

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
Kousseil BEN AHMED

DÉVELOPPEMENT DE CIRCUITS RF INTELLIGENTS À BASE DE SYSTÈMES
MICRO-ÉLECTROMÉCANIQUES (MEMS)

MONTREAL, LE 22 NOVEMBRE 2007

© droits réservés de Kousseil Ben Ahmed

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ammar B.Kouki, directeur de mémoire
Département génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Ahmed Khebir, codirecteur de mémoire
Electromagnetic Works Inc.

M. René Jr Landry, jury
Département génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Vahé Nerguizian, président du jury
Département génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 23 OCTOBRE 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je voudrais témoigner toute ma reconnaissance à M. Kouki pour m'avoir encadré, m'avoir donné l'opportunité d'entreprendre de nombreux projets intéressants et pour m'avoir fourni toute l'aide et tout l'encouragement dont j'avais besoin afin d'accomplir ce travail.

Je tiens également à exprimer mes plus vifs remerciements à mon Co-directeur M. Khebir qui a mis à ma disposition tous les outils nécessaires pour réaliser ce mémoire sans oublier sa confiance et son enthousiasme qui ont été ma grande source de motivation.

J'adresse mes remerciements à M. Nerguizian pour m'avoir honoré d'examiner ce travail et d'accepter la présidence du jury.

Que Monsieur M. René Jr Landry, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour avoir bien voulu examiner ce travail et participer au jury.

J'ajoute mes remerciements à toute personne qui m'a aidée de près ou de loin pour accomplir mon mémoire.

DÉVELOPPEMENT DE CIRCUITS RF INTELLIGENTS À BASE DE SYSTÈMES MICRO-ÉLECTROMÉCANIQUES (MEMS)

Kousseil BEN AHMED

RÉSUMÉ

Les systèmes micro-électromécaniques (MEMS) sont une technologie émergente qui présente un grand intérêt dans le développement de plusieurs domaines, comme les domaines de radiofréquence (RF) et des micro-ondes. Grâce à leur agilité, les circuits RF MEMS sont de plus en plus utilisés dans des applications telles que le filtrage, la commutation et l'adaptation d'impédance. Cependant, la conception de tels composants requiert des modélisations et des analyses complexes touchant plusieurs aspects physiques. Dans ce projet, nous avons étudié l'importance des simulations mécaniques et électriques des composants RF MEMS. Nous avons évalué et comparé la précision et la performance de différents simulateurs en utilisant des structures de condensateur multi-doigts. Nous avons pu démontrer l'importance du couplage électromécanique dans les simulateurs qui peuvent bien prédire le comportement de la structure autour de la tension d'effondrement. Nous avons utilisé ces simulateurs pour concevoir une capacité qui varie de 0.29 pF jusqu'à 5 pF qui permet de réaliser un filtre passe bande couvrant la plage de fréquence entre 1.5GHz et 2GHz. Bien que notre conception fût réussie, la tension de contrôle requise s'est avérée assez élevée, de l'ordre de 300V; pour la structure muti-doigts utilisée. Afin de valider notre procédure de conception basée sur des simulations physiques, nous avons conçu, fabriqué et testé une capacité à plaques parallèles dont la tension de contrôle est seulement de l'ordre de 15V Cependant, ces simulations ont été faites avec des tensions de commande assez élevées.

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT SMART RF CIRCUITS BASED ON MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS (MEMS)

Kousseil BEN AHMED

ABSTRACT

The electromechanical systems (MEMS) are an emergent technology which is of great interest in the development of several technological fields like the radio frequency (RF) and microwaves. Thanks to their agility, RF MEMS circuits are becoming widely used in many applications such as filtering, switching and impedance matching. However, the design of such components requires modeling and complex analysis involving both electrical and mechanical fields. In this project, we studied the importance of physics based simulations of RF MEMS components. We compared the precision and the performance of various simulators using the structures of capacitor multiple-fingers. We were able to show the importance of electromechanical coupling in the simulators, which can well predict the behavior of the structure around the pull-in voltage. We used these simulators to design a capacitance range from 0.29 pF to 5 pF to achieve bandpass filter covering the frequency band between 1.5GHz and 2GHz. Although our design was successful, the required voltage control has been quite high, in the range of 300V; for the used structure of multiple-fingers. In order to validate our design process based on physical simulations, we have designed; fabricated and tested a parallel plate capacitor which the voltage control is only in the range of 15V.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 FILTRE RF À CAPACITÉ VARIABLE.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Les différentes topologies de filtres accordables.....	3
1.3 Simulation des filtres	4
1.4 Conclusion	16
CHAPITRE 2 CAPACITÉ MEMS.....	17
2.1 Introduction.....	17
2.2 État de l'art.....	19
2.3 Différentes techniques d'actionnement des capacités MEMS.....	21
2.4 Modélisation de capacité à plaques parallèles dans le domaine électrostatique.....	21
2.5 Limite de stabilité de la capacité à plaques parallèles	24
2.6 Modélisation de capacité multi-doigts dans le domaine électrostatique.....	26
2.7 Modèle mécanique de la capacité MEMS	31
2.8 Conclusion	32
CHAPITRE 3 SIMULATION DES CAPACITÉS MEMS	34
3.1 Introduction.....	34
3.2 Modélisation par éléments finis.....	35
3.3 Analyse électro-mécanique :.....	37
3.4 Les simulateurs physiques tridimensionnels.....	37
3.4.1 Les outils commerciaux disponibles.....	38
3.4.2 Variables de l'analyse électro-mécanique	40
3.4.3 Génération des masques.....	40
3.4.4 Comparaison entre simulateurs.....	41
3.4.5 Simulation de la capacité multi-doigts.....	46
3.5 Conclusion	51
CHAPITRE 4 FABRICATION.....	53
4.1 Introduction.....	53
4.2 Présentation de la structure de base à fabriquer.....	54
4.3 Généralités sur les matériaux	55
4.4 Processus de fabrication.....	56
4.4.1 Les contraintes de fabrication	57
4.4.1.1 Dépôt de couches métalliques.....	57
4.4.1.2 Lithographie.....	57
4.4.1.3 Gravure	59
4.4.2 Fabrication de la capacité.....	60
4.5 Mesures.....	62

4.5.1	Extraction de la capacité	62
4.5.2	Résultats et interprétations.....	64
4.6	Conclusion	66
CONCLUSION.....		68
ANNEXE I Programme de simulation électro–mécanique avec Ansys.....		70
BIBLIOGRAPHIE.....		77

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Paramètres L et C retrouvés avec la première topologie	8
Tableau 1.2 Paramètres L et C retrouvés avec la deuxième topologie	12
Tableau 2.1 Résumé des travaux de recherche de l'équipe de Darrin J. Young	20
Tableau 2.2 Capacité à deux et 3 plaques parallèles.....	20
Tableau 3.1 Comparaison des performances entre Cosmos et Ansys	43
Tableau 3.2 Effet de l'épaisseur sur la valeur de capacité à plaques parallèles	45
Tableau 3.3 Tension à appliquée pour concevoir des filtres ajustables.....	51
Tableau 4.1 Fonctions de quelques substrats utilisés dans la microfabrication.....	56
Tableau 4.2 Valeurs de capacité fabriquée	65

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Filtre du troisième ordre à capacité et bobine variables3
Figure 1.2	Filtre du troisième ordre à capacités variables et inductances fixes4
Figure 1.3	Filtre passe bande 1 GHz à capacités et inductances variables5
Figure 1.4	Paramètre S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.35
Figure 1.5	Paramètre S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.35
Figure 1.6	Filtre passe bande 1.5 GHz à capacités et inductances variables6
Figure 1.7	Paramètre S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.66
Figure 1.8	Paramètre S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.66
Figure 1.9	Filtre passe bande 2 GHz à capacités et inductances variables7
Figure 1.10	Paramètre S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.97
Figure 1.11	Paramètre S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.97
Figure 1.12	Filtre passe bande 1 GHz, à capacités variables et inductances fixes.....9
Figure 1.13	Paramètres S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.12.....9
Figure 1.14	Paramètres S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.12.....9
Figure 1.15	Filtre passe bande 1.5 GHz, à capacités variables et inductances fixes.....10
Figure 1.16	Paramètres S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.15.....10
Figure 1.17	Paramètres S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.15.....10
Figure 1.18	Filtre passe bande 2 GHz, à capacités variables et inductances fixes.....11
Figure 1.19	Paramètres S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.18.....11
Figure 1.20	Paramètres S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.18.....11
Figure 1.21	Paramètres S_{21} avec un taux de fluctuation de 1%13
Figure 1.22	Paramètres S_{11} avec un taux de fluctuation de 1%13

Figure 1.24	Paramètres S_{21} avec un taux de fluctuation de 2%	14
Figure 1.25	Paramètres S_{11} avec un taux de fluctuation de 2%	14
Figure 1.26	Paramètres S_{21} avec un taux de fluctuation de 3%	15
Figure 1.27	Paramètres S_{11} avec un taux de fluctuation de 3%	15
Figure 2.1	Utilisation des composants MEMS dans un récepteur superhétérodyne ...	18
Figure 2.2	Schéma de principe d'une capacité à plaques parallèles	22
Figure 2.3	Les effets de bords d'une capacité à plaques parallèles.....	26
Figure 2.4	Principe de la capacité multi-doigts.....	27
Figure 2.5	La capacité résultante est la somme de N capacités	27
Figure 2.6	Distribution de champs entre les doigts de la capacité	28
Figure 2.7	Ressort rectangulaire.....	32
Figure 3.1	Exemple des éléments FEM	36
Figure 3.2	Principe d'analyse couplée	37
Figure 3.3	Étapes de conception du microsysteme	38
Figure 3.4	Exemple de règles de dessin	41
Figure 3.5	Comparaison des différentes d'étapes de simulation.....	42
Figure 3.6	Valeur de capacité obtenue simultanément avec Cosmos et Ansys.	43
Figure 3.7	Déplacement simulé par les deux logiciels.....	44
Figure 3.8	Simulation du déplacement de la plaque mobile avec le logiciel	46
Figure 3.9	Déplacement à la tension V_1	47
Figure 3.10	Déplacement à la tension $V_2 > V_1$	47
Figure 3.11	Capacité et force électrostatique calculées avec Cosmos	49
Figure 3.12	Tension appliquée en fonction de la capacité	49
Figure 3.13	Les effets de bords (fringing field)	50

Figure 4.1	(a) Gravure des doigts fixes sur silicium, (b) dépôt de la partie mobile....	53
Figure 4.2	Structure MEMS fabriquée.....	54
Figure 4.3	Capacité MEMS avec les trous sur la plaque supérieure.....	55
Figure 4.4	Schéma bloc d'un procédé de photolithographie.....	59
Figure 4.5	Vue de dessus de la capacité fabriqué.....	61
Figure 4.6	Coupe de la structure fabriquée prise par	61
Figure 4.7	Premier modèle choisi pour l'extraction des paramètres de la structure ...	63
Figure 4.8	Paramètres S_{11} et S_{21} du modèle de la Figure 4.7 et des résultats expérimentaux.....	63
Figure 4.9	Deuxième modèle choisi pour l'extraction des différents paramètres de la structure	64
Figure 4.10	Paramètres S_{11} et S_{21} du modèle de la Figure 4.8 et des résultats expérimentaux.....	64
Figure 4.11	Impureté sur le substrat avec une sur-gravure	66

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

MEMS	micro electro mechanical systems
RF	Radio Fréquence
BP	Bande Passante
IF	Fréquence Intermédiaire
ADS	Advanced Design System
dB	Unité de mesure en décibels
E	module de Young en GPa
Si	Silicium
Al	Aluminium
k	Raideur du ressort (N/m)
ϵ_0	Constante absolue de diélectrique (vide)
ϵ_r	Constante relative de diélectrique
V	Tension
I	Courant
pF	Picofarad
C_f	Capacité parasite

INTRODUCTION

Le développement de l'industrie RF nécessite la miniaturisation des circuits électroniques et leur intégration sur un seul substrat épousant des formes de plus en plus complexes ainsi que réduire les différentes sources de bruits. Le besoin d'économiser de l'énergie en vue d'utiliser des petites sources d'alimentation, avec une autonomie acceptable et d'avoir des circuits de plus en plus rapides a poussé vers le développement de nouveaux circuits. Ces derniers doivent répondre aux critères de performance de plus en plus sévères en termes de précision, rapidité, consommation et d'immunité aux bruits. Ces circuits auront l'aptitude de s'adapter à des situations complexes et doivent être capable de s'auto-corriger suivant un algorithme prédéfini. Des tels circuits dits intelligents.

C'est dans ce cadre, que le présent travail a été réalisé dans le but de concevoir et de réaliser un filtre RF accordable. Le filtre en question est composé d'un minimum de composants ajustables qui couvrent une large bande de fréquences afin de répondre aux demandes d'une variété d'applications suivant les différents normes américaines et européennes.

Dans le présent chapitre, nous déterminons les caractéristiques de la capacité à concevoir et ce, à partir des résultats de simulation d'un filtre RF passe-bande à accord variable.

Le deuxième chapitre commence par une présentation de la technologie MEMS suivie d'une revue de la littérature sur les techniques de conception des capacités MEMS. Par la suite, nous présentons l'étude théorique des deux architectures de capacité. La première consiste en une structure à plaques parallèles. La deuxième architecture est une capacité multi-doigts. Nous citons les avantages et les limites de chaque structure.

Dans le troisième chapitre, deux outils de simulation des structures MEMS sont décrits, ainsi que le principe de modélisation par élément fini sera présenté. Une étude comparative entre ces deux outils a permis la validation des résultats d'analyse et les résultats de simulation à

partir d'une structure de base à plaque parallèle. Nous terminons ce chapitre par les résultats de simulation de la capacité multi-doigt visée.

Le quatrième chapitre a pour but d'exposer les notions de base sur les processus de fabrication MEMS et les différents matériaux utilisés. Ensuite, nous présentons la technique utilisée pour fabriquer une structure de capacité MEMS à plaques parallèles. Cette technique permet de déterminer les différents paramètres et les effets parasites. La fin du chapitre sera consacrée à la comparaison des simulateurs et à la discussion des problèmes rencontrés lors de la fabrication et de la prise des mesures.

Nous terminons ce travail par une conclusion dans laquelle nous proposons une synthèse des principales clés élaborées dans cette recherche, et nous discutons des contributions apportées avant de présenter quelques suggestions pour des travaux futurs.

CHAPITRE 1

FILTRE RF À CAPACITÉ VARIABLE

1.1 Introduction

Ce chapitre comprend deux parties. Dans la première, on présente deux topologies de filtres analogiques RF passe-bande. On présente également les critères sur lesquelles se base notre choix de topologie. Dans la seconde partie, on présente les résultats de la simulation ADS lancé sur la base du modèle choisi, pour extraire les paramètres du filtre en question.

1.2 Les différentes topologies de filtres accordables

Trouver un filtre passe bande variable, centré sur une fréquence f_0 avec une bande passante BP et couvrant une large bande de fréquences sans devoir accorder des inducteurs représente un défi majeur.

Typiquement, changer la fréquence centrale d'un filtre passe bande tout en maintenant la même largeur de bande entraîne le changement des valeurs des inductances en série et des condensateurs qui sont en parallèle dans chacun des résonateurs (Figure 1.1).

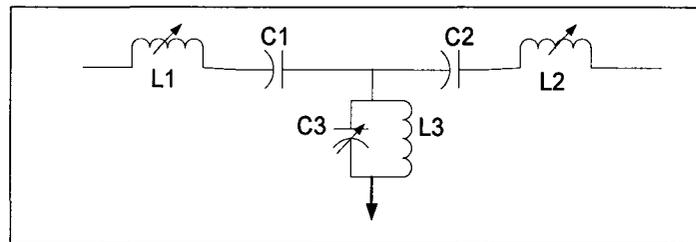


Figure 1.1 Filtre du troisième ordre à capacité et bobine variables

Un filtre réglable avec des inductances fixes et des condensateurs ajustables permet de déterminer la plage de variation des capacités à concevoir et ceci en utilisant la technique d'inversement d'impédance [1] tel que montré à la Figure 1.2.

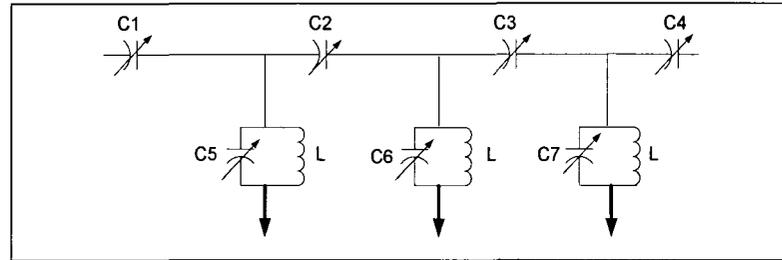


Figure 1.2 Filtre du troisième ordre à capacités variables et inductances fixes

Pour arriver à une solution optimale, certains condensateurs doivent être beaucoup plus ajustés que d'autres.

On remarque que le deuxième modèle présente moins de types de composants à ajuster (que des capacités) ce qui permettra par la suite de simplifier la réalisation du produit. Pour cela le choix du second modèle s'impose.

1.3 Simulation des filtres

On voudrait couvrir une large bande de fréquence qui peut aller de 1 à 2 GHz avec une bande passante de 200MHz. Le filtre désiré est un filtre de Chebyshev troisième ordre (avec ondulation de 0,1 à 3 dB), ce type de filtre est mieux adapté à notre situation car sa pente d'atténuation hors bande est très importante.

Les résultats ci-dessous représentent les solutions retrouvés avec les deux topologies.

