



HAL
open science

Optimisation et réalisation d'un package pour MEMS-RF

Abedel Halim Zahr

► **To cite this version:**

Abedel Halim Zahr. Optimisation et réalisation d'un package pour MEMS-RF. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Limoges, 2016. Français. NNT : 2016LIMO0106 . tel-03467410

HAL Id: tel-03467410

<https://theses.hal.science/tel-03467410v1>

Submitted on 6 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Limoges

École Doctorale Sciences et Ingénierie pour l'Information, Mathématiques

(ED 521)

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Thèse pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES

Discipline : Électronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes

Présentée et soutenue par

Abedel Halim ZAHR

Le 01 Décembre 2016

Optimisation et réalisation d'un package pour MEMS-RF

Thèse dirigée par Romain STEFANINI et Pierre BLONDY

JURY :

Rapporteurs

Mme. Nathalie DELTIPLE, Maître de conférence - HDR, IMS Bordeaux

M. Patrick PONS, Directeur de recherche, LAAS CNRS, Toulouse

Examineurs

M. Francis PRESSECQ, Ingénieur CNES, Toulouse

M. Olivier VENDIER, Ingénieur Thales Alenia Space, Toulouse

M. Dominique BAILLARGEAT, Professeur, XLIM, Université de Limoges

M. Pierre BLONDY, Professeur, XLIM, Université de Limoges

Invités

M. Romain STEFANINI, Président Directeur Général, AIRMEMS, Limoges

Thèse de doctorat

Remerciement

Le travail de cette thèse a été réalisé dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre l'institut de recherche XLIM (UMR CNRS 7252, Université de Limoges) et la société AirMems.

Je remercie tout d'abord Monsieur Dominique Baillargeat pour m'avoir permis de réaliser cette thèse au sein du laboratoire.

Je remercie également Madame Nathalie Deltimple et Monsieur Patrick Pons qui ont accepté de rapporter mon travail de thèse.

Je remercie Monsieur Dominique Baillargeat, Monsieur Olivier Vendier et Monsieur Francis Presseccq d'avoir accepté d'examiner ces travaux.

J'aimerais aussi sincèrement remercier Monsieur Pierre Blondy pour avoir dirigé ma thèse, pour son aide, son soutien quotidien, ses bons conseils, ses remarques pertinentes et son partage de fortes connaissances scientifiques.

Aussi, j'aimerais plus particulièrement remercier Monsieur Romain Stéfani pour avoir encadré et financé ma thèse et de m'avoir intégré très rapidement au sein de l'entreprise, pour sa grande générosité aussi bien sur le plan professionnel que personnel, et pour son incroyable disponibilité.

Je voudrais également remercier tous les permanents de l'axe RF-Elite, Madame Valérie Madrangeas, responsable de cet axe, Messieurs Dominique Cros, Matthieu Chatras, Arnaud Pothier, Aurélian Crunteanu, Cyril Guines, Damien Passerieux et Mes dames Claire Dalmay, Françoise Cosset, Annie Bessaudou pour leurs conseils.

J'aimerais aussi sincèrement et incroyablement remercier mes amis les salariés d'AirMems, Ling Yan Zhang, Jérôme Goujon, Clément Dorion, Aurélien Bénéteau et Antoine Deveautour pour leur encouragement, leur aide et leur partage des connaissances.

Merci à Madame Marie-Laure Guillaud, secrétaire de l'axe RF-Elite pour avoir facilité toutes les démarches administratives souvent dans les plus brefs délais.

Finalement, je remercie tous les amis rencontrés pendant mon séjour en France, de toutes les nationalités et plus particulièrement les libanais à Limoges sans oublier aucune personne.

Dédicace

Je voudrais dédier ce travail :

À mon épouse Karima, l'amour de ma vie, pour la patience et son encouragement dont elle a fait preuve pendant toute la durée de cette thèse et pour avoir accepté de venir me suivre en France et d'être une bonne ingénieure et futur docteur de l'université de Limoges.

À mes parents : mon père (Husseïn), ma mère (Leïla : mon amour éternel) et mes frères (Mohamad, Ahmad, Ali et Khalil) qui, sans eux, je n'aurais certainement pas fait mes études en France. À Mon beau-père (Ziad), ma belle-mère (Houweïda), mes beaux-frères (Tarek et Ahmad) et ma belle-sœur (Hind).

Cette thèse représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de mon parcours universitaire.

