 2003, pp 1915 - 1918 vol.3.
- [41] S. OUKIL, "RF MEMS circuit for space communications systems", 24th International Conference on Microelectronics (ICM), 978-1-4673-5292-5/12/©2012 IEEE, 2012.
- [42] S. Timoshenko, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, New York, 1940.
- [43] Xiaobin Yuan; Hwang, J.C.M.; Forehand, D.; Goldsmith, "Modeling and characterization of dielectric-charging effects on RF MEMS capacitive switches", Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International 12-17 June 2005
- [44] A.SAMIA, "Conception d'un micro-capteur de pression, humidité et température en technologie MEMS", mémoire de Magister, université de Tizi-ouzou, mars 2011.
- [45] F.D Bannon et al, "High-Q HF micro electromechanical filters", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.35, no.4, April 2000, p. 512-526.
- [46] A. Medhaoui, M. Pisani, D. Tsamados, F. Casset, P. Ancey et A. Ionescu, « MEMS tunable capacitors with fragmented electrodes and rotational electro-thermal drive », in DTIP of MEMS & MOEMS, 2006. ISBN 2-916187-03-0.
- [47] J.P.Busquere, « Développement et intégration de MEMS RF dans les architectures d'amplificateur faible bruit reconfigurables », *Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse*, Décembre 2005.
- [48] H.Akyol, « Modeling and Design of An RF-MEMS Reconfigurable LC-based Bandpass Filter ». Master of science for carnegie Mellon University USA August 2005.