➤ Première topologie

- Pour la fréquence centrale $f_0 = 1$ GHz

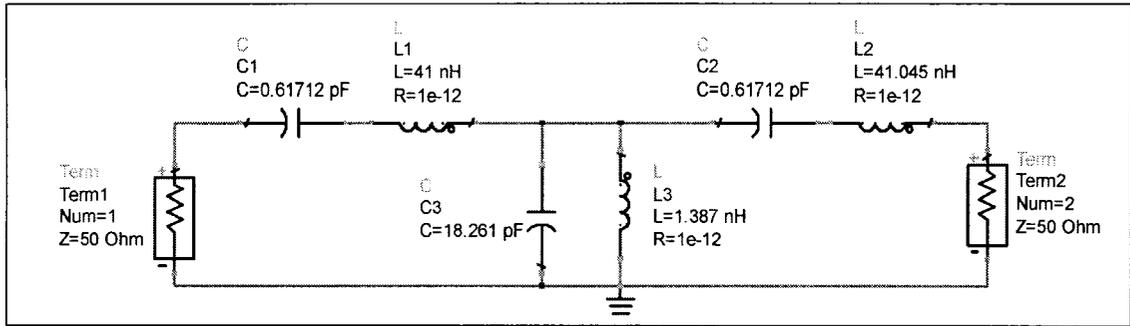


Figure 1.3 Filtre passe bande 1 GHz à capacités et inductances variables

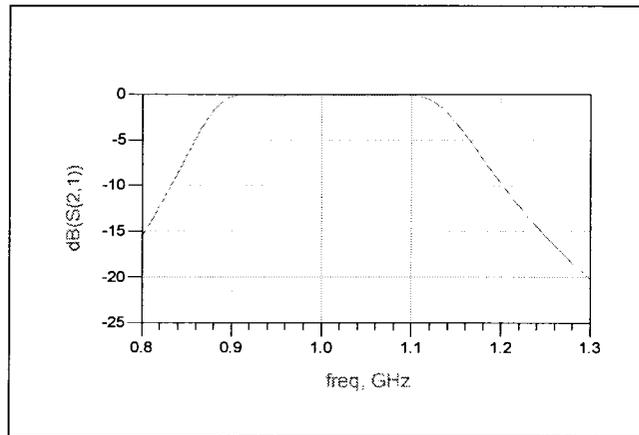


Figure 1.4 Paramètre S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.3

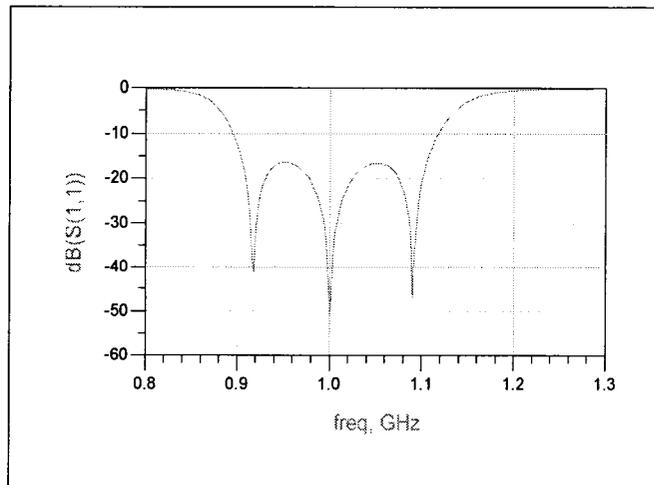


Figure 1.5 Paramètre S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.3

- Pour la fréquence centrale $f_0 = 1.5$ GHz

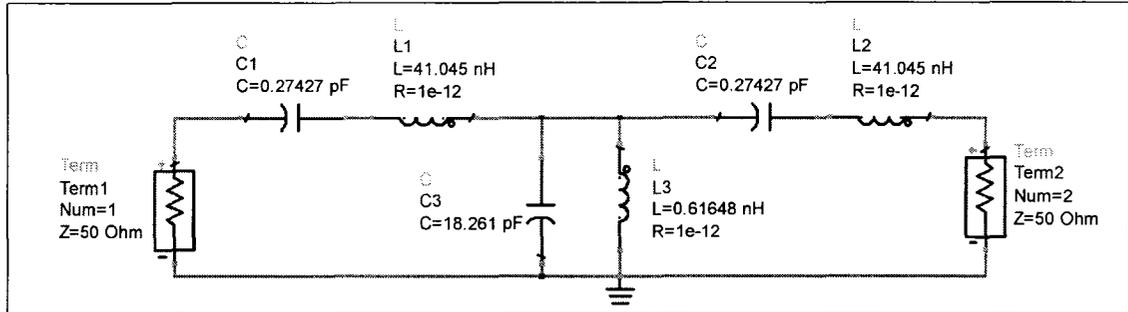


Figure 1.6 Filtre passe bande 1.5 GHz à capacités et inductances variables

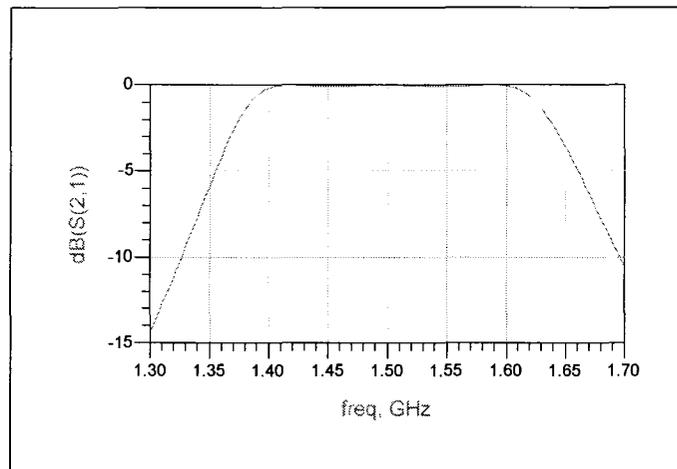


Figure 1.7 Paramètre S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.6

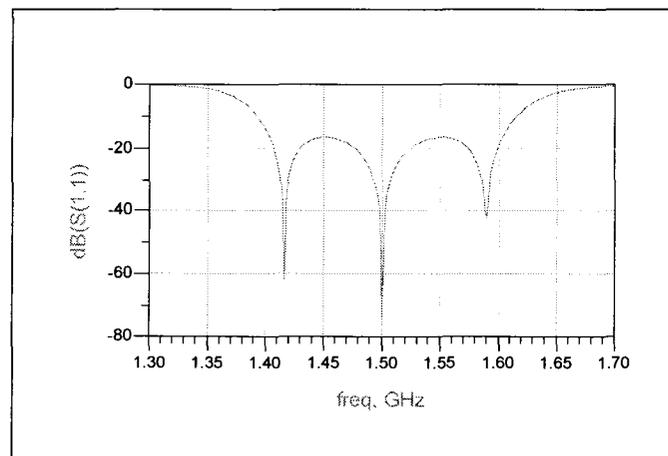


Figure 1.8 Paramètre S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.6

- Pour la fréquence centrale $f_0 = 2$ GHz

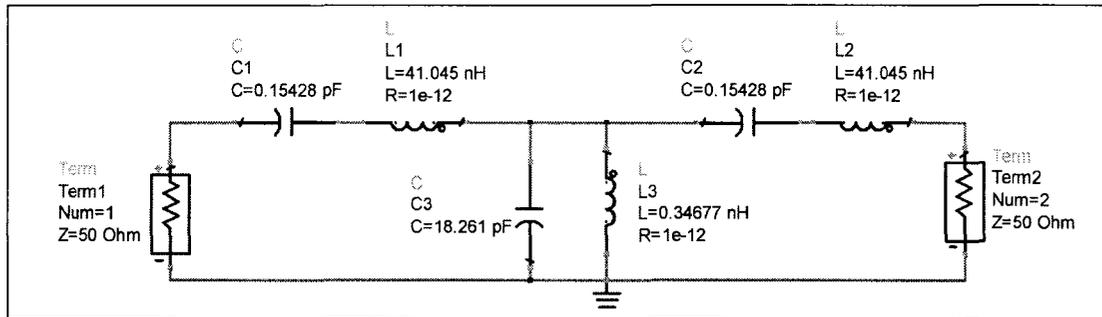


Figure 1.9 Filtre passe bande 2 GHz à capacités et inductances variables

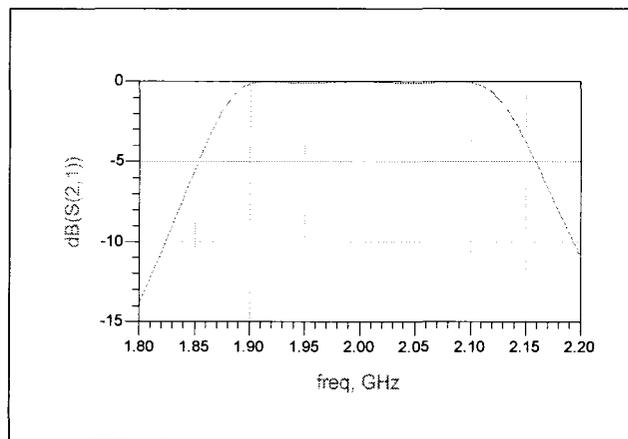


Figure 1.10 Paramètre S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.9

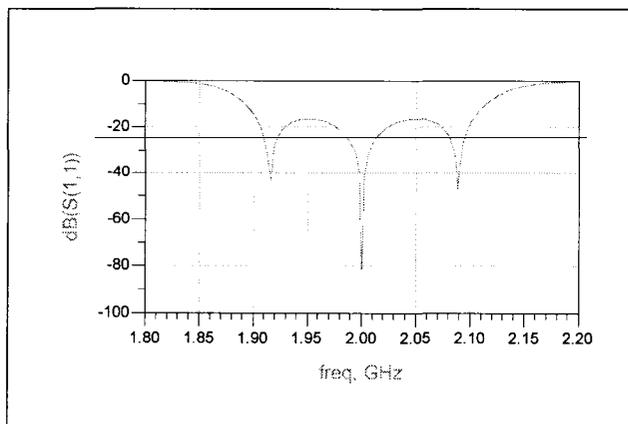


Figure 1.11 Paramètre S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.9

Les paramètres S nous montrent que ces filtres sont bien centrés sur la fréquence centrale et rejettent bien toutes les fréquences hors bande. Les filtres ont la même impédance à l'entrée et à la sortie (i.e. 50 ohms) d'où une symétrie au niveau des composants L et C. Le tableau suivant résume les valeurs des composants L et C trouvés.

Tableau 1.1
Paramètres L et C retrouvés avec la première topologie

Fréquence Paramètre	1 GHz	1.5 GHz	2 GHz
L ₁	41.045 nH	41.045 nH	41.045 nH
C ₁	0.617 pF	0.274 pF	0.1542 pF
L ₂	41.045 nH	41.045 nH	41.045 nH
C ₂	0.617 pF	0.2742 pF	0.1542 pF
L ₃	1.387 nH	0.6164 nH	0.3467 nH
C ₃	18.261 pF	18.261 pF	18.261 pF

➤ deuxième topologie

Pour minimiser le temps de calcul et pour obtenir rapidement la solution optimale après avoir fixé l'inductance à 2nH, on choisi des composants symétriques à l'entrée et à la sortie du circuit c'est à dire (C1=C4, C2=C3 et C5=C7) puisqu'on a la même impédance à l'entrée et à la sortie du filtre [2].

La simulation par ADS du modèle choisi a permis de trouver les valeurs optimales en fonction de la fréquence de fonctionnement centrale.

Les figures ci-dessous représentent les résultats des simulations faites sur chaque circuit.

- Pour la fréquence centrale $f_0 = 1$ GHz

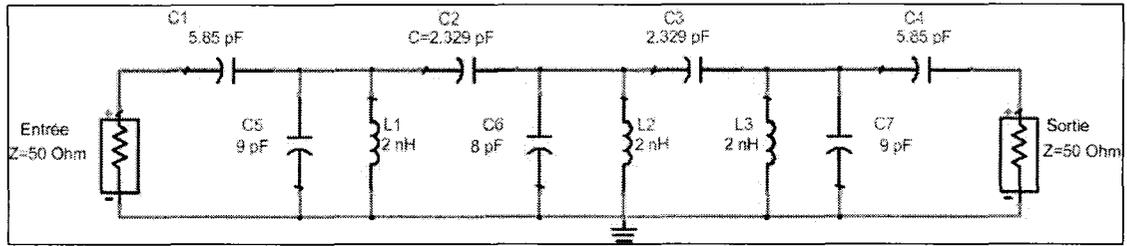


Figure 1.12 Filtre passe bande 1 GHz, à capacités variables et inductances fixes

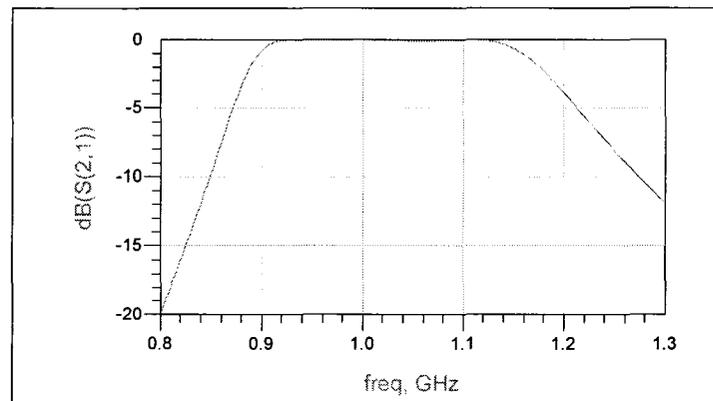


Figure 1.13 Paramètres S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.12

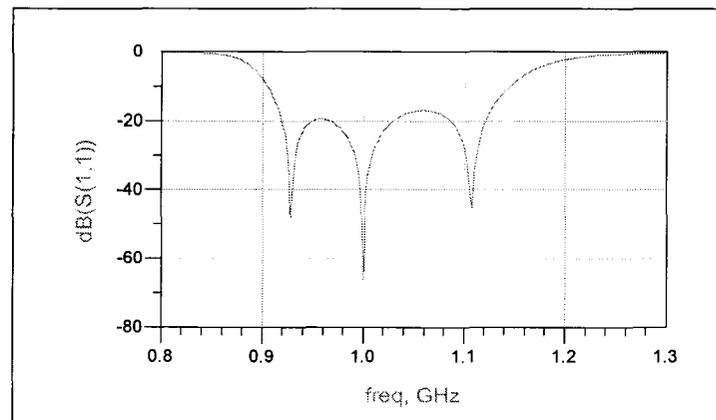


Figure 1.14 Paramètres S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.12

- Pour la fréquence centrale $f_0 = 1.5\ \text{GHz}$

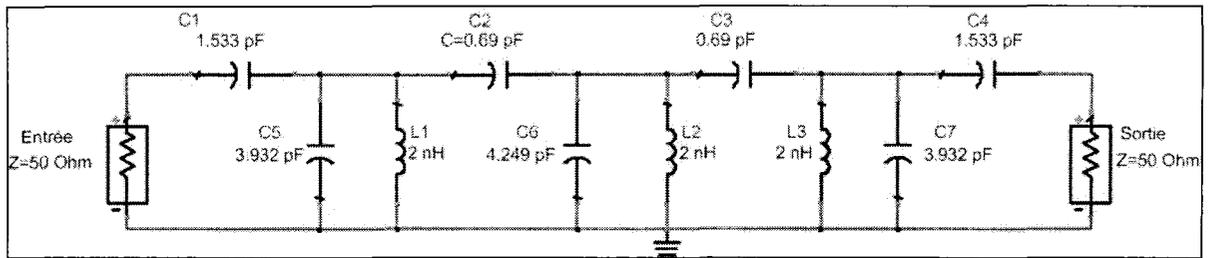


Figure 1.15 Filtre passe bande 1.5 GHz, à capacités variables et inductances fixes

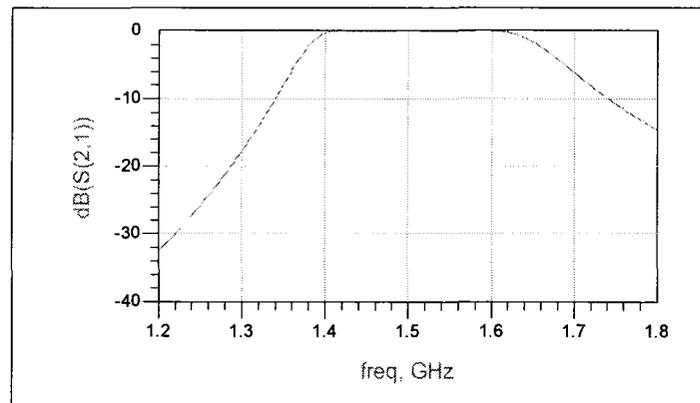


Figure 1.16 Paramètres S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.15

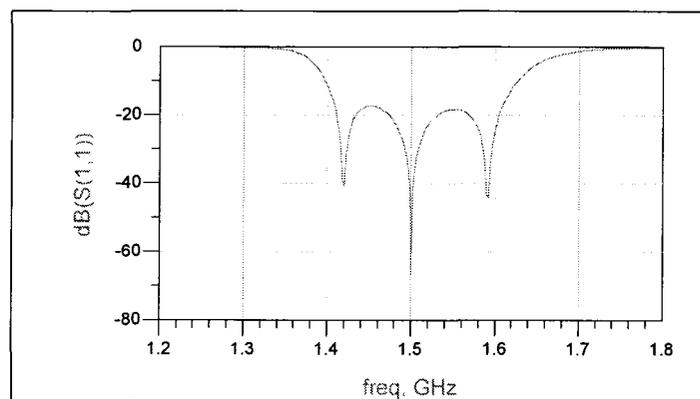


Figure 1.17 Paramètres S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.15

- Pour la fréquence centrale $f_0 = 2\text{GHz}$

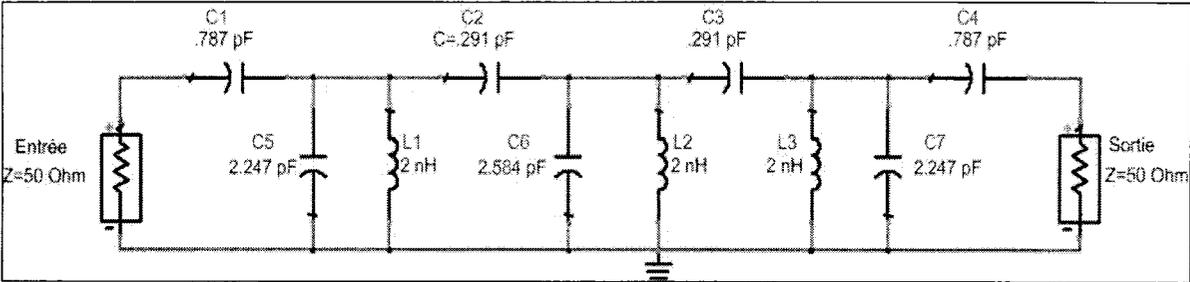


Figure 1.18 Filtre passe bande 2 GHz, à capacités variables et inductances fixes

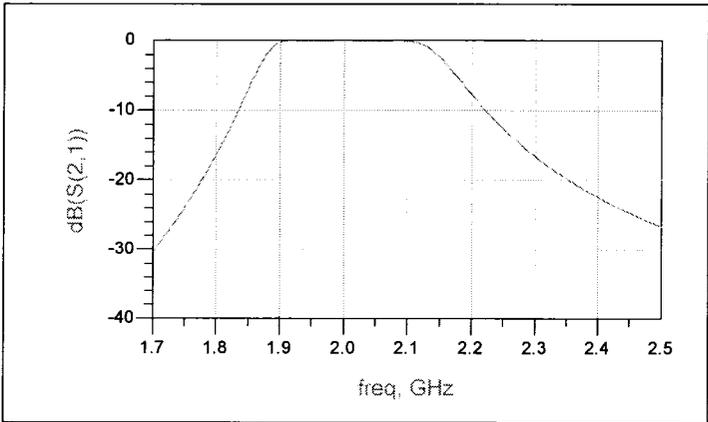


Figure 1.19 Paramètres S_{21} pour le filtre représenté dans la Figure 1.18

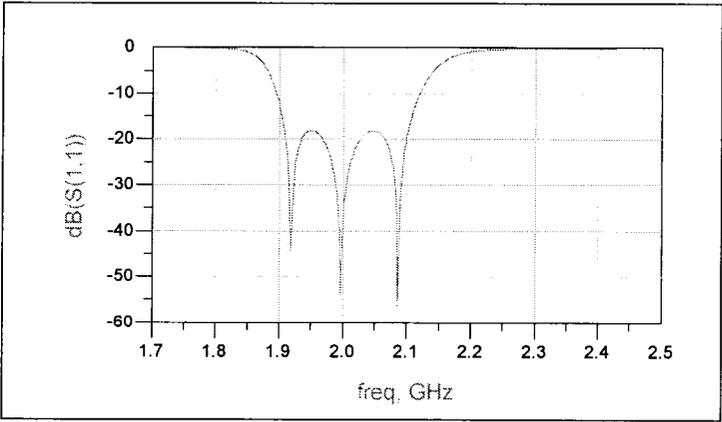


Figure 1.20 Paramètres S_{11} pour le filtre représenté dans la Figure 1.18

Ces structures présentent un coefficient de réflexion (*return loss*) (S_{11}) minimal. Ce paramètre est inférieur à -18 dB pour toutes les fréquences de la bande passante et plus bas que -50dB pour la fréquence centrale. Pour le paramètre (S_{21}), il est proche de 0 dB pour toutes les fréquences de la bande passante.

Le tableau suivant résume les différentes valeurs des capacités trouvées.