Citations

«Certes Dieu aime que lorsque l'un de vous fait un acte qu'il le fasse parfaitement»

Prophète Mohamad

*«Tout le secret d'une vie réussie est de savoir quelle est sa destinée et puis la suivre» **Henry Ford***

Destinée à AirMems

*«Chaque fois que vous voyez une entreprise qui réussit, c'est parce qu'un jour quelqu'un a pris une décision courageuse.» **Peter Drucker***

Table des matières

Introduction générale	1
<hr/>	
Chapitre 1 : Les différents types de packaging des MEMS-RF	5
<hr/>	
1.1 Introduction.....	5
1.2 Les commutateurs MEMS-RF ohmiques	5
1.3 Les commutateurs MEMS-RF capacitifs	6
1.4 Avantages des commutateurs MEMS-RF	7
1.5 Le packaging des MEMS-RF niveau zéro	10
1.5.1 Package par film mince (WLPTF)	10
1.5.1.1 Réalisation du capot	11
1.5.1.1.1 Capot avec ouvertures latérales.....	11
1.5.1.1.2 Capot à ouvertures micrométriques.....	12
1.5.1.1.3 Techniques de collage de capots en films minces	12
1.5.1.2 Types de scellement	14
1.5.1.2.1 Métal évaporé / pulvérisé	14
1.5.1.2.2 Par fusion d'un métal	14
1.5.1.2.3 Par diélectrique pulvérisé	14
1.5.1.2.4 Par un étalement d'un polymère.....	15
1.5.1.3 État de l'art des packages à film mince	15
1.5.2 Package par collage de tranche (WLP).....	21
1.5.2.1 Principe de réalisation.....	21
1.5.2.2 Les différents types de scellement	22
1.5.2.2.1 Le scellement anodique.....	22
1.5.2.2.2 Le scellement direct (Si - Si)	23
1.5.2.2.3 Le scellement eutectique	24

1.5.2.2.4	Le scellement par polymère	25
1.5.2.2.5	Le scellement par glass-frit (Verre fritté)	25
1.5.2.3	Interconnexion des encapsulations par collage de tranche.....	26
1.5.2.4	État de l'art de l'encapsulation par collage de tranche	27
1.6	Herméticité des packages	33
1.6.1	Test de fuite par Hélium	36
1.6.2	Test de fuite par Krypton 85.....	36
1.6.3	Taux de fuite requis par applications.....	37
1.7	Conclusion	38

Chapitre 2 : Conception d'un commutateur MEMS-RF ohmique robuste..... 39

2.1	Introduction.....	39
2.2	Principe de l'actionnement électrostatique	40
2.2.1	Théorie	40
2.2.2	Cas d'un commutateur MEMS-RF ohmique	41
2.3	Présentation et optimisation du commutateur.....	43
2.3.1	Design du MEMS	43
2.3.2	Optimisation de la robustesse	45
2.3.3	Compensation des effets thermiques.....	47
2.3.3.1	Définition des contraintes	47
2.3.3.2	Solutions proposées.....	49
2.4	Étude du rebond lors de la fermeture du commutateur.....	53
2.4.1	Influence de la tension appliquée	54
2.4.2	Influence d'un stoppeur plus haut.....	56
2.5	Fabrication	59

2.6 Mesures des performances du commutateur	61
2.6.1 Caractérisation RF	61
2.6.2 Temps de commutation	62
2.6.3 Linéarité	64
2.7 Conclusion	66

Chapitre 3 : Étude d'une encapsulation par film mince métallique... 67

3.1 Introduction.....	67
3.2 Principe de l'encapsulation métallique	68
3.3 Présentation du capot à réaliser.....	70
3.4 Analyse mécanique de l'encapsulation film mince	72
3.4.1 Influence des contraintes sur le capot métallique	73
3.4.2 Choix du matériau du scellement.....	75
3.4.2.1 Effet d'une pression externe.....	75
3.4.2.2 Influence de contraintes résiduelles du scellement.....	76
3.4.3 Influence de la température	77
3.4.4 Influence du SiN sur les performances RF	79
3.5 Réalisation et caractérisation RF	80
3.6 Conclusion	85

Chapitre 4 : Étude d'une encapsulation par collage de tranche 87

4.1 Introduction.....	87
4.2 Influence du capot en Silicium sur la réponse RF d'une ligne coplanaire.....	88
4.2.1 Influence de la hauteur de la cavité	88
4.2.2 Influence du positionnement du package.....	90