Tableau 1.2
Paramètres L et C retrouvés avec la deuxième topologie

Fréquence Capacité	1 GHz	1.5GHz	2GHz
C1 (pF)	5.85	1.53	0.787
C2 (pF)	2.32	0.69	0.291
C3 (pF)	2.32	0.69	0.291
C4 (pF)	5.85	1.53	0.787
C5 (pF)	9	3.93	2.24
C6 (pF)	8	4.24	2.58
C7 (pF)	9	3.93	2.24

Une étude de sensibilité des filtres conçus en fonction des capacités, a été réalisée. Nous avons introduit différentes variations de ces capacités autour de leurs valeurs nominales et étudié la réponse du filtre associé à ces variations. Cette étude a été réalisée par l'outil de simulation ADS pour le cas du filtre dont la fréquence centrale est de 1.5 GHz. Les résultats obtenus (paramètres S_{11} et S_{21}) sont illustrés dans les figures suivantes :

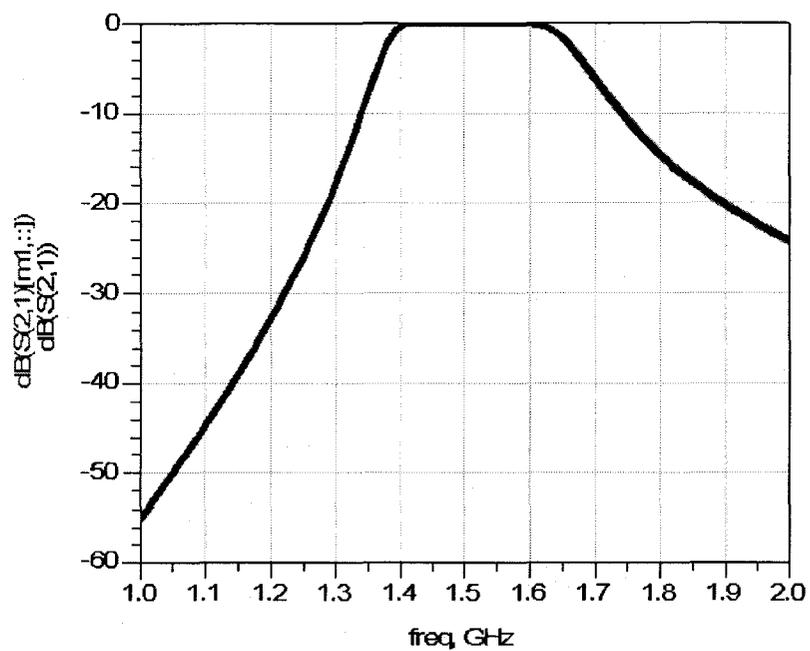


Figure 1.21 Paramètres S_{21} avec un taux de fluctuation de 1%

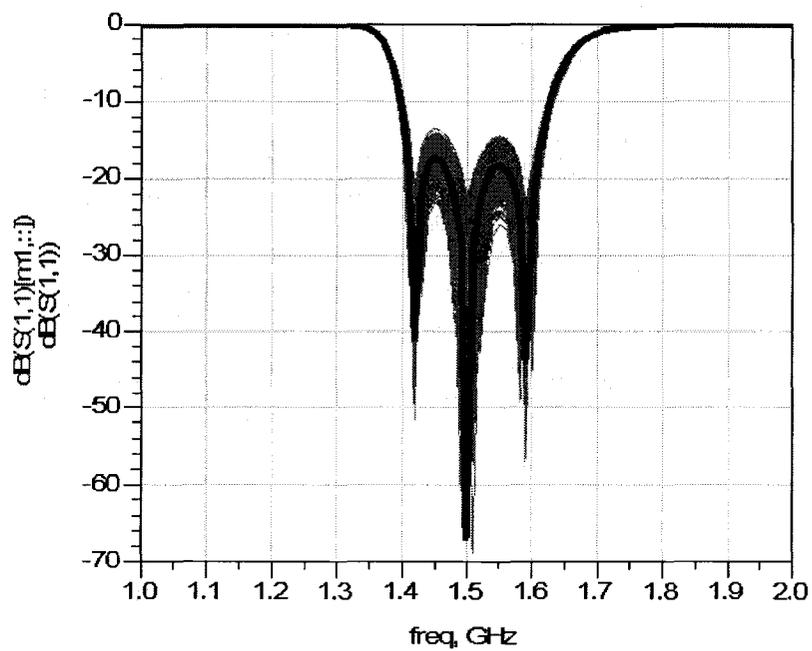


Figure 1.22 Paramètres S_{11} avec un taux de fluctuation de 1%

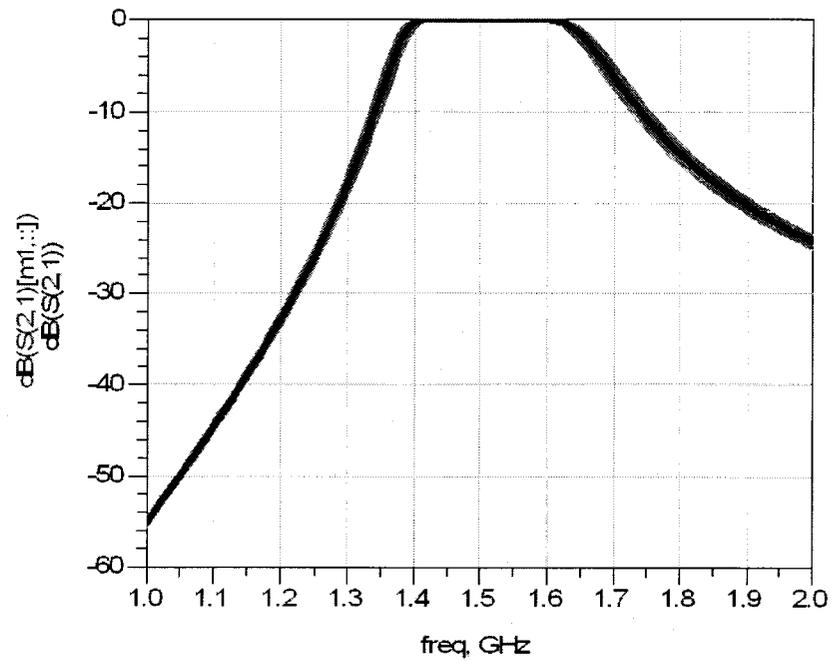


Figure 1.23 Paramètres S_{21} avec un taux de fluctuation de 2%

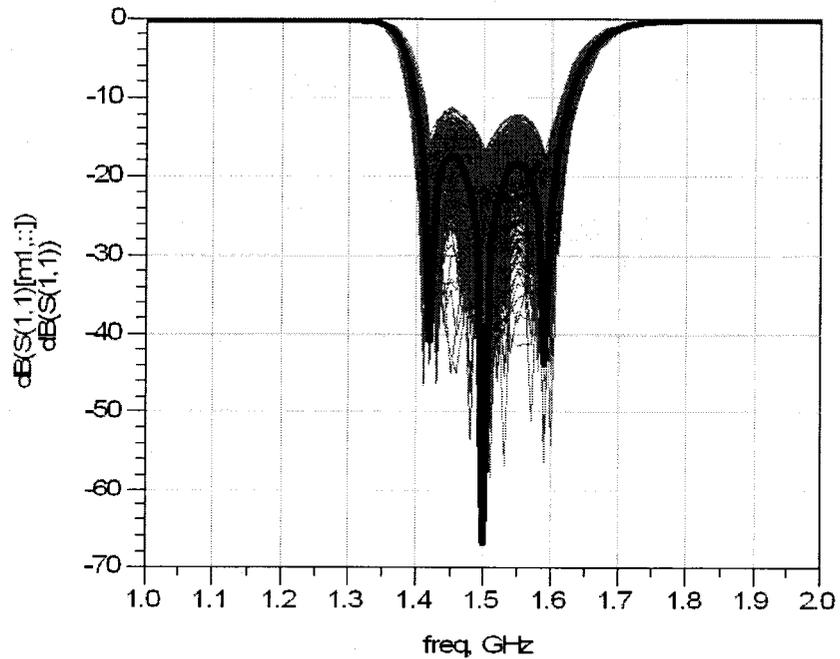


Figure 1.24 Paramètres S_{11} avec un taux de fluctuation de 2%

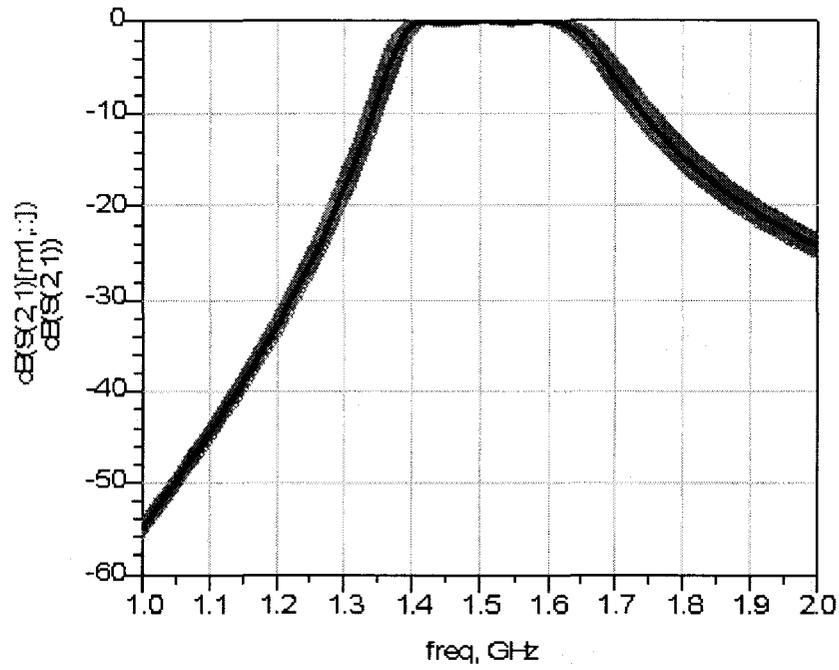


Figure 1.25 Paramètres S_{21} avec un taux de fluctuation de 3%

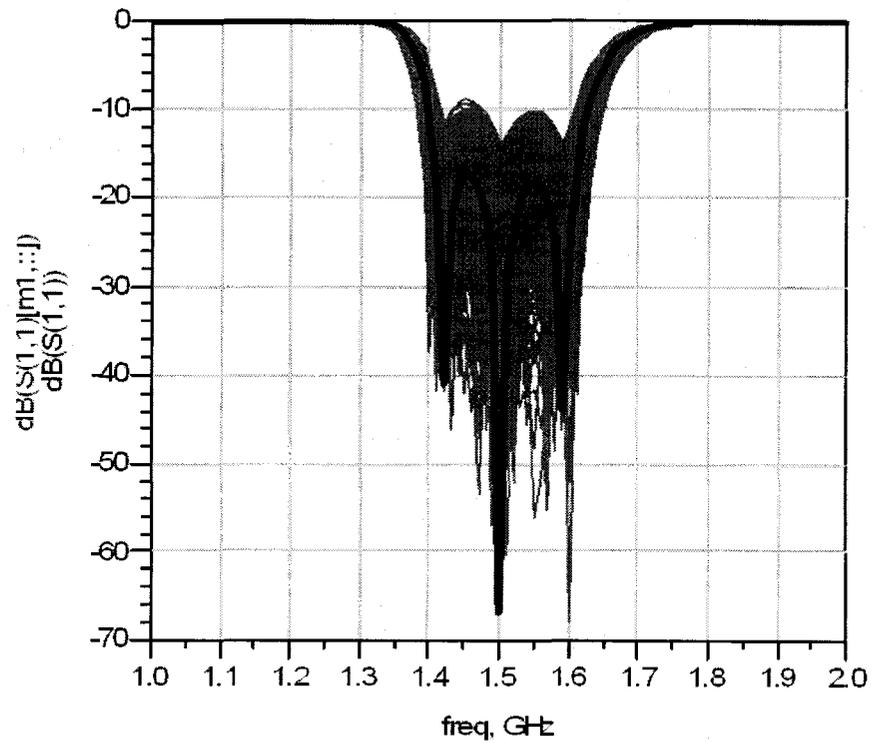


Figure 1.26 Paramètres S_{11} avec un taux de fluctuation de 3%

La courbe foncée, représente la réponse nominale du filtre. Les courbes claires correspondent aux différentes fluctuations dues à la variation des capacités. Nous remarquons, que pour une variation au delà de 3%, la réponse S_{11} est très dégradée et la rejection du filtre est détériorée. Nous observons le paramètre S_{21} est peu sensible aux fluctuations des capacités. Pour déterminer cette sensibilité nous avons simulé grâce à l'outil ADS, la réponse du filtre dont la fréquence centrale est de 1.5 GHz, et ceci pour des différents taux de variation tout en observant S_{11} et S_{21} .

1.4 Conclusion

Pour couvrir toute la bande de 1Ghz jusqu'à 2Ghz avec une largeur de bande de 20MHz tout en fixant les inductances à 2 nH on a besoin des capacités variables qui peuvent aller de 0.29 pF jusqu'à 9 pF, c'est à dire un rapport $\frac{C_{\max}}{C_{\min}}$ supérieur à 30. Le filtre qu'on a trouvé est bien adapté avec un taux de fluctuation des capacités de 3%.

Pour répondre à un tel besoin il faut imaginer une nouvelle capacité, différente de l'architecture classique. Concevoir et réaliser des micro-capacités variables, répondant aux spécifications imposées, représente un défi que seul la mise au point de techniques novatrices permettra de relever. La technologie MEMS permet de répondre à cette exigence.

CHAPITRE 2

CAPACITÉ MEMS

2.1 Introduction

Les microsystemes connus sous l'abréviation MEMS « *micro electro mechanical systems* », sont des systèmes miniaturisés, qui combinent des éléments mécaniques, optiques, thermiques, électromagnétiques, et fluidiques à de l'électronique sur des substrats semi-conducteurs. Les dimensions de fabrication peuvent aller des micromètres à quelques millimètres.

Les avantages reliés à la miniaturisation de certains dispositifs sont la réduction des coûts de fabrication, du poids, de la complexité, de la consommation d'énergie et surtout l'amélioration de la fiabilité, du temps de réponse, de la sensibilité et de l'intégration. Cela permet une multitude de nouvelles applications dans divers domaines tels que l'industrie de l'automobile, les télécommunications, l'aérospatiale et la biomédicale.

Grâce aux microsystemes, les paramètres physiques d'un environnement donné tels que la pression, la température, l'accélération, choc etc. peuvent être capturés pour être ensuite acheminer vers des actionneurs qui réagissent sur cet environnement ou bien sur le monde extérieur.

Dans la dernière décennie, la technologie MEMS a connu un développement remarquable dans les procédés de fabrication offrant la possibilité de fabriquer des composants passifs RF (radio fréquence) de petites dimensions.

La Figure 2.1 [3] illustre un exemple d'utilisation des technologies MEMS dans un récepteur superhétérodyne. Elle montre les remplacements potentiels par l'intermédiaire des composants de base MEMS Ayant une faible consommation d'énergie et des paramètres

ajustables, ces composantes RF permettent des performances équivalentes et parfois meilleures que celles des composantes conventionnelles.

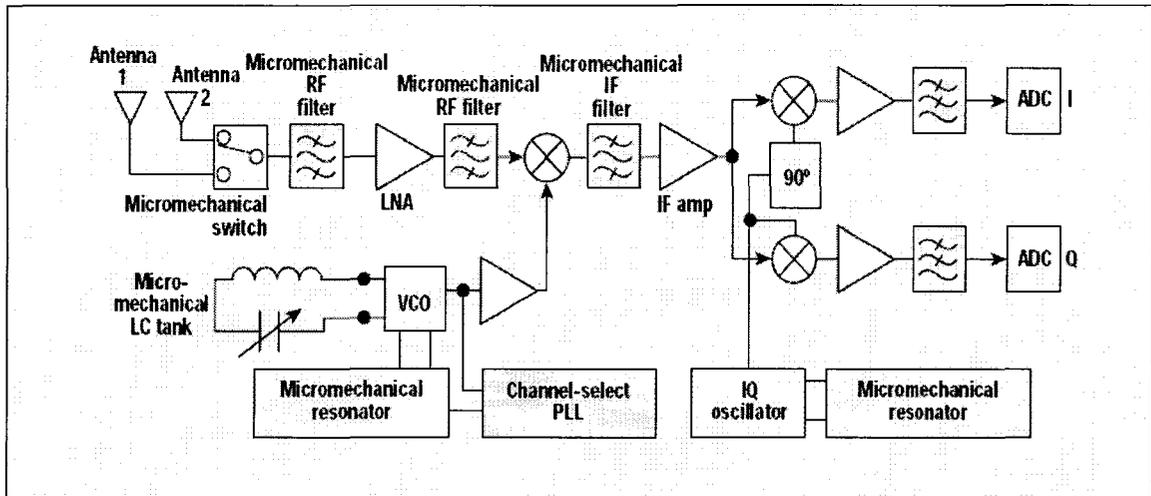


Figure 2.1 Utilisation des composants MEMS dans un récepteur superhétérodyne (Tiré de wireless system design 2003 [3])

Comme exemple de ces composants, nous pouvons citer les micro-commutateurs, les filtres micromécaniques RF et IF (fréquence intermédiaire), les capacités variables ou les inductances micro usinées.

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.

Après une étude bibliographique détaillée du sujet, nous allons élaborer un modèle de capacité adéquat pour des applications de filtrage RF et nous mettrons en œuvre une évaluation de sa fiabilité.

En particulier, nous étudierons les différentes approches des modèles (analogie force-tension) pour définir celles qui permettent d'obtenir la capacité recherchée avec un très bon facteur de qualité ainsi que définir les autres paramètres comme la capacité parasite, pertes, etc.

Une attention toute particulière sera accordée aux phénomènes des effets de bord ainsi qu'aux phénomènes de pertes, de bruit et d'alimentation. Les contraintes qui seront envisagées seront d'ordre mécanique et électrique.

2.2 État de l'art

La majorité des capacités MEMS présentées dans les littératures se compose d'une plaque métallique suspendue par quatre ressorts au dessous de laquelle se trouve une autre plaque qui peut être aussi en métal ou en polysilicium dopé. Pour éviter les problèmes de limite de stabilité qui limite la plage de variation, deux solutions sont développées. La première consiste à augmenter le nombre de plaques parallèles ce qui permet d'augmenter le ratio de la capacité à 50% [4-9]. Le changement de la géométrie de la plaque mobile, serait la seconde solution[10;11].

En 1998 une équipe de l'université de Californie, a construit et a testé une capacité variable fabriqué en utilisant le processus CMOS. Toute la structure a été faite en aluminium y compris les ressorts [5;12] ce qui a réduit énormément sa résistance. Le composant de base est formé par deux plaques de 200 μm x 200 μm chacune et les mesures ont été prises en deux occasions comme le montre le Tableau 2.1.

Tableau 2.1

Résumé des travaux de recherche de l'équipe de Darrin J. Young

	Nombre de plaques	Capacité mesurée	$\frac{C_{max}}{C_{min}}$	Tension de contrôle	Facteur de qualité à 1GHz
1ère mesure	4 plaques	2.11 pF à 2.46 pF	1.16:1	0-5.5v	62
2ème mesure	4 plaques	2.04 pF à 2.35 pF	1.15:1	0-3v	60

Un autre groupe a refait la même structure [7;8;13;14] en utilisant le processus MUMPS fabriqué avec la superposition des couches de polysilicium (légèrement dopé) et de l'or. Ils ont conçu 2 modèles différents :

- Le 1er modèle est deux capacités à plaques parallèles suspendues par 4 ressorts de dimensions respectives $210 \mu\text{m} * 230 \mu\text{m}$ et $295 \mu\text{m} * 295 \mu\text{m}$.
- Le deuxième modèle est complètement différent des autres travaux, il s'agit d'une capacité variable à trois plaques parallèles au lieu de deux. Ceci a permis l'augmentation de la plage de variation de 87%. Le tableau suivant résume les résultats trouvés.

Tableau 2.2

Capacité à deux et 3 plaques parallèles

	Aire active	Capacité	$\frac{C_{max}}{C_{min}}$	Tension de contrôle	Q à 1GHz
2 plaques	$210 \mu\text{m} \times 230 \mu\text{m}$	2.05 pF à 3.1 pF	1.5:1	0-4v	20
2 plaques	$295 \mu\text{m} \times 295 \mu\text{m}$	3.26 pF à 4.89 pF	1.5:1	0-3.5v	13.6
3 plaques	$400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$	4 pF à 7.48 pF	1.87:1	0-1.8v 0 et 0-4.4v	15.4

2.3 Différentes techniques d'actionnement des capacités MEMS

Différents technologies sont disponibles pour la commande des capacités variables, parmi ces technologies on peut citer :

- Les capacités électrothermiques qui sont commandées par une source de chaleur variable. La structure est composée par la superposition de couches à coefficients de dilatation thermique différents. Chaque variation thermique se traduit par une dilatation de longueur différente pour chacune des couches. Ceci est exprimé par une charge F appliquée à l'extrémité de la partie mobile. Ce type de capacité ne sont pas souhaitable car elles sont commandées thermiquement et ceci les rends très sensible aux variations thermiques de l'environnement.
- Les capacités à actionnement magnétique : leur principe de fonctionnement est basé sur le changement de dimensions d'un matériau ferromagnétique ou magnétostrictif sous l'influence d'un champ magnétique, ce qui provoque une flexion de la partie mobile de la structure. Ce type d'actionnement est peu utilisé à cause de sa complexité et la nécessité d'un grand champ magnétique de commande.
- Les capacités électrostatiques : leur principe de fonctionnement est simple il se base sur l'attraction électrostatique entre électrode fixe et mobile lorsqu'on applique une tension entre eux.

Les capacités électrostatiques se distinguent par leur simplicité d'utilisation et de commande ainsi que leur consommation nulle en statique, ce qui les rend attractifs.

2.4 Modélisation de capacité à plaques parallèles dans le domaine électrostatique

Parmi ce type de capacités figure les capacités à plaques parallèles. Elles sont composées de deux électrodes, une fixe et une autre mobile qui se déplace verticalement.

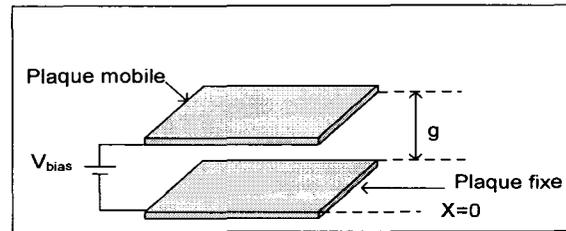


Figure 2.2 Schéma de principe d'une capacité à plaques parallèles

L'expression de capacité C est donnée par:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon \cdot A}{g} \quad (2.1)$$

où Q est l'amplitude de charge dans chaque plaque, ϵ est le constant diélectrique du matériel entre les plaques, g est l'espace entre les deux plaques.

Le champ électrique est exprimé par :

$$E = \frac{Q}{\epsilon \cdot A} \quad (2.2)$$

L'énergie stockée entre les deux plaques d'un condensateur est donnée par :

$$W(Q) = \int_0^Q V dQ = \int_0^Q \frac{Q}{C} dQ = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2 g}{2A\epsilon} \quad (2.3)$$

avec A est l'aire de chaque plaque de la capacité, g est l'espace entre les deux plaques, ϵ est la constante diélectrique du matériel entre les plaques, Q est l'amplitude de charge dans chaque plaque.

Alternativement, on peut trouver la même expression en considérant la force d'attraction entre les deux plaques de la capacité.

L'amplitude de force de chaque plaque est:

$$W(g) = \int_0^g F dg = F \cdot g = \frac{Q^2 g}{2A\epsilon} \quad (2.4)$$

L'énergie stockée entre les plaques parallèles d'une capacité variable dont la plaque mobile est supportée par un ressort peut être considérée comme une combinaison d'énergie électrique et énergie mécanique. L'énergie stockée $W(Q, g)$, est une fonction de la charge stockée Q et l'espace g entre les électrodes. Ce qui donne l'équation différentielle suivante [16]:

$$dW(Q, g) = F \cdot dg + V \cdot dQ \quad (2.5)$$

Par conséquent, on peut écrire l'expression de la force et de la tension comme suit:

$$F = \left. \frac{\partial W(Q, g)}{\partial g} \right|_Q \quad (2.6)$$

$$V = \left. \frac{\partial W(Q, g)}{\partial Q} \right|_g \quad (2.7)$$

En utilisant l'expression de l'énergie stockée, on peut écrire :

$$F = \left. \frac{\partial W(Q, g)}{\partial g} \right|_Q = \left. \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{Q^2 g}{2\epsilon A} \right) \right|_Q = \frac{Q^2}{2\epsilon A} \quad (2.8)$$

$$V = \left. \frac{\partial W(Q, g)}{\partial Q} \right|_g = \left. \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{Q^2 g}{2\epsilon A} \right) \right|_g = \frac{Qg}{\epsilon A} \quad (2.9)$$

On peut déduire F en fonction de V :

$$F = \frac{V^2 \cdot A \cdot \epsilon}{2g^2} \quad (2.10)$$

2.5 Limite de stabilité de la capacité à plaques parallèles

À l'équilibre, la somme des forces de la structure nulle [15].

$$\sum \hat{F} = \hat{F}_E + \hat{F}_S \quad (2.11)$$

La force d'attraction du ressort (F_S) et la force électrostatique (F_E), sont opposées l'une à l'autre ce qui implique:

$$\sum \hat{F} = \hat{F}_E + \hat{F}_S = \left(\frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{(g-x)^2} - k x \right) \hat{a}_x \quad (2.12)$$

Avec k est la raideur du ressort et x est le déplacement de la plaque mobile lorsqu'on applique une tension.

À l'équilibre:

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{(g-x)^2} - k x = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{(g-x)^2} = k x \quad (2.14)$$

Ce qui implique que:

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon A} x(g-x)^2} \quad (2.15)$$

Si on suppose que V_p représente la tension limite de stabilité. Cette valeur est déterminée lorsque $\frac{dV}{dx} = 0$

$$\frac{d}{dx} \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon A} x(g-x)^2} = 0 \rightarrow x = \frac{g}{3} \quad (2.16)$$

Il suffit de remplacer x par $\frac{g}{3}$ pour trouver la tension de limite de stabilité ou la tension d'effondrement [16] :

$$V_p = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{k g^3}{\varepsilon A}} \quad (2.17)$$

Le phénomène de limite de stabilité nous empêche, avec une capacité à plaque parallèle, de couvrir une très grande plage dynamique de variation.

L'expression de la capacité ne tient pas compte de la capacité parasite due principalement aux effets de bords. Si on présente par C_f cette capacité additionnelle (Figure 2.3), le ratio de la capacité devient:

$$C_r = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{\frac{\varepsilon A}{(2g/3)} + C_f}{\frac{\varepsilon A}{g} + C_f} = \frac{1.5 + \gamma}{1 + \gamma} \quad (2.18)$$

$$C_f = \gamma \varepsilon A / g = \gamma C \quad (2.19)$$

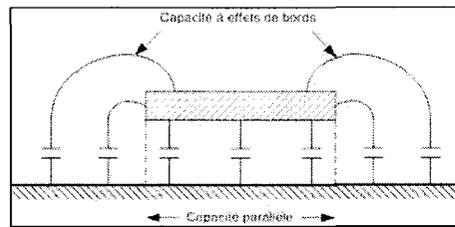


Figure 2.3 Les effets de bords d'une capacité à plaques parallèles

La majorité des capacités MEMS variables ont le paramètre C_r situé entre 0.15 et 0.6 ce qui ramène le ratio de capacité à une valeur située entre 1.27 et 1.42 [16].

Ce dernier rapport varie d'un simulateur à un autre et qui sera notre principal point de comparaison pour décider lequel parmi les outils qu'on utilise est plus proche des valeurs expérimentales.

2.6 Modélisation de capacité multi-doigts dans le domaine électrostatique

La tension de contrôle d'une capacité électrostatique à plaques parallèles souffre de problème de tension d'effondrement (pull in voltage) ce qui influe directement sur la limite de plage de variation de la capacité.

La solution la plus adéquate qui répond à nos besoins est une capacité multi-doigts (Figure 2.4). Lorsqu'on applique une différence de potentiel entre les deux électrodes, l'électrode mobile qui est supportée par quatre ressorts se déplace latéralement par rapport à l'électrode fixe.

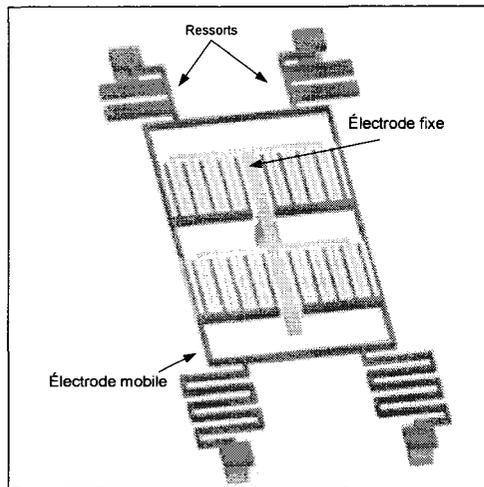


Figure 2.4 Principe de la capacité multi-doigts.

Pour obtenir une grande capacité et une force importante capable d'induire un mouvement de l'électrode mobile on a besoin d'un très grand nombre de doigts, et ceci à cause de la limite de la technologie de fabrication (espace d'entrefer et profondeur des doigts).

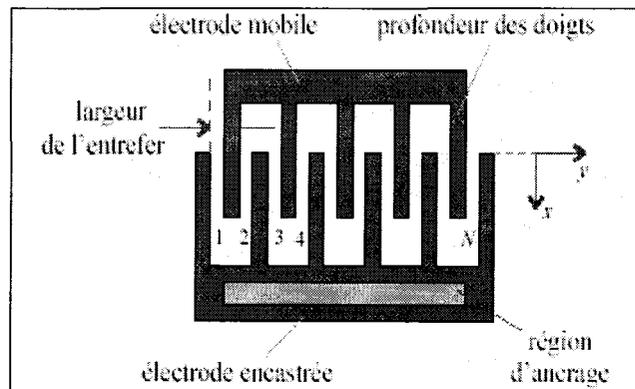


Figure 2.5 La capacité résultante est la somme de N capacités

Pour calculer la force électrostatique dans le cas de capacité multi-doigts, en considérant la distribution de champs montré dans la Figure 2.6, on peut exprimer la capacité par la somme de deux quantités, la première correspond à la capacité due aux effets de bords, et l'autre correspond au champ dans la région commune entre les deux électrodes:

$$C_{tot} = C_0 + C(x) \quad (2.20)$$

Avec

$$C(x) = \frac{2N \cdot \epsilon \cdot h \cdot x}{g} \quad (2.21)$$

Où N est le nombre des doigts, h est l'épaisseur des doigts (perpendiculaire au plan de déplacement), g est la distance entre deux doigts, x est la distance de chevauchement entre 2 doigts (fixe et mobile).

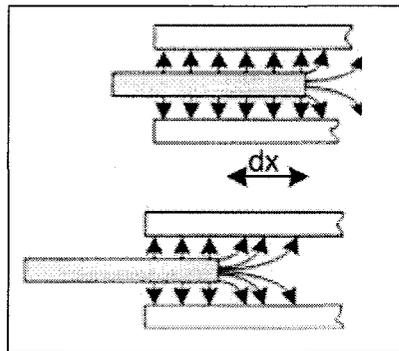


Figure 2.6 Distribution de champs entre les doigts de la capacité

La représentation la plus précise qui donne la capacité parasite due aux effets de bords est obtenue par des méthodes numériques, ce qui nous amène à ajouter des facteurs correctifs dans l'expression analytique. Plus tard dans nos travaux on va extraire cette capacité par simulation en utilisant des outils qui se basent sur la méthode d'éléments finis puis on validera ces résultats par la fabrication.

Pour analyser la stabilité de capacité multi doigts, on a besoin de l'expression de l'énergie potentielle.

On commence par généraliser l'expression de la capacité dans la situation où les doigts d'électrode mobile sont situés asymétriquement entre les doigts de la partie fixe :

$$C = N.\varepsilon.h.x \left(\frac{1}{g-y} + \frac{1}{g+y} \right) \quad (2.22)$$

La force peut être représentée par l'expression :

$$F_x = \frac{1}{2}.V^2 \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{2}.V^2 \cdot N.\varepsilon.h \left(\frac{1}{g-y} + \frac{1}{g+y} \right) \quad (2.23)$$

À l'équilibre, la force électrostatique doit être égale à la force mécanique des ressorts :

$$\frac{1}{2}.V^2 \cdot N.\varepsilon.h \left(\frac{1}{g-y} + \frac{1}{g+y} \right) = k_x x \quad (2.24)$$

$$V = \sqrt{\frac{2k_x x}{N.\varepsilon.h \left(\frac{1}{g-y} + \frac{1}{g+y} \right)}} \quad (2.25)$$

On peut écrire l'équation similaire de l'équilibre des forces dans la direction transversale :

$$F_y = \frac{1}{2}.V^2 \cdot \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{2}.V^2 \cdot N.\varepsilon.h \left(\frac{1}{(g-y)^2} - \frac{1}{(g+y)^2} \right) = k_y y \quad (2.26)$$

Finalement, on peut écrire une équation de l'énergie potentielle totale de capacité multi doigts:

$$PE = \frac{1}{2}K_x x^2 + \frac{1}{2}k_y y^2 - \frac{1}{2}CV^2 \quad (2.27)$$

$$PE = \frac{1}{2}k_x x^2 + \frac{1}{2}k_y y^2 - \frac{1}{2}N.\varepsilon.h.x \left(\frac{1}{g-y} - \frac{1}{g+y} \right).V^2 \quad (2.28)$$

Pour trouver les possibilités d'équilibre de la structure, il faut que la dérivée seconde de cette dernière expression soit positive.

$$\frac{\partial^2 PE}{\partial y^2} = k_y - N.\varepsilon.h.x \left(\frac{1}{(g-y)^3} + \frac{1}{(g+y)^3} \right) . V^2 \quad (2.29)$$

Remplaçons V par son expression trouvée ci dessus

$$\frac{\partial^2 PE}{\partial y^2} = k_y - 2k_x x^2 \left(\frac{(g+y)^3 + (g-y)^3}{(g-y)^3 (g+y)^3} \right) \cdot \frac{g^2 - y^2}{2g} \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial^2 PE}{\partial y^2} = k_y - \left(\frac{1}{(g-y)^3} + \frac{1}{(g+y)^3} \right) \cdot \frac{2k_x x^2}{\left(\frac{1}{g-y} + \frac{1}{g+y} \right)} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial^2 PE}{\partial y^2} = k_y - 2k_x x^2 \left(\frac{(g+y)^3 + (g-y)^3}{(g-y)^3 (g+y)^3} \right) \cdot \frac{g^2 - y^2}{2g} \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial^2 PE}{\partial y^2} = k_y - 2k_x x^2 \cdot \frac{g^2 + 3y^2}{(g^2 - y^2)^2} \quad (2.33)$$

Pour $y=0$ (étant donné qu'un doigt mobile se trouve exactement au milieu de deux doigts fixes), l'expression sera simplifiée :

$$y=0 \Rightarrow \frac{\partial^2 PE}{\partial y^2} = k_y - \frac{2k_x x^2}{g^2} \quad (2.34)$$

Les conditions de stabilité sont la solution dans laquelle l'équation précédente est positive

$$k_y - \frac{2k_x x^2}{g^2} > 0 \Rightarrow \frac{x}{g} < \sqrt{\frac{k_y}{2k_x}} \quad (2.35)$$

Donc il faut maintenir le rapport de la constante de ressort dans la direction transversal (direction y) et la direction longitudinale (direction x) le plus grand possible. Ceci doit être pris en considération lors du design de notre capacité.

2.7 Modèle mécanique de la capacité MEMS

Dans le domaine mécanique, si une contrainte exercée sur la structure l'énergie stockée est donnée par :

$$W_m = \int_v \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot dv \quad (2.36)$$

Dans laquelle σ est le stress et ε la contrainte. La force F_m correspondant à la force d'origine mécanique est donnée par le gradient de l'énergie :

$$F_m = \nabla W_m \quad (2.37)$$

Pour l'expression du ressort, en prenant le modèle à poutre fixe-fixe on peut l'appliquer dans le cas d'une plaque mobile dont les extrémités sont fixes, la constante de rigidité de la poutre est donnée par :

$$k = 32Ew \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (2.38)$$

Où E est le module de Young. Les variables w, t et l représentent respectivement la largeur, l'épaisseur et la longueur de la poutre.

Pour un ressort à barres rectangulaires qui est le cas de la capacité multi-doigts, l'expression de rigidité est donnée par la formule [16] :

$$\frac{1}{k} = \frac{L^3}{E * I} \left(\frac{N}{12} + \frac{1}{48} \right) \quad (2.39)$$

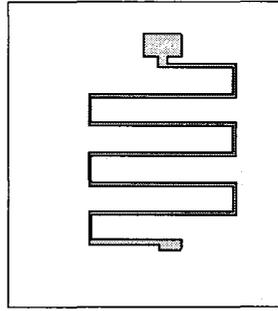


Figure 2.7 Ressort rectangulaire

L est la longueur des barres, E est le module de Young, N est le nombre de barres et I est le 2^{ème} moment des barres.

L'idée était donc d'exploiter les avantages de la capacité multi-doigts étant qu'une capacité qui permet un maximum de variation sans limitations physiques. En effet pour augmenter la valeur de la capacité il suffit d'augmenter le nombre de doigts tout en gardant la robustesse de la structure et la flexibilité des ressorts. Grâce au simulateur mécanique CosmosWorks, on peut optimiser les dimensions des ressorts ainsi que regarder les éventuelles déformations.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, après un développement théorique nous avons vu les avantages et les inconvénients des capacités proposées. Nous avons également montré que la capacité multi-doigts est préférée aux capacités traditionnelles (plaques parallèles), ces dernières présentent des limitations du ratio capacitif.

Le coût des prototypes de microsystemes sont très élevés, et ceci à cause de nombreuses itérations nécessaires pour la production d'un seul composant. D'où la nécessité des outils de modélisation et de simulation qui peuvent nous aider à sauver de l'argent et du temps. Dans

le chapitre qui suit on parlera des outils de simulation utilisés ainsi que des résultats de la capacité multi-doigt conçue.

CHAPITRE 3

SIMULATION DES CAPACITÉS MEMS

3.1 Introduction

La conception des structures MEMS est un sujet dont la résolution est à deux alternatives: méthode empirique et méthodes numériques.

Méthode empirique : cette méthode est conseillée lorsqu'il s'agit d'un problème dont les entrées ne varient pas considérablement et ceci afin de limiter le nombre de paramètres (généralement les caractéristiques de différents matériaux utilisés). De même cette méthode exige des lois déjà faites en se basant sur des mesures prises sur des mécanismes comparables aux miens. Tandis que cette approche est conceptuellement simple, elle est approximative et peut échouer dans des applications RF où il est difficile de prévoir le comportement électromagnétique basé sur les modèles empiriques pour la plupart des géométries. Même si ces lois existent, ils ne peuvent pas couvrir les différents cas en particulier ceux développés dans ce travail. En raison de l'évolution des procédés de fabrication qui se base sur la superposition des couches des différents matériaux n'ayant pas les mêmes caractéristiques mécaniques et électriques, cette approche simpliste devient inefficace pour prévoir le comportement des composants MEMS (très sensibles dans un environnement complexe). Dans ce contexte, une approche de conception plus rigoureuse doit être entreprise. Une telle approche serait basée sur la multi-physique qui tiendra compte des différents environnements (électrique, mécanique etc.). Cette analyse sévère de la structure MEMS se base sur le mode électrostatique de mise en action, le mode mécanique de mouvement et de déformation et le mode de réponse RF.

Méthodes numériques : Lorsqu'il s'agit de déterminer des contraintes ou des déformations mécaniques dans une géométrie relativement complexe, les équations aux dérivées partielles permettent de décrire ce comportement. Les méthodes numériques à différences finies

s'imposent comme outil d'analyse. Les plus utilisées d'entre elles dans ce domaine sont : la Méthode des Éléments Finis (FEM), Méthode des Éléments de frontière (Boundary Element Method BEM) et la Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporaire (FDTD).

Ces méthodes consistent à mailler les éléments du mécanisme qui entre en jeu. Une fois la structure maillée leurs éléments sont caractérisés (coordonnées et numéros des nœuds, connectivité ...), et connaissant les chargements et les conditions aux limites on peut déterminer les déformations ou les déplacements et les contraintes. Le maillage peut être effectué grâce à des éléments unidimensionnel, bidimensionnel, ou tridimensionnel et ceci dépend du type de problème.

3.2 Modélisation par éléments finis

La Méthode des Éléments Finis est un outil mathématique très puissant conçu pour calculer des structures mécaniques complexes et leurs comportements dans les différents environnements. Elle est rigoureuse, rapide, abordable ainsi que les logiciels d'analyse se basant sur cette méthode sont disponibles et permettent des interfaces d'entrée personnalisée selon les besoins de l'utilisateur et disposent généralement d'une base de donnée concernant les caractéristiques de différents matériaux. Elle a considérablement évolué ces dernières années, motivée par le besoin de l'industrie de pointe et soutenue par le progrès des calculateurs utilisés dans les différents domaines tel que le domaine du génie civil, aérospatial, télécommunications etc.

Cette méthode numérique a permis l'analyse des structures dans les différents domaines linéaires et non linéaires, ainsi que l'analyse électrostatique, structural, thermique et électromagnétique. Avec cet atout et vu que les microsystèmes sont de nature multiphysiques, la méthode des Éléments finis est l'outil le plus utilisé pour concevoir des microstructures MEMS.

La Méthode des Éléments Finis consiste à chercher une solution approchée aussi précisément que possible à la solution du problème continu par discrétisation et ceci pour surmonter l'impossibilité de résoudre des problèmes continus réalistes [17].

Une opération de discrétisation permet de diviser le domaine en sous domaines appelés éléments et ainsi réduire un problème complexe en plusieurs petits problèmes plus facile à résoudre [18].

La résolution se déroule en plusieurs étapes, d'abord il faut choisir le domaine physique qui détermine la nature des variables et le degré de liberté (le potentiel dans le cas le domaine électrostatique). Ensuite il faut discrétiser la structure, c'est l'opération de maillage où on remplace toute la géométrie par un ensemble d'éléments, essentiellement tridimensionnels (tétraèdres ou quadrilatérales) vu que le problème est à 3 dimensions et déterminer les champs aux éléments (nœuds). Enfin, on définit les conditions aux limites (les charges dans le système global), avant de calculer les contraintes, la distribution de l'énergie associé aux degrés de liberté.

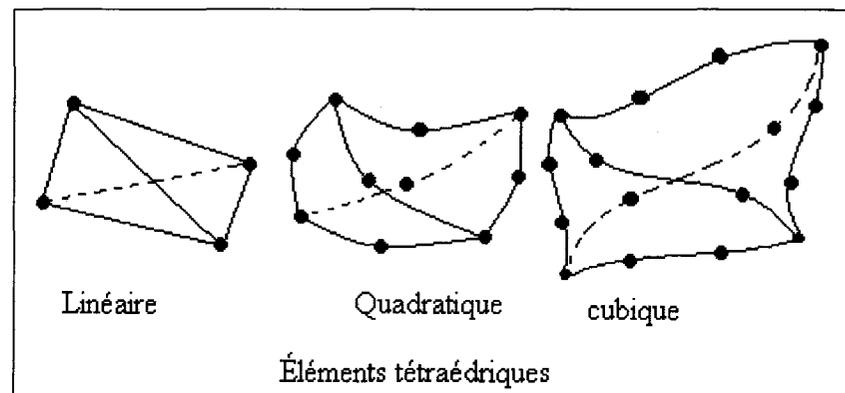


Figure 3.1 Exemple des éléments FEM [17].

3.3 Analyse électro-mécanique :

La méthode de couplage séquentielle, permet la combinaison entre champs simples pour résoudre des problèmes des champs couplés. Dans le cas d'électromécanique, les solutions électrostatiques et structurales sont obtenues séquentiellement.

Le terme couplage séquentiel fait référence à une simulation physique après une autre. L'interaction (accouplement) entre deux domaines se produit par le vecteur de charge qui représente les forces électrostatiques agissant sur les conditions aux limites des éléments structuraux. On parle ici de l'interaction électrostatique structurale, ce processus itératif dans ce cas-ci est exigé pour obtenir une solution raisonnable.

Par conséquent, la convergence du processus itératif devient le problème principal de la méthode. La figure suivante montre le principe d'analyse couplée; les résultats de l'analyse 1 deviennent des contraintes pour l'analyse 2.

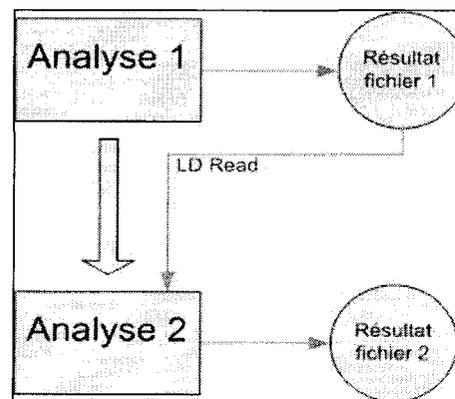


Figure 3.2 Principe d'analyse couplée

3.4 Les simulateurs physiques tridimensionnels

L'évolution des méthodes de calcul numérique soutenue par le progrès du secteur des calculateurs a poussé les chercheurs dans différents domaines à se baser sur des structures physiques pour concevoir des nouveaux systèmes. Suite au besoin de l'industrie des systèmes

micro électromécanique, des logiciels et des outils de prédiction qui permettent d'optimiser et d'inventer des structures MEMS qui combinent les différents domaines physiques, plusieurs compagnies ont développé des systèmes d'aide au designer. Ces outils contiennent un package des différents types d'analyses (structurale, électrostatique, fluide etc.). Cette évolution a permis de sauver l'argent et le temps et a aidé le progrès avec une vitesse remarquable.

Par conséquent, le besoin d'évaluer les outils de simulation professionnelle est devenu une nécessité absolue. Ceci afin d'identifier les éventuelles améliorations possibles. Pour cela, on a effectué une comparaison entre les résultats pratiques avec les résultats de simulation obtenus par ces logiciels. La Figure 3.3 illustre la méthodologie de conception des microsystèmes.

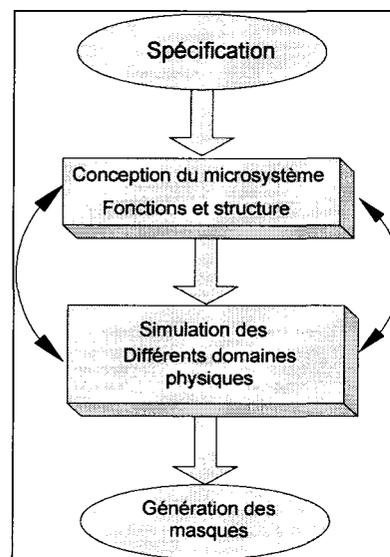


Figure 3.3 Étapes de conception du microsysteme

3.4.1 Les outils commerciaux disponibles

Il existe plusieurs outils de simulation, permettant d'analyser les structures MEMS et variant en fonctionnalités, capacité d'analyse, règles de fabrication et bibliothèque de matériaux. Parmi ces outils, on peut citer :

- Memscap : ils possèdent des bibliothèques complètes de microsystemes dans des différents domaines énergétiques aussi différents que la mécanique et l'électrique. L'utilisateur dispose à chaque fois du layout du microsysteme, de la cellule électrique associée et du modèle comportemental. Les simulations sont effectuées grâce au logiciel de résolution aux éléments finis ANSYS. Memscap inclus le logiciel Cadence dans leur packaging afin de générer les masques nécessaires à la fabrication du microsysteme.
- Coventor : ils sont plutôt adressés à des laboratoires de recherche, qui n'ont pas de bibliothèques de composants fixes. En effet, contrairement aux logiciels de Memscap, Coventor offre une grande flexibilité du processus : les étapes technologiques peuvent être rajoutées ou enlevées. La dernière génération offre un auto-maillieur.
- Cosmos: permet d'analyser des structures en 2D ou en 3D avec toute flexibilité grâce à ses outils de simulation électrique et électromagnétique. Pour effectuer les études dynamiques, cet outil se base sur la Méthode des Éléments finis, muni d'un auto-maillieur et possède l'avantage de contrôler le maillage pour chaque élément de la structure. Cosmos est un software modulaire composé de deux modules, le premier module s'appelle Cosmos DesignStar pour la simulation électrique, et le deuxième module est Cosmos Works pour l'analyse mécanique, les deux modules sont indépendants mais sont intégrés dans la dernière version dans l'outil de CAO SolidWorks. Son interface graphique et sa souplesse lui rends très attractif, en effet on est capable de changer les conditions aux limites ou changer les matériaux utilisés dans un temps record. De plus, on bascule d'un simulateur à un autre dans un même environnement.
- Ansys: c'est l'outil le plus utilisé par les industriels et les chercheurs, pour modéliser une structure MEMS. Sa popularité est due à sa capacité analyse couplée (voir paragraphe 3.2), comme les autres simulateurs, il utilise la Méthode des Éléments finis, muni d'un auto-maillieur et possède l'avantage de contrôler et changer le type maillage adéquat pour chaque élément de la structure. Les divers types de simulation réalisables vont du thermique à l'électrique, en passant par l'analyse d'inductance ou piézorésistive.

Toutes nos simulations ont été faites avec les deux outils Cosmos DesignStar et Ansys dont nous disposons à LACIME (Laboratoire de communication et d'intégration de la microélectronique) de l'É.T.S.

3.4.2 Variables de l'analyse électro-mécanique

Les variables mises en jeu peuvent être de natures électrique et mécanique. Dans le domaine électrique, ce sont les tensions ou courants appliquées, qui donnent les capacités observables, ou les forces électrostatiques existants entre deux solides. Dans le domaine mécanique, les variables sont les forces d'origine mécanique et les couples appliqués.

Elles sont toutes traitées selon le même principe qui consiste en la résolution de l'équation mathématique traduisant le phénomène à simuler et le calcul de leurs valeurs sur les différents points définis lors du maillage de la structure.

3.4.3 Génération des masques

C'est la première étape, il s'agit de dessiner les différents motifs (couches) et les rassembler ensuite dans une seule pièce. Les règles de dessins, sont imposées par le processus technologique à utiliser qui prend en considérations les limites de chaque procédé de fabrication. Ces règles permettront d'obtenir une structure manufacturée robuste. Généralement les étapes technologiques des filières MEMS sont souvent comparables, les épaisseurs par exemple sont identiques. Seules, des règles comme les distances maximales entre deux points permettant la libération de la structure, recouvrement minimal sont des propriétés spécifiques pour chaque processus de fabrication.

Les principaux paramètres pris en compte sont la largeur minimale, l'espace minimale et le recouvrement minimal entre les différents éléments et couches de la structure comme le montre la Figure 3.4.

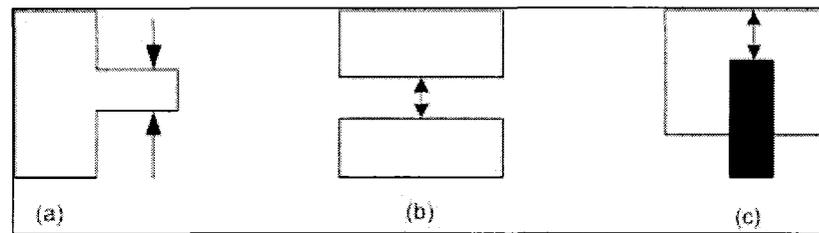


Figure 3.4 Exemple de règles de dessin, (a) largeur minimale, (b) espace minimal, (c) recouvrement minimal.

Si on ne respecte pas les règles du dessin, la structure risque d'avoir des problèmes de nature mécanique de flexion pouvant aller jusqu'à la rupture ou de contact durant l'opération de gravure qui peut provoquer un court-circuit électrique.

Il faut dessiner la structure étape par étape, c'est à dire créer des composants en 3D ou chacun représente une couche de fabrication, puis assembler ces pièces dans un seul bloc, par le biais des contraintes géométriques fourni par la majorité des logiciels d'aide au dessin.

Certains logiciels sont équipés par un outil de vérification automatique des règles de dessins comme Coventor et Memscap, dans d'autres outils comme Ansys et Cosmos DesignStar c'est le concepteur qui doit vérifier manuellement les masques, ce qui implique une énorme perte de temps de conception.

L'outil CAO qu'on a utilisé pour dessiner notre structure est Solidworks qui est très puissant et très simple à utiliser grâce à son interface graphique qui le rend très souple. Il est muni d'un outil de détection d'interférence entre les différents éléments de la structure. Également, il est capable de générer les masques nécessaires pour la fabrication.

3.4.4 Comparaison entre simulateurs

Étant donné que les systèmes MEMS sont de nature multi-physiques qui combinent plusieurs domaines énergétique, les simulateurs utilisent plusieurs modules qui peuvent être intégrés dans un seul environnement ou séparés.

Ansys à l'avantage de coupler automatiquement les différents niveaux de simulation, en effet, le vecteur de charge qui représente les forces électrostatiques agit sur les conditions aux limites des éléments structuraux.

Par contre pour Cosmos les deux simulateurs sont découplés, Cosmos DesignStar calcule la capacité et le vecteur de force électrostatique et CosmosWorks se charge de l'analyse structurale pour nous donner les résultats liés à la déformation et au déplacement de la structure mobile (Figure 32). On applique ce couplage manuellement.

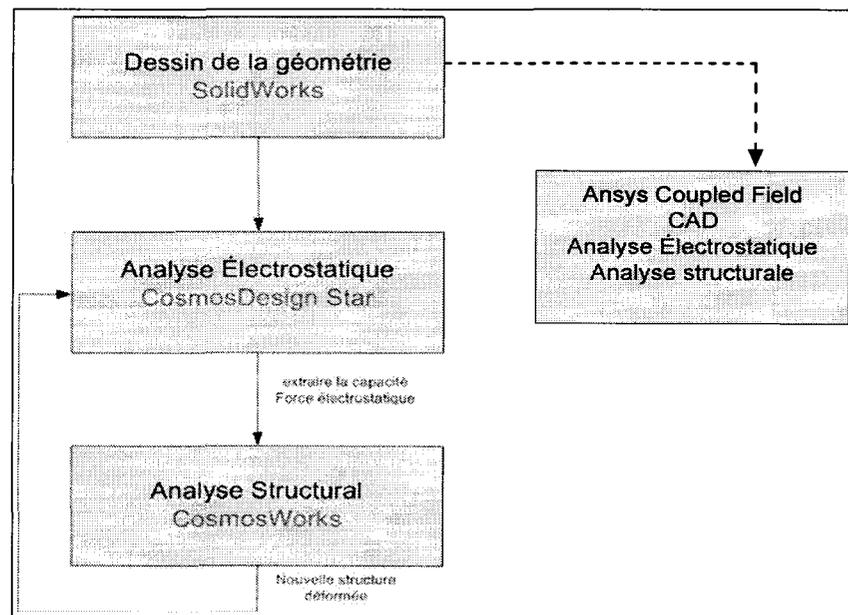


Figure 3.5 Comparaison des différentes d'étapes de simulation des composants MEMS

Le tableau suivant illustre les performances de chaque outil :

Tableau 3.1
 Comparaison des performances entre Cosmos et Ansys

	Ansys	Cosmos
Analyse structurale	oui	oui
Analyse électrostatique	oui	oui
Analyse couplée	oui	non
Interface et facilité	faible	bon

On a calculé la valeur de la capacité en fonction de la tension appliquée entre les deux plaques de capacité, les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 3.6.

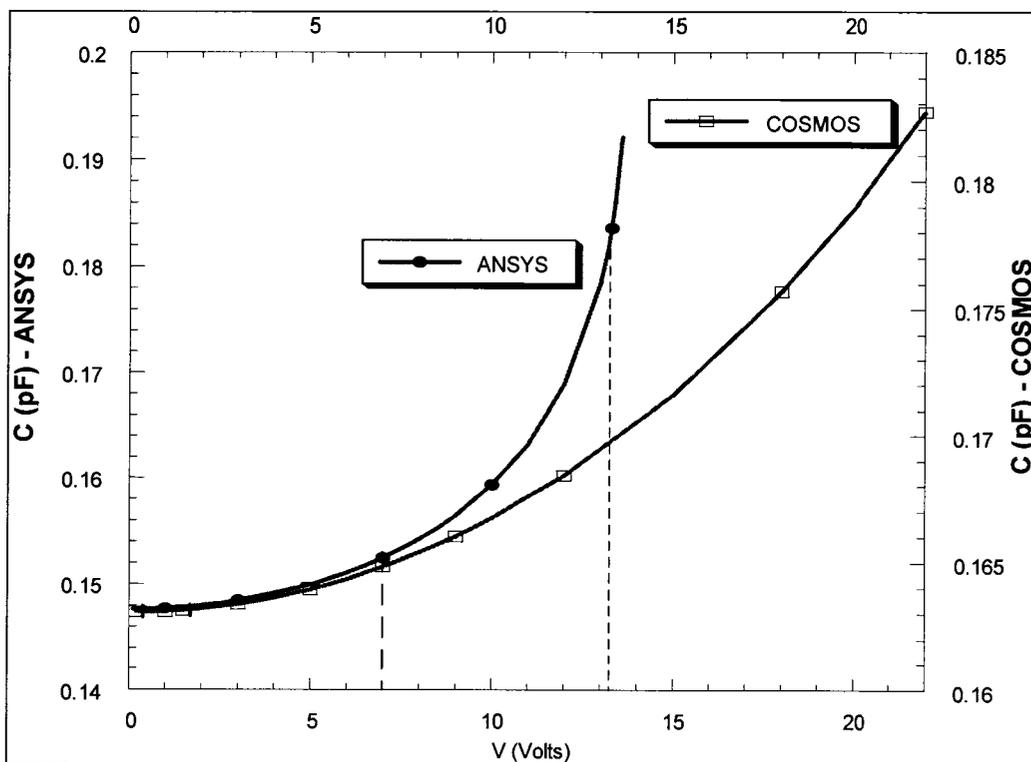


Figure 3.6 Valeur de capacité obtenue simultanément avec Cosmos et Ansys.

On remarque que les deux logiciels donnent presque les mêmes valeurs de capacité, qui augmentent en fonction de la tension appliquée entre les deux plaques. La divergence commence autour d'un point critique qui est la tension d'effondrement. Cependant Ansys montre bien ce phénomène par le fait que la plaque mobile perd son équilibre autour de 13V qui correspond bien à la tension prédite par le calcul analytique.

Si on fait une comparaison purement structurale en découplant l'analyse électromécanique dans Ansys en appliquant la même force mécanique sur la structure (Figure 34), on remarque que le déplacement de la partie mobile est le même dans Ansys et CosmosWorks, la légère différence est due au nombre d'éléments utilisés.

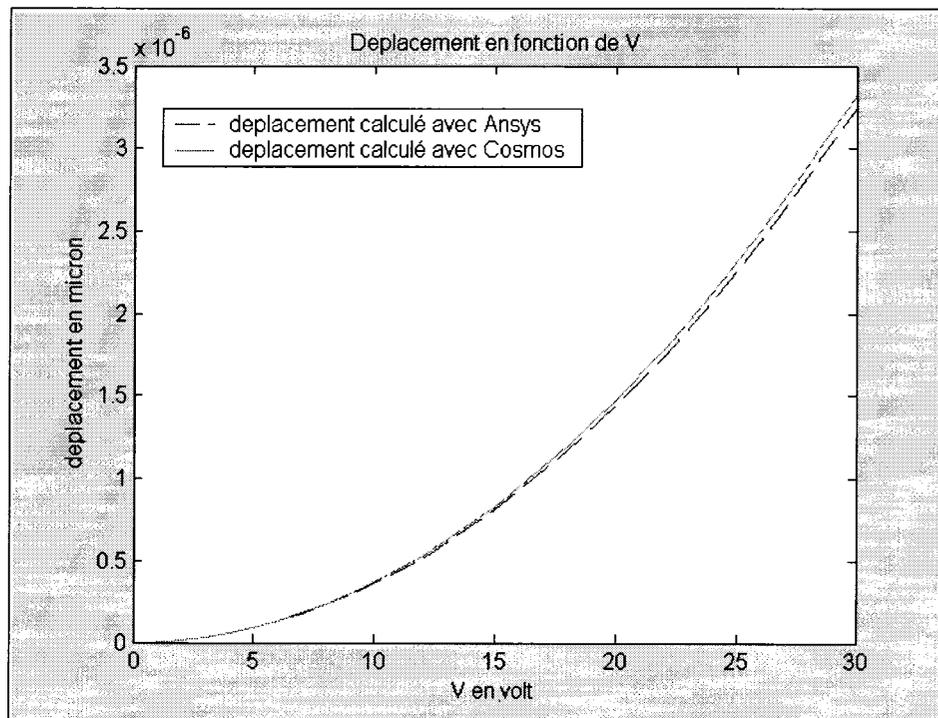


Figure 3.7 Déplacement simulé par les deux logiciels.

Parmi les problèmes qu'on a rencontré pendant tous nos travaux de simulation, on trouve le problème de maillage, en effet à cause du rapport très élevé entre la plus petite taille (0.2 microns) et la plus grande taille (580 microns) de la structure, le nombre des nœuds

augmente considérablement, ce qui implique le besoin excessif des mémoires vives des calculateurs.

Pour résoudre ce problème, on a élaboré une solution technique très efficace qui est résumé en deux points :

1. simuler juste le quart de la structure vu qu'elle est symétrique selon x et y (ceci réduit considérablement le nombre des nœuds).
2. augmenter l'épaisseur des couches les plus fins pour la simulation dans le domaine électrostatique, ceci permet de réduire le rapport entre la plus grande taille et la plus petite taille dans la structure.

Et pour s'assurer que cette approche n'influe pas énormément les résultats, on a effectué quelques essais, en regardant la variation de la capacité en fonction de l'épaisseur pour une structure à plaques parallèles (Tableau 3.2).

Tableau 3.2

Effet de l'épaisseur sur la valeur de capacité à plaques parallèles

Épaisseur des plaques métalliques	Capacité
10* Épaisseur réel (2um)	0.871064 pF
12* Épaisseur réel (2.4um)	0.870261 pF
14* Épaisseur réel (2.8um)	0.867384 pF
16* Épaisseur réel (3.2um)	0.86609 pF

La légère différence est due aux effets de bords qui diminue avec l'épaisseur et ceci parce que la plaque de dessus s'éloigne de plus en plus en augmentant l'épaisseur.

3.4.5 Simulation de la capacité multi-doigts

L'étude préliminaire de la capacité multi-doigts a été développée dans le chapitre 2. Même si la distance d'entrefer (Gap) reste constante, le changement de la surface commune entre les deux conducteurs entraîne un changement de la valeur de la capacité. En effet, le doigt mobile se trouve au milieu des 2 doigts fixes ce qui implique que les forces latérales s'annulent mutuellement et le Gap reste constant. La Figure 3.8 montre le déplacement de l'électrode mobile dans le plan longitudinal des doigts.

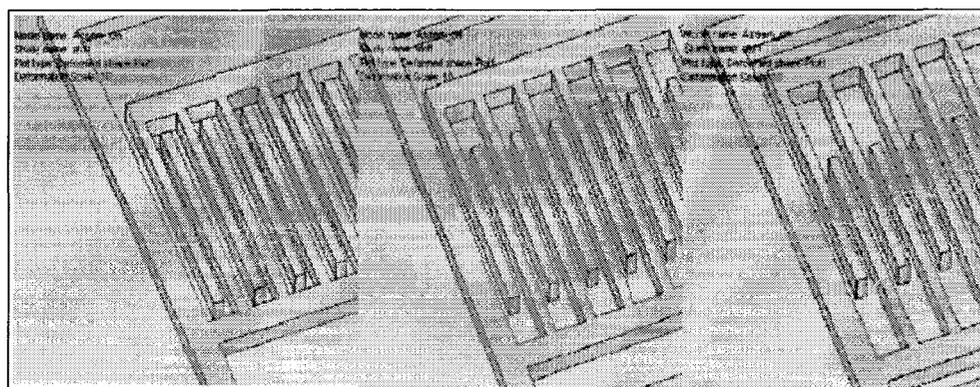


Figure 3.8 Simulation du déplacement de la plaque mobile avec le logiciel CosmosWorks

La tension appliquée entre l'électrode mobile et l'électrode fixe engendre une force électrostatique répulsive ou attractive (Figure 3.9 et Figure 3.10). Le module de cette force dépend du carré de la tension appliquée et de la dimension des doigts. Pour modéliser la capacité, nous avons effectué des simulations mécanique et électrostatique afin de vérifier la rigidité de la structure, d'une part, et la variation de la valeur de la capacité en fonction de la tension appliquée, d'autre part. Les simulations sont faites à l'aide du logiciel Cosmos Works (pour l'analyse mécanique) et Cosmos Design Star (pour l'analyse électrostatique).

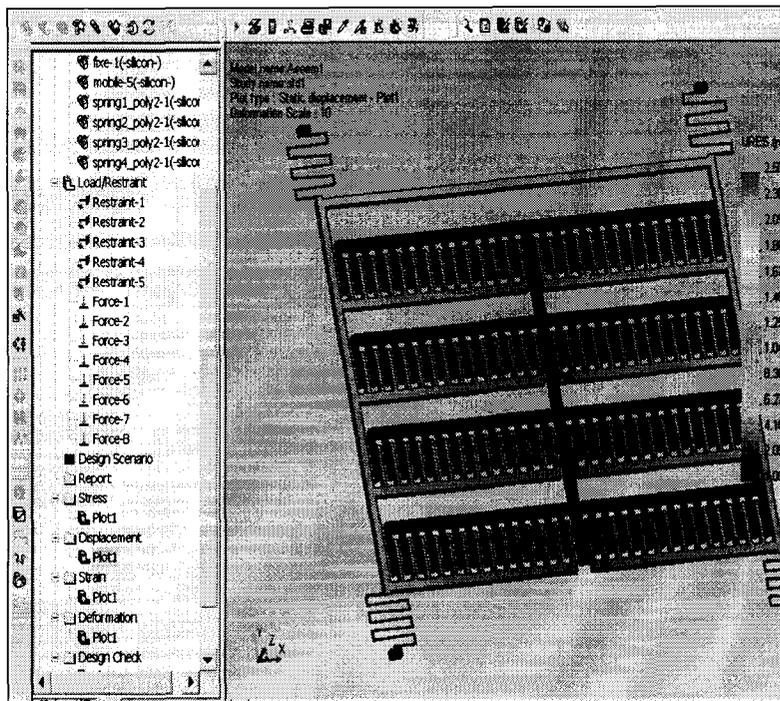


Figure 3.9 Déplacement à la tension V_1

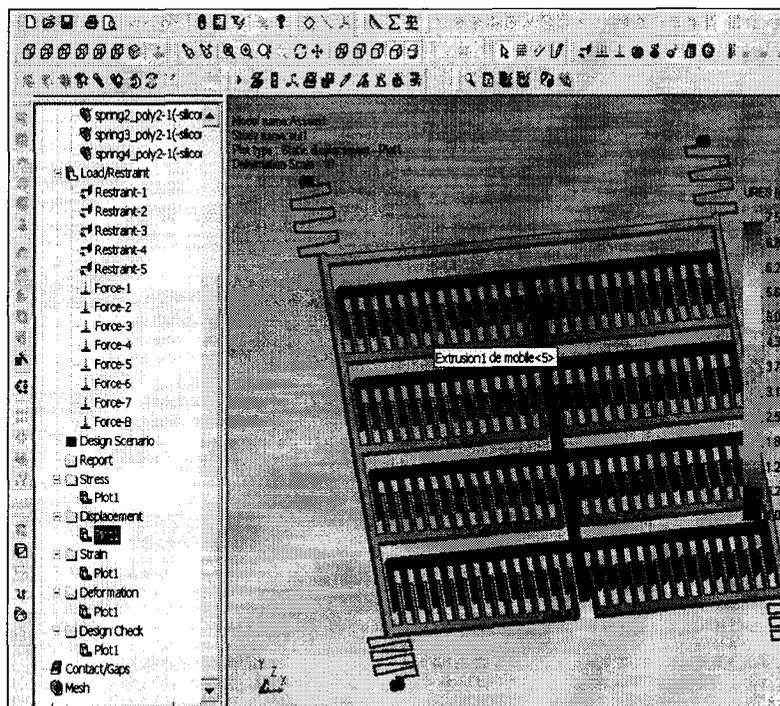


Figure 3.10 Déplacement à la tension $V_2 > V_1$

Comme on l'a vu précédemment, la différence fondamentale entre Ansys et Cosmos est le comportement de la structure autour de la tension d'effondrement. Or ce phénomène n'existe pas dans le cas de la capacité multi-doigts puisque le déplacement de la structure mobile ne se fait pas au même plan que l'espace d'entrefer entre les doigts. Par conséquent, nous avons choisi le simulateur Cosmos à cause de sa simplicité et de sa précision dans le calcul.

La capacité multi-doigts proposée est composée de 960 doigts de $50\mu\text{m}$ de long. Ces doigts sont répartis sur six rangées dont la moitié est attachée à l'électrode fixe et l'autre moitié à l'électrode mobile. Figure 3.9 Déplacement à la tension V_1 . La profondeur de la structure est de $20\mu\text{m}$. Les quatre ressorts qui supportent la partie mobile sont de type rectangulaire. Ils sont composés de sept barres horizontales et de six barres verticales dont les longueurs respectives sont $98\mu\text{m}$ et $16\mu\text{m}$. L'espace entre les doigts est fixé à $5\mu\text{m}$ pour éviter tout risque de court-circuit. Toutes ces dimensions sont obtenues par optimisation de la structure avec l'outil CosmosWorks.

Suite à l'échange entre environnement mécanique et environnement électrique que nous avons obtenu les résultats de la courbe dans la Figure 3.12. En effet la force électrostatique calculé par l'outil Cosmos Design Star (Figure 3.11) est utilisé comme variable d'entrée dans le simulateur mécanique CosmosWorks ce dernier nous permet de calculer le déplacement de l'électrode mobile et la déformation de la structure. Ce déplacement se traduit par une variation de la valeur de la capacité calculé avec l'outil Cosmos.

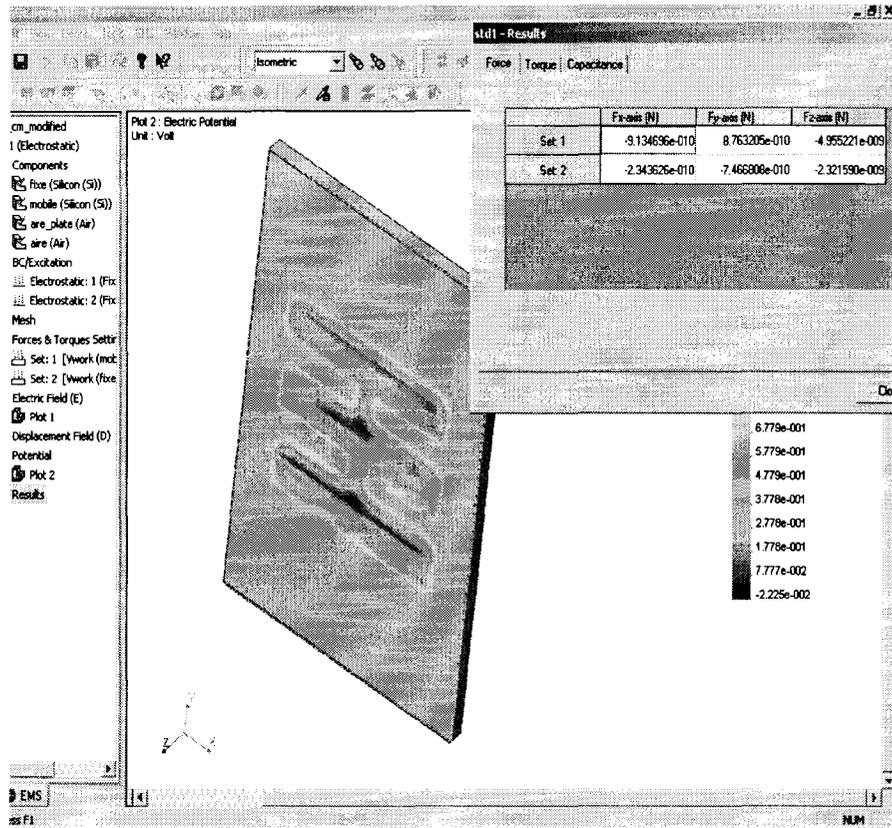


Figure 3.11 Capacité et force électrostatique calculées avec Cosmos

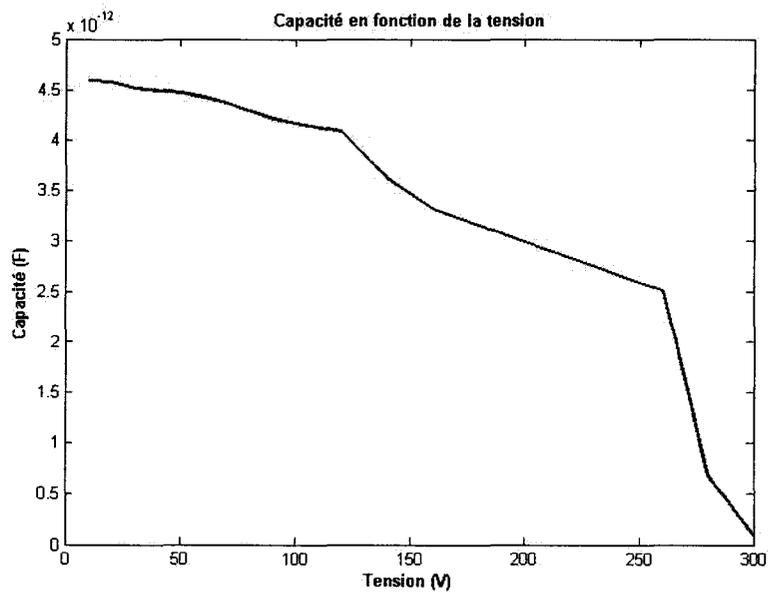


Figure 3.12 Tension appliquée en fonction de la capacité

La capacité en fonction de la tension appliquée obtenue avec le simulateur (Figure 3.12) ne suit pas l'équation théorique qui ne prend pas en compte tout déplacement latéral cause par la force de pesanteur et les forces électrostatiques dues aux effets de bord (Figure 3.13).

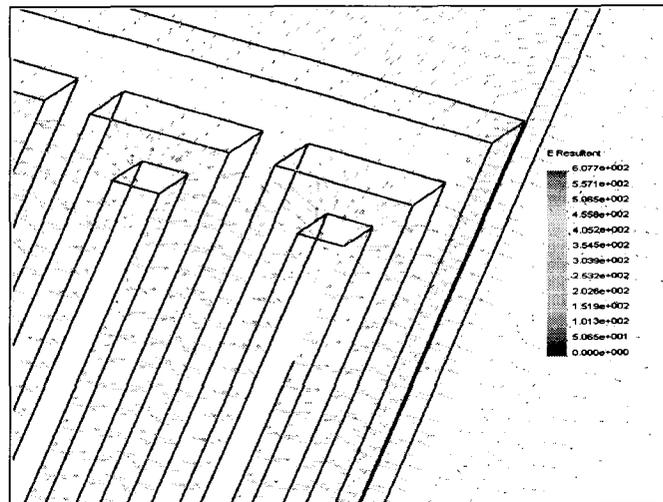


Figure 3.13 Les effets de bords (fringing field)

Nous remarquons que la plage de variation est très importante et qu'on n'arrive pas à atteindre la valeur souhaitée (9pF). Ceci est expliqué par le fait que la tension de commande qui permet le déplacement d'une structure plus large ne répond pas aux exigences de la fabrication MEMS. En effet, multiplier le nombre des doigts engendre une tension de commande plus grande et une structure moins solide.

Selon les résultats de simulation retrouvés (la capacité en fonction de la tension appliquée), pour réaliser le filtre visé dans le chapitre 1 (Figure 1.2), les tensions qu'il faut appliquer sont résumées dans le tableau qui suit.

Tableau 3.3

Tension à appliquée pour concevoir des filtres ajustables

Fréquence centrale = 1.5GHz		Fréquence centrale = 2GHz	
C (pF)	V (v)	C (pF)	V (v)
1.53	272	0.787	285
0.69	284	0.291	293
3.93	123.9	2.24	257
4.24	83.8	2.58	243

3.5 Conclusion

Le processus de conception est un processus itératif, c'est à dire il faut changer les dimensions de la structure plusieurs fois, afin de trouver le résultat optimal. La solution finale est celle qui donne une structure mécaniquement robuste et qui consomme moins de courant. C'est l'opération la plus coûteuse et la plus longue pour concevoir un composant MEMS.

La différence principale entre les outils de simulation des systèmes électromécaniques est l'intégration des différents environnements physiques qui interagissent sur ces systèmes. Le couplage entre ces différents domaines est nécessaire pour la réussite du modèle à fabriquer. C'est le paramètre essentiel qui explique la divergence entre les résultats trouvés par les simulateurs Ansys et Cosmos. D'autre part, le maillage des structures MEMS est très complexe vu que l'épaisseur de ces composants est négligeable devant les autres dimensions. Ce qui augmente énormément le nombre des nœuds et par conséquent la taille de la mémoire du calculateur. Ce problème a été contourné par l'augmentation de l'épaisseur des ces structures. En effet, le résultat final ne pas très affecté de ce paramètre comme c'est expliqué dans le Tableau 3.2.

Le processus de conception se termine par la génération des masques permettant la fabrication du système et ceci à l'aide de l'outil de CAO qu'on a utilisé (Solidworks).

CHAPITRE 4

FABRICATION

4.1 Introduction

La simulation de la structure proposée nommée capacité multi-doigts a été réalisée par le logiciel commercial Cosmos DesignStar. Les résultats trouvés ne peuvent être validés par des mesures directes en raison des limites des technologies de fabrication actuelles. En effet pour réaliser la structure et en particulier les doigts, il est nécessaire en premier lieu de fabriquer deux parties indépendantes (une structure fixe et une autre mobile). Il faut ensuite les déposer de sorte que les doigts de la structure mobile soient intercalés avec les doigts de la partie fixe (Figure 4.1). La seconde étape qui est l'assemblage de la partie mobile avec la partie fixe est la plus délicate et nécessite une technologie évoluée dont on ne dispose pas actuellement.

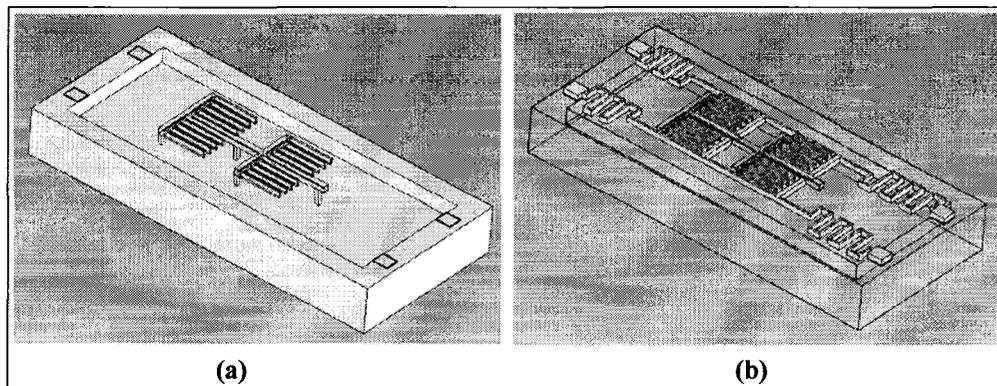


Figure 4.1 (a) Gravure des doigts fixes sur silicium, (b) dépôt de la partie mobile

La solution que nous proposons afin de valider nos résultats de simulation par des mesures est une structure de base MEMS plus simple à fabriquer et dont les mesures à réaliser permettront de valider les résultats de simulations trouvés en utilisant Cosmos et Ansys. Si les résultats sont conformes, cela nous permet d'approuver les résultats de simulation de la structure multi-doigts déjà trouvés à l'aide de l'outil Cosmos.

4.2 Présentation de la structure de base à fabriquer

La structure de base utilisée comme modèle de validation est une capacité à plaques parallèles dont le principe de fonctionnement est décrit dans le chapitre 3. La capacité est composée de deux plaques fixes de $0.2\mu\text{m}$ d'épaisseur chacune et ayant l'air comme diélectrique. La plaque supérieure est fixe et supportée par deux ancres métalliques tout au long de sa largeur. Cette plaque est gravée de trous sur sa surface et les dimensions de la capacité sont $500\mu\text{m}$ par $200\mu\text{m}$, soit une aire de $10000\mu\text{m}^2$. La distance entre les deux plaques est de $0.8\mu\text{m}$. La structure est conçue pour être testée avec une sonde RF afin de déterminer ses paramètres S. La plaque inférieure est recouverte d'un isolant qui est l'oxyde de Silicium (SiO_2) et dont l'épaisseur est de $0.2\mu\text{m}$, et connectée à deux conducteurs latéraux reliés à la masse de la sonde RF (voir Figure 4.2).

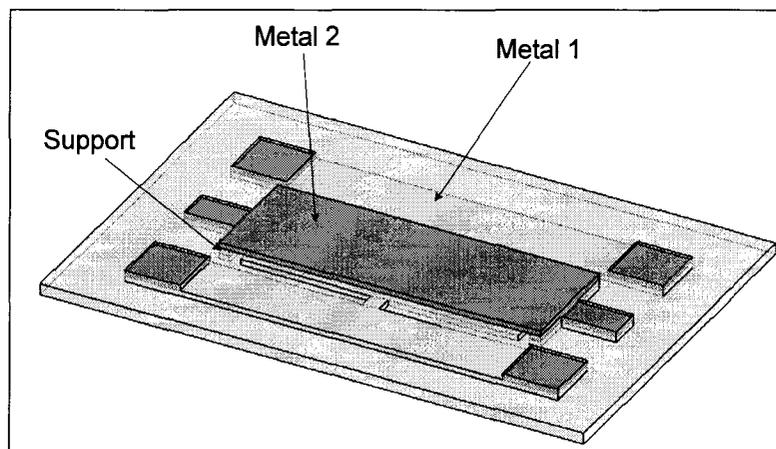


Figure 4.2 Structure MEMS fabriquée.

Afin de permettre aux substances chimiques de pénétrer profondément à travers la structure fabriquée pour enlever la couche sacrificielle, des trous sont généralement faits sur la plaque supérieure (Figure 4.3). La surface totale du métal qui donne l'effet capacitif est de $75000\mu\text{m}^2$.

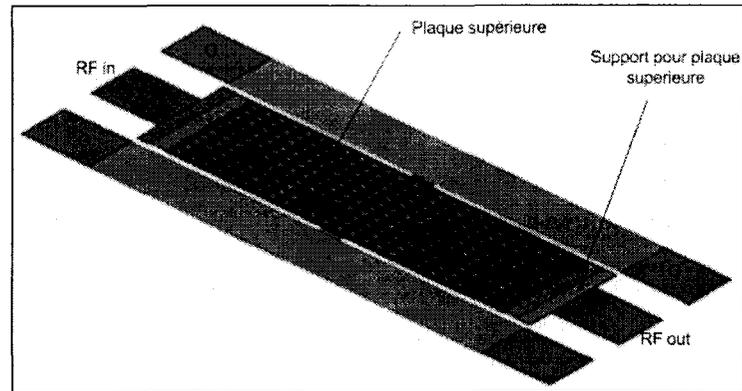


Figure 4.3 Capacité MEMS avec les trous sur la plaque supérieure

4.3 Généralités sur les matériaux

Le silicium a connu un immense succès pour la réalisation des microsystemes grâce à ses diverses propriétés. Le silicium est un matériau sensible à la température, aux rayons UV, aux champs magnétiques élevés, et d'excellentes caractéristiques mécaniques.

Le silicium existe sous trois formes différentes : cristalline, poly-cristalline ou amorphe [19]. Sa conductivité électrique peut être modifiée et ceci par dopage (par ajout des impuretés). Tous ces avantages lui ont permis d'être la meilleure plateforme pour les circuits MEMS. Quelques exemples de substrats couramment utilisés sont listés au Tableau 4.1.

Tableau 4.1
Fonctions de quelques substrats utilisés dans la microfabrication

Substrats	Fonctions
- Silicium	Matériaux semi-conducteurs de base pour former des transistors, des diodes, etc.
- SiO ₂ (silice) - Nitrure de silice Si ₃ N ₄	Matériaux diélectriques pour l'isolation inter-couche et pour la passivation.
- Aluminium Al	Matériau conducteur pour des contacts, interconnexions et électrodes.
- Chrome Cr	Matériau opaque utilisé dans les masques optiques pour la photolithographie.

4.4 Processus de fabrication

Il existe deux modes de fabrication des structures MEMS. Le premier mode est l'usinage de volume qui permet l'obtention d'une structure MEMS par gravure chimique du substrat. Le deuxième mode est l'usinage en surface qui utilise la technique de superposition des couches minces et la gravure sélective. La technologie employée est basée sur le micro usinage de surface. Elle consiste à usiner et superposer les différentes couches (isolant, métal, résine, etc..) pour ensuite libérer les parties mobiles de la structure grâce à une opération de gravure.

Il est important de décrire les différentes techniques disponibles pour montrer la complexité et la sensibilité de chaque étape.

4.4.1 Les contraintes de fabrication

4.4.1.1 Dépôt de couches métalliques

Nous distinguons deux méthodes principales pour déposer des couches métalliques : l'évaporation et la pulvérisation.

a) Évaporation

L'évaporation est un procédé sous vide permettant le dépôt de couches métalliques. La vitesse d'évaporation est contrôlée par la température de la source qui détermine la pression de la vapeur. D'une manière générale, nous distinguons trois étapes:

- ❖ évaporation du matériau à déposer,
- ❖ transport des vapeurs de la source au substrat,
- ❖ condensation des vapeurs sur le substrat et formation de la couche mince.

b) Pulvérisation

La pulvérisation est une technique de dépôt des couches métalliques sous vide permet en général de travailler à des températures de substrat plus basses que les autres techniques de dépôt. Elle requiert le bombardement de la cible par des particules de quantité de mouvement suffisante. Les ions positifs conviennent bien puisque leur énergie (donc leur quantité de mouvement) peut être contrôlée en appliquant un potentiel négatif à la cible.

4.4.1.2 Lithographie

La lithographie est une technique qui sert à reproduire sur des couches de matériaux photosensibles, une surface ou un motif prédéterminé.

Généralement, nous pouvons séparer le procédé de photolithographie en plusieurs étapes distinctes qui sont :

- La déposition d'une couche mince par oxydation ou métallisation.

- L'application de la résine : la résine que l'on applique ici réagira aux rayons ultraviolets plus tard dans le procédé.
- La cuisson douce : Cette cuisson sert à évaporer le solvant contenu dans la photorésine et à améliorer son adhérence avec la couche mince. La température de cuisson dépend des propriétés de la photorésine pour sécher la couche de résine.
- L'alignement du masque : L'aligneur de masque est un appareil indispensable à tout procédé de microfabrication. En effet, il permet la superposition de plusieurs couches sur une gaufre de silicium avec une précision micrométrique. Lors de cette étape, nous déposons un masque sur le substrat de silicium pour déterminer le modèle que nous voulons graver sur la gaufre.
- L'exposition lumineuse (Ultra-violet) : Cette étape consiste à exposer le masque et la gaufre aux rayons ultra-violet (UV). Certaines parties du masque sont conçues pour empêcher les UV d'atteindre la résine et d'autres parties permettent de laisser passer les UV jusqu'à la résine.
- Le développement de la résine : cette étape est réalisée en immergeant l'échantillon dans un bain qui contient le développeur. La partie la plus faible de la photorésine se dissout tandis que la plus dure résiste.
- La cuisson dure : Cette cuisson sert à durcir la photorésine ainsi qu'à améliorer encore plus son adhérence avec la couche mince. Cela sera nécessaire pour que la photorésine résiste aux étapes subséquentes de gravure de la couche mince.
- La gravure de la couche de métal ou d'oxydation : Cette étape consiste à tremper directement l'échantillon dans une solution d'attaque chimique appropriée.
- Nettoyage de la photorésine : Cela se fait en trempant l'échantillon dans des solutions d'acétone et en le rinçant à la fin avec de l'eau.

La Figure 4.4 résume les différentes étapes de photolithographie.

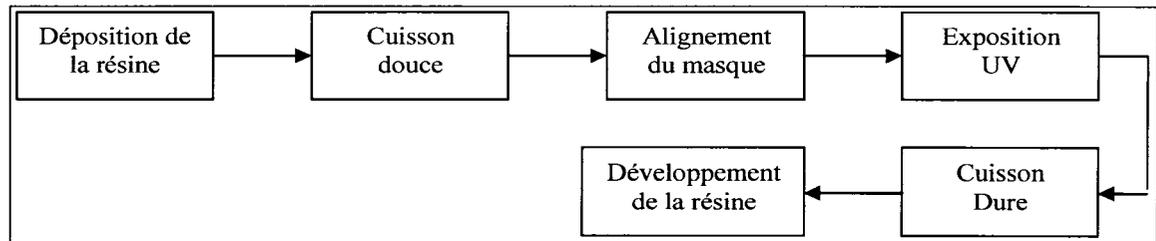


Figure 4.4 Schéma bloc d'un procédé de photolithographie

4.4.1.3 Gravure

Lors de la fabrication d'un dispositif, la gravure est une des trois étapes essentielles; les deux autres étant la déposition de couches minces et la photolithographie. Il existe deux catégories de gravure:

- 1) La gravure humide se fait par attaque chimique en solution aqueuse. En général, par voie humide, la couche est attaquée de façon équivalente suivant toutes les directions de l'espace. La gravure est donc isotrope.
- 2) La gravure sèche : dans laquelle interviennent à la fois les effets de bombardement par des ions et la réaction chimique. On la dénomme R.I.E. (pour Reactive Ion Etching). Sans polarisation particulière des électrodes, l'attaque est en général isotropique. Cependant, lorsque les matériaux à graver ont des orientations préférentielles, comme dans le cas des cristaux semi-conducteurs, la gravure peut se faire préférentiellement suivant des plans réticulaires ou axes cristallographiques.

Ces deux types de gravure interviennent de nombreuses fois au cours des procédés de microfabrication. Elles permettent de graver de façon sélective les couches minces ou le substrat afin de créer des motifs qui auront plusieurs utilités (zone actives des dispositifs, grille de transistors, pistes d'interconnexion, etc..). En utilisant une photorésine photosensible dans les opérations de photolithographie, nous pouvons protéger certaines zones de la structure. La gravure se fera prioritairement sur les zones non protégées.

4.4.2 Fabrication de la capacité

Une gaufre (wafer) de silicium de 150 mm d'épaisseur est utilisée comme base de la structure. Au début, une couche de 250 nm d'aluminium est évaporée sur la gaufrette. Ensuite une étape de photolithographie est nécessaire pour graver cette première couche de métal. En effet une couche de résine photosensible positive (S1813), d'épaisseur 1.4 micromètres, est déposée sur la surface du métal puis chauffée pour être cuite à une température de 115 degrés Celsius pendant 60 secondes. Par la suite, un masque est utilisé pour exposer la résine à l'ultra-violet. Cela est suivi d'une opération de développement permettant le transfert des motifs sur la résine. Une deuxième opération de cuisson est nécessaire à une température de 90 degrés Celsius pendant 120 secondes avant de commencer la phase de gravure du métal.

La couche d'aluminium est gravée par gravure humide à la transenne d'aluminium à une vitesse de 1 nanomètre par seconde. Après avoir fini cette phase, la couche protectrice de résine est retirée en trempant la gaufrette de silicium dans une solution d'acétone.

L'étape qui suit consiste à déposer une couche de résine photosensible telle que celle utilisée précédemment (S1813) d'épaisseur 1 micromètre sur la première couche d'aluminium gravée. Cette dernière sera ensuite cuite pendant 5mn à une température de 130 degrés Celsius. Elle joue le rôle de support pour la partie mobile de la structure. Elle sera retirée à la fin du procédé de fabrication pour libérer la structure sauf les points d'ancrage.

Une couche d'aluminium d'épaisseur 250 nanomètres est déposée par pulvérisation et sélectivement gravée par lift-off. Cette couche est perforée afin de faciliter la gravure de la couche sacrificielle qui est au-dessous. Elle est gravée selon le même procédé que la couche du métal 1 grâce à la transenne d'aluminium.

Pour faciliter la prise des mesures et vu que plusieurs structures sont faites sur la même tranche de silicium, nous avons découpé la gaufre en plusieurs échantillons après avoir déposé toutes les couches formant la structure au complet.

La dernière étape de la fabrication consiste à enlever la couche sacrificielle pour libérer la structure mécanique par la gravure sèche avec de l'oxygène. Cette opération prend une durée de 90 minutes. Les Figure 4.5 et Figure 4.6 montrent deux vues de la structure fabriquée.

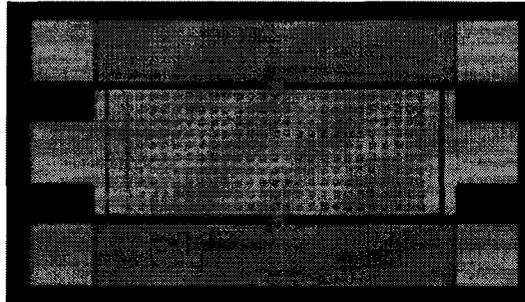


Figure 4.5 Vue de dessus de la capacité fabriqué

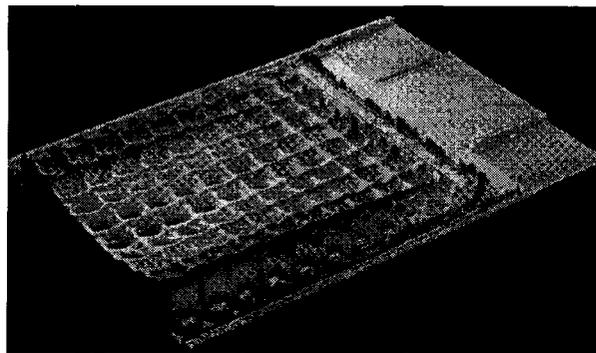


Figure 4.6 Coupe de la structure fabriquée prise par un microscope à balayage numérique

4.5 Mesures

Nous avons fabriqué plusieurs capacités et nous avons pris la moyenne de plusieurs mesures afin que le résultat final soit le plus fiable. Pour faciliter la prise des mesures, la gaufre a été découpée en réticules élémentaires à l'aide d'une scie. Ces réticules ont été collés dans un boîtier pour les protéger contre les chocs mécaniques.

4.5.1 Extraction de la capacité

Pratiquement, il n'existe pas d'équipement permettant de prendre directement les mesures précises de la capacité de ce type de structure fonctionnant dans un environnement RF influencé par l'entourage (lignes de transmission, probes, etc.). Pour cela, nous appliquons une technique indirecte d'extraction de la capacité se basant sur l'usage de plusieurs modèles électriques. Ces modèles prennent en considération tous les effets résistifs, inductifs et capacitifs générés par l'environnement proche et lointain de la capacité MEMS.

La première étape consiste à prélever les paramètres S de la structure par l'analyseur de réseaux (Agilent 8722ES) et les exporter dans le logiciel ADS d'Agilent.

La deuxième étape consiste à choisir un modèle dont les composantes seraient les inconnues et à utiliser d'ADS pour déterminer ces inconnues en se basant sur les valeurs des paramètres S déjà introduits. Les modèles ont été choisis de façon à prendre en considération les capacités parasites dues aux effets de bord et les atténuations aux ports d'accès à la structure.

Les impédances d'entrée et de sortie de la structure sont fixées à 50 Ohms obtenus en choisissant les bonnes dimensions des lignes coplanaires qui donnent accès à la capacité. L'outil linecalc d'ADS est utilisé pour définir les dimensions qui sont respectivement 100 microns pour l'espace entre les lignes et 60 microns pour la ligne RF.

La Figure 4.7 et la Figure 4.8 présentent les modèles retrouvés qui convergent vers les résultats expérimentaux présentés sur les abaques de Smith. Pour garantir la correspondance

des paramètres S mesurés et les paramètres S simulés, plusieurs modèles électriques qui prennent en considération toutes les grandeurs qui entrent en jeu ont été essayés.

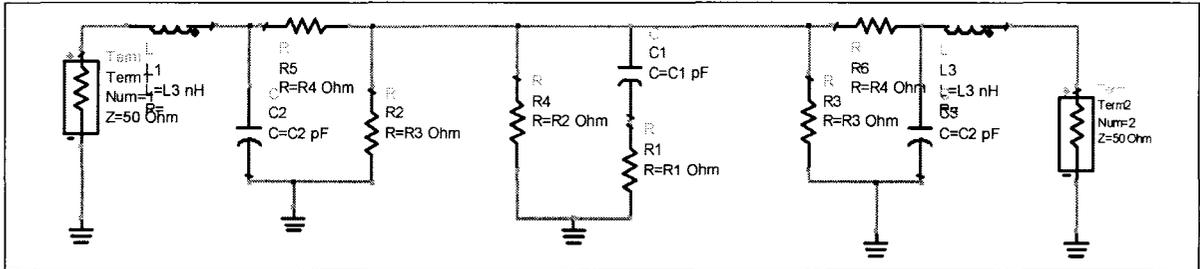


Figure 4.7 Premier modèle choisi pour l'extraction des paramètres de la structure

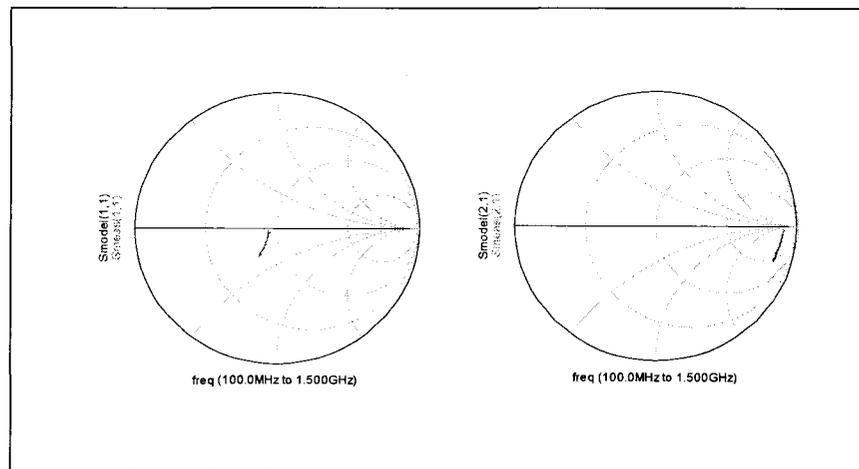


Figure 4.8 Paramètres S_{11} et S_{21} du modèle de la Figure 4.7 et des résultats expérimentaux

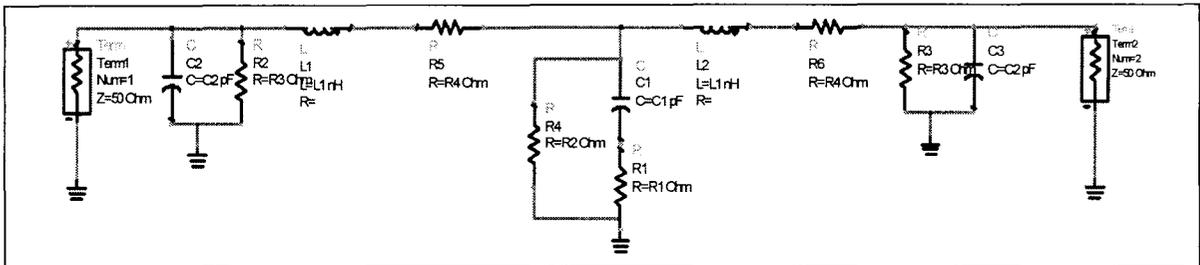


Figure 4.9 Deuxième modèle choisi pour l'extraction des différents paramètres de la structure

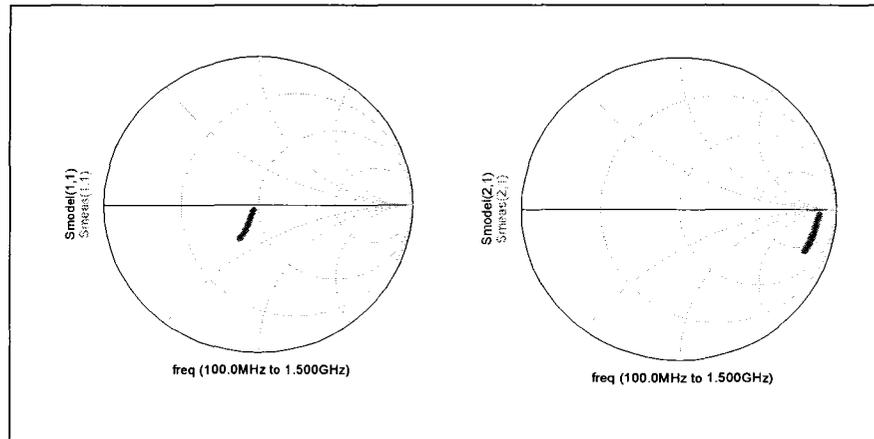


Figure 4.10 Paramètres S_{11} et S_{21} du modèle de la Figure 4.8 et des résultats expérimentaux.

4.5.2 Résultats et interprétations

Le Tableau 4.2 présente les valeurs des capacités théoriques, expérimentales et de simulation obtenues avec les outils Ansys et Cosmos. Les valeurs de la capacité théorique et simulée sont légèrement différentes à cause des effets de bord non considérés dans le calcul théorique et qui dépend du nombre d'éléments considérés par chacun des simulateurs. Par contre, on remarque que la valeur de la capacité expérimentale est largement supérieure aux autres. Ce résultat peut être expliqué par différentes raisons, en particulier la déformation de la plaque

supérieure suspendue, un résidu de la couche sacrificielle supposée être disparue, la gravure accidentelle d'une partie des couches métalliques ou la précision de l'analyseur de spectre.

Tableau 4.2
Valeurs de capacité fabriquée

Capacité			
Théorique	avec Ansys	avec Cosmos	expérimentale
0.830 pF	0.9973 pF (1.2015 C_t)	1.049 pF (1.2646 C_t)	1.66 pF (2 C_t)

La gravure humide utilisée pendant le processus de fabrication, qui est généralement isotrope, a créé des attaques latérales, notamment sous les zones protégées par la photo résine.

Nous remarquons la présence d'une sous-gravure sur la couche d'aluminium déposée et gravée sur le substrat de silicium. Nous observons aussi des structures d'aluminium mal définies dans la mesure où l'Aluminium se retrouve à des endroits inappropriés. Ce qui peut causer des courts-circuits dans un système électronique. Nous avons aussi noté des cas de sur-gravure où certains endroits étaient exemptés d'aluminium alors qu'il devrait en exister surtout à des endroits où les structures sont les plus fines (Voir Figure 4.11).

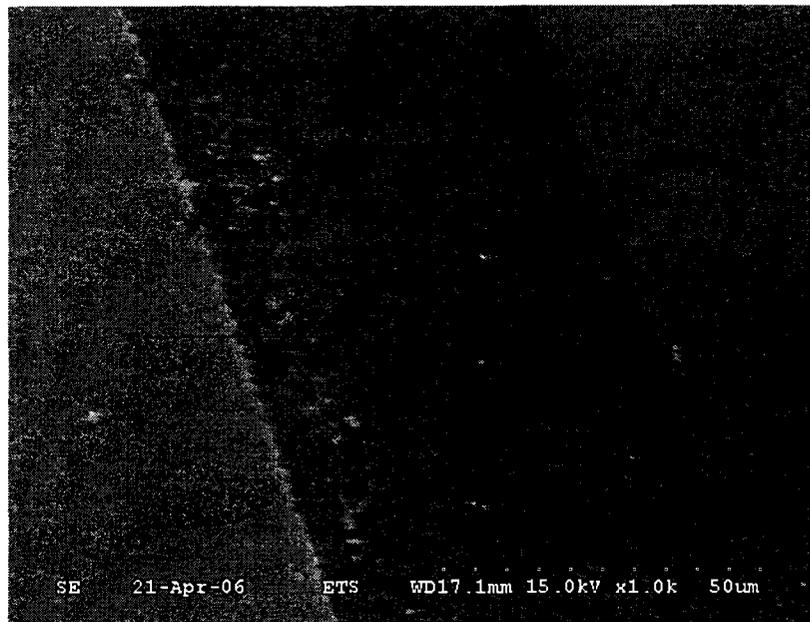


Figure 4.11 Impureté sur le substrat avec une sur-gravure.

4.6 Conclusion

Les résultats de ce chapitre ont permis de conclure que les composants MEMS sont pratiquement réalisables, mais l'obtention de résultats souhaités est difficile. Lors des différentes étapes de fabrication, nous avons rencontrés plusieurs problèmes. Les premiers modèles ont été produits après plusieurs essais infructueux. Nous notons principalement les problèmes liés au contact électrique à cause de l'oxydation des métaux. L'actionnement de la capacité n'a pas réussi. En effet, pour de faibles tensions, nous n'avons pas remarqué un changement dans la valeur de la capacité. De plus, en s'approchant de la tension d'effondrement, la structure se rompt. Cela s'explique par le fait que la structure est sous une forte force de frottement qui l'empêche de bouger jusqu'à la rupture.

Les particules fines dans l'atmosphère peuvent provoquer des courts-circuits et empêchent l'actionnement de la capacité, ce qui est le cas pour plusieurs capacités que nous avons fabriquées.

Plusieurs facteurs pendant et après la fabrication peuvent provoquer la défaillance des microsystèmes MEMS. Parmi ces problèmes, nous pouvons citer :

- La variation thermique : La fabrication nécessite une grande variation de température de plusieurs centaines de degrés Celsius, ce qui influe directement sur le changement des propriétés des matériaux.
- La photolithographie : Les opérations d'alignement des masques, de développement de la résine ou de gravure, doivent être faites avec beaucoup de soins pour éviter les problèmes de contact, ou de sur-gravure ou de sous gravure.

Suite aux résultats trouvés, nous avons constaté plusieurs défauts lors de la fabrication. Cette étude nous a permis de remarquer les points les plus critiques pendant le processus de fabrication, ce qui nous a aidé à améliorer quelques paramètres que ce soit dans le dessin des masques (minimiser les risques de court circuit) ou le changement de la durée de la cuisson.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail est de concevoir une capacité ajustable à très grande plage de variation. Ce composant, qui est commandé de manière électrostatique, a été simulé et optimisé par des outils de simulation commerciaux. Les résultats obtenus sont satisfaisants car ils ont dépassé les limites des variations actuelles. Cependant, ils ne répondent pas à notre objectif vu la grande consommation de courant.

L'analyse de la structure MEMS est faite en tenant compte des considérations électrique et mécanique mises en jeu. Deux simulateurs ont été testés pour des fins de précision. Le premier est Cosmos et le second est Ansys. Ce dernier présente l'avantage de permettre à l'utilisateur de coupler les deux aspects électrique et mécanique pendant la simulation. Cette propriété est absente dans Cosmos où ses deux modules, électrique et mécanique, fonctionnent de façon indépendante. Cependant, Cosmos offre une meilleure visualisation graphique et est plus facile à utiliser. Le problème principal rencontré pendant ces simulations est le manque d'une bibliothèque standard des caractéristiques électrique et mécanique des matériaux utilisés dans le secteur MEMS. De plus, les difficultés de discrétisation des structures (maillage) ont rendu l'opération d'optimisation très lente.

Suite à des difficultés techniques au niveau de la fabrication, la capacité multi-doigts visée n'a pas été fabriquée. En effet, cette dernière ne peut être réalisée que par micro-usinage en volume et qui se fait en deux étapes. La première étape est de graver la partie fixe et la deuxième est de superposer la partie mobile fabriquée sur un autre substrat avec la première. Malheureusement, tout le long de notre travail de maîtrise, cette technologie ne nous a pas été accessible. Par conséquent, nous nous sommes intéressés à la fabrication d'un modèle de capacité MEMS à plaques parallèles afin de valider les résultats des simulateurs. La technique utilisée est le micro-usinage en surface. Les premiers modèles n'ont pas été réussis. Toutefois, en agissant sur certains paramètres pendant les phases de fabrication, tels que le temps et la température de cuisson de la résine, nous avons réussi à créer des modèles fonctionnels. Une différence entre les modèles simulés et les résultats expérimentaux a été

relevée. Elle est due à des problèmes de mauvais contact électrique causé par l'oxydation des surfaces métalliques et les impuretés sur le substrat. Nous avons aussi montré que les capacités parasites ne sont pas négligeables. Par conséquent, il est très important d'utiliser des boîtiers dédiés pour les MEMS afin de les protéger des chocs mécaniques et de la contamination par l'environnement après la fabrication.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre les précautions à prendre pour réussir la conception et la fabrication des composants MEMS. En effet, pour le choix d'un outil de simulation, il est très important que celui-ci permette le couplage automatique entre différents environnements physiques (électrique et mécanique). C'est le paramètre primordial pour le choix entre différents outils commerciaux. De plus, afin que ces simulations présentent une bonne précision, il faut utiliser des calculateurs des ordinateurs dotés d'une grande mémoire permettant de raffiner le maillage. Pour ce qui est de la fabrication, une compréhension des défaillances pouvant être rencontrées pendant ou après le processus de fabrication de la capacité MEMS est nécessaire. Une telle étude est essentielle pour augmenter le taux de réussite de réalisation des composants MEMS. Il est aussi important d'augmenter l'épaisseur des lignes de contact métallique afin de diminuer la résistance des lignes d'accès et de ne pas abimer la fine couche du métal lors de prise de mesures.

ANNEXE I

Programme de simulation électro-mécanique avec Ansys

```
Vltg=10
Lg=430      !largeur ground
Hg=320      !hauteur ground
Tg=5        !thickness ground
Tfb=5       !thickness fixed beam
Tmb=5       !thickness mobile beam
hfb=10      !hauteur de mobile beam
db=100      !longuer de mobile beam
lmb=10      !largeur de mobile beam
Lfb=10      !largeur fixed beam
Hfb=100     !hauteur fixed beam
```

```
/prep7
! keypoints for ground
K,1,0,0
K,2,Lg,0
K,3,Lg,Hg
K,4,0,Hg
A,1,2,3,4
! keypoints for 1st fixed beam en bas a gauche
K,5,0,0,tg
K,6,lfb,0,tg
K,7,lfb,hfb,tg
K,8,0,hfb,tg
A,5,6,7,8
```

! keypoints for 2nd fixed beam en bas a droite

K,9,Lg,0,tg

K,10,Lg,hfb,tg

K,11,lg-lfb,hfb,tg

K,12,Lg-lfb,0,tg

A,9,10,11,12

! keypoints for 3rd fixed beam en haut a droite

K,13,Lg,hg,tg

K,14,Lg,hg-hfb,tg

K,15,Lg-lfb,hg-hfb,tg

K,16,Lg-lfb,hg,tg

A,13,14,15,16

! keypoints for 4th fixed beam en haut a gauche

K,17,0,hg-hfb,tg

K,18,lfb,hg-hfb,tg

K,19, lfb,hg,tg

K,20,0,hg,tg

A,17,18,19,20

! Mobile plate

K,21,lfb,hfb/2+lmb/2, tg+tfb

K,22,lfb,hfb,tg+tfb

K,23,0,hfb,tg+tfb

K,24,0,0,tg+tfb

K,25,lfb,0,tg+tfb

K,26,lfb,hfb/2-lmb/2,tg+tfb

K,27,lg-lfb,hfb/2-lmb/2,tg+tfb

K,28,Lg-lfb,0,tg+tfb

K,29,Lg,0,tg+tfb

K,30,Lg,hfb,tg+tfb

K,31,lg-lfb,hfb,tg+tfb

K,32,lg-lfb,hfb/2+lmb/2, tg+tfb

K,33,lg-lfb,hg-hfb/2-lmb/2,tg+tfb

K,34,Lg-lfb,hg-hfb,tg+tfb

K,35,Lg,hg-hfb,tg+tfb

K,36,Lg,hg,tg+tfb

K,37,Lg-lfb,hg,tg+tfb

K,38,lg-lfb,hg-hfb/2+lmb/2, tg+tfb

K,44,lfb,hg-hfb/2+lmb/2, tg+tfb

K,41, lfb,hg,tg+tfb

K,42,0,hg,tg+tfb

K,39,0,hg-hfb,tg+tfb

K,40,lfb,hg-hfb,tg+tfb

K,43,lfb,hg-hfb/2-lmb/2,tg+tfb

K,45,fbl+db,hfb/2+lmb/2,tg+tfb

K,46,lg-fbl-db,hfb/2+lmb/2,tg+tfb

K,47,lg-fbl-db,hg-hfb/2-lmb/2,tg+tfb

K,48,fbl+db,hg-hfb/2-lmb/2,tg+tfb

A,22,23,24,25

A,21,26,27,32

A,28,29,30,31

A,34,35,36,37

A,33,38,44,43

A,41,42,39,40

A,45,46,47,48

Aadd,6,7,8,9,10,11,12

Vext,1,,,,,tg

Vext,2,5,1,,,tfb

vext,13,,,,,tmb

BLC5,lg/2,hg/2,lg+500,hg+500,40

vovlap,all

et,1,122 ! PLANE121 element for air region

et,2,122 ! Temporary element for beam region

emunit,epzro,8.854e-6 ! Free-space permittivity, μ MKSV units

mp,perx,2,1 ! Relative permittivity for air

vsel,s,volume,,13 ! Area for beam

vatt,1,,1

vsel,s,volume,,14 ! Area for air elements

cm,air,volume ! Group air area into component

vatt,2,,2

allsel,all

smrt,10

mshape,1,3d

mshkey,0

vmesh,all

vsel,s,volume,,13

nslv,s,1 ! select area of volume 1

```

d,all,volt,vltg          ! Apply voltage to beam

vsel,s,volume,,12
nslv, s,1
d,all,volt,0            ! Ground conductor (not meshed)
allsel,all
et,1,0                  ! Set structure to null element type
physics,write,ELECTROS ! Write electrostatic physics file
physics,clear           ! Clear Physics

et,1, 95
et,2,0                  ! Set air to null element type
mp,EX,1,169e3          ! Material properties of Si  $\mu\text{N}/(\mu\text{m})^{**2}$ 
mp,NUXY,1,0.23
mp,DENS,1,2.329e-15

vsel,s,volume,,8
vsel,a,volume,,9
vsel,a,volume,,10
vsel,a,volume,,11
vsel,a,volume,,12
nslv,s,1
d,all,all,0
asel,s,area,,92        ! Apply beam constraints
asel,a,area,,93
asel,a,area,,94
asel,a,area,,110
asel,a,area,,111
asel,a,area,,95
asel,a,area,,96

```

```

asel,a,area,,97
asel,a,area,,104
asel,a,area,,105
asel,a,area,,98
asel,a,area,,99
asel,a,area,,100
asel,a,area,,106
asel,a,area,,107
asel,a,area,,101
asel,a,area,,102
asel,a,area,,103
asel,a,area,,108
asel,a,area,,109
da,all,all,0
alls
finish
physics,write,STRUCTURE
ESSOLV,'ELECTROS','STRUCTURE',3,0,'air',,,,10
finish
/solu
physics,read,ELECTROS      ! Read electrostatic physics file
/SOLUTION
SOLVE
FINISH
/POST1
ETABLE,SENE,SENE          ! STORE ELECTROSTATIC ENERGY
ETABLE,EFX,EF,X          ! STORE POTENTIAL FIELD GRADIENTS
ETABLE,EFY,EF,Y
/NUMBER,1
PLNSOL,VOLT              ! DISPLAY EQUIPOTENTIAL LINES

```

```
PLVECT,EFX,EFY      ! DISPLAY VECTOR ELECTRIC FIELD (VECTOR)
SSUM                 ! SUM ENERGY
*GET,W,SSUM,,ITEM,SENE      ! GET ENERGY AS W
C=(W*2)/((vltg)**2)
C=((C)*1E-12)
*STATUS,C
FINISH
```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] White, D. R. J. (1963). *A handbook on electrical filters : synthesis, design and applications* (Rockville, : WEI, 1963 ed.).
- [2] Charles L. Goldsmith, A. M., Zhimin J. Yao, Shea Chen, John Ehmke,, & Hinzl, D. H. (1998). RF MEMs Variable Capacitors for Tunable Filters. *Int J RF and Microwave CAE*, 362-374.
- [3] Wan-Thai Hsu. (Mars 2003). WIRELESS SYSTEMS DESIGN.
- [4] Dec, A., & Suyama, K. (1999). *A 2.4 GHz CMOS LC VCO using micromachined variable capacitors for frequency tuning*. Paper presented at the Microwave Symposium Digest, 1999 IEEE MTT-S International.
- [5] Darrin J. Young, V. M., Jia-Jiunn Ou, Anthony F. Bernhardt, and Bernhard, & Boser, E. (1998). A Low-Noise RF Voltage-Controlled Oscillator Using On-Chip High-Q Three-Dimensional Coil Inductor and micromachined Variable Capacitor. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head*.
- [6] Chiou, J. C., & Lin, Y. C. (2001). *A novel capacitance control design of tunable capacitor using multiple electrostatic driving electrodes*. Paper presented at the Nanotechnology, 2001. IEEE-NANO 2001. Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on.
- [7] Dec, A., & Suyama, K. (1997). Micromachined varactor with wide tuning range. *Electronics Letters*, 33(11), 922-924.
- [8] Dec, A., & Suyama, K. (1998). *Electro-mechanical properties of a micromachined varactor with a wide tuning range [for VCO]*. Paper presented at the Circuits and Systems, 1998. ISCAS '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on.
- [9] Nieminen, H., Ermolov, V., & Ryhnen, T. (2001). Microelectromechanical capacitor with wide tuning range. *Electronics Letters*, 37(24), 1451-1452.
- [10] Zou, J., & Liu, C. (2000). *Development of a novel micro electromechanical tunable capacitor with a high tuning range*. Paper presented at the Device Research Conference, 2000. Conference Digest. 58th DRC.
- [11] Zou, J., Liu, C., Schutt-Aine, J., Chen, J., & Kang, S.-M. (2000). *Development of a wide tuning range MEMS tunable capacitor for wireless communication systems*. Paper presented at the Electron Devices Meeting, 2000. IEDM Technical Digest. International.

- [12] Darrin J. Young, a. B. E. B. (1996). A Micromachined. Variable Capacitor For Monolithic Low-Noise VCOS. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head*.
- [13] Dec, A., & Suyama, K. (1998). Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 46(12), 2587-2596.
- [14] Dec, A., & Suyama, K. (2000). A 1.9-GHz CMOS VCO with micromachined electromechanically tunable capacitors. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 35(8), 1231-1237.
- [15] Santos, H. J. d. l. (2004). *Introduction to microelectromechanical microwave systems* (2nd ed.). Boston, Mass.: Artech House.
- [16] Rebeiz, G. M. (2003). *RF MEMS : theory, design, and technology*. Hoboken, NJ: J. Wiley.
- [17] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Saiac, J.-H. (1991). *La methode des elements finis formulation de base et problemes lineaires*. Paris: Association française de normalisation.
- [18] Jin, J.-M. (2002). *The finite element method in electromagnetics* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- [19] Madou, M. J. (2002). *Fundamentals of microfabrication : the science of miniaturization* (2nd ed.). Boca Raton, Fla. ; London: CRC Press.