4.3 Influence du capot sur les performances du commutateur	92
4.4 Fabrication du capot	93
4.5 Mesures de performances	95
4.5.1 Mesure de l'influence du package sur un substrat de verre.....	95
4.5.2 Performances d'un MEMS optimisé et encapsulé sur Silicium.....	96
4.5.3 Test de l'herméticité.....	99
4.5.4 Tests de fiabilité	99
4.6 Conception d'un SPST et SPDT tout encapsulé à base de MEMS-RF.....	101
4.6.1 Conception d'un SPST à MEMS-RF encapsulé.....	102
4.6.2 Conception d'un SPDT à MEMS-RF encapsulé	104
4.7 Étude d'une transition Flip-Chip	109
4.7.1 Principe.....	110
4.7.2 Conception et optimisation de la structure	111
4.7.2.1 Conception d'une ligne coplanaire encapsulée	111
4.7.2.2 Conception de la transition flip-chip.....	112
4.7.3 Fabrication et mesure	113
4.8 Conclusion	115
<hr/>	
Conclusion générale.....	117
<hr/>	
Références bibliographiques.....	119
Perspectives.....	125
Bibliographie personnelle.....	129

Table des illustrations

Chapitre 1

Figure 1-1 : Principe de fonctionnement d'un commutateur ohmique et son schéma équivalent.	6
Figure 1-2 : Principe de fonctionnement d'un commutateur capacitif.....	7
Figure 1-3 : Principe de l'encapsulation par dépôt de film mince.....	11
Figure 1-4 : Principe de l'encapsulation par dépôt de film mince.....	12
Figure 1-5 : Exemple d'un capot avec nano trous sur le dessus.	12
Figure 1-6 : Principe d'encapsulation par collage d'un film mince.	13
Figure 1-7 : Principe du conditionnement par collage de films en utilisant une couche sacrificielle et un substrat moule.	13
Figure 1-8 : Scellement par un métal évaporé / pulvérisé.....	14
Figure 1-9 : Vue en coupe et de dessus d'un scellement par un bouchon métallique.....	14
Figure 1-10 : Vue en coupe et de dessus d'un scellement par un film diélectrique.....	15
Figure 1-11 : Photo MEB a) de package en Ni, b) scellement par une soudure localisée au niveau de trous de libération, c) scellement par un dépôt d'un film mince en Or et d) scellement par une bille métallique [21].	16
Figure 1-12 : Commutateur MEMS-RF encapsulé par un film mince de dioxyde de silicium réalisé par CEA-LETI [20].....	17
Figure 1-13 : Vue de dessus de commutateur capacitif de MEMtronics a) non encapsulé, b) encapsulé [18].	17
Figure 1-14 : Photo MEB de commutateur encapsulé de RFMD [33].....	18
Figure 1-15 : MEMS-RF capacitifs de Cavendish Kinetics, à gauche : vue en coupe des niveaux de procédé CMOS intégrant les MEMS-RF encapsulés, à droite : Zoom sur un MEMS-RF dans son cavité [34].	18
Figure 1-16 : a) Principe de l'encapsulation métallique développé par XLIM, b) Micro-photo du MEMS packagé [19].	19
Figure 1-17 : Commutateur ohmique développé par NXP encapsulé par un film mince en SiN [22].	20
Figure 1-18 : Étapes de procédé de fabrication des packages à base alumine nano poreuse...	20

Figure 1-19 : a) Schéma de principe d'anodisation utilisé par IMEC, b) Photo MEB de l'alumine nano structuré avant scellement.	21
Figure 1-20 : Principe de l'encapsulation par collage tranche.	22
Figure 1-21 : Principe de scellement anodique verre-silicium.....	23
Figure 1-22 : Principe de scellement direct Silicium-Silicium.	24
Figure 1-23 : a) Diagramme de phase Au-Si, b) liaison eutectique Au-Si à la température ambiante et à 363 °C [39].....	25
Figure 1-24 : Principe du scellement par glass frit.....	26
Figure 1-25 : Différents types d'interconnexion pour une liaison par collage de tranche.	27
Figure 1-26 : Exemple d'un scellement eutectique entre un capot en verre et une tranche en silicium [41].	28
Figure 1-27 : a) Photo MEB de commutateur Radant, b) Photo MEB d'une puce contenant 4 MEMS-RF emballée par un capot en Silicium utilisant un scellement glass Frit [45].	28
Figure 1-28 : Exemple de commutateur MEMS-RF encapsulé par un scellement BCB entre un capot verre et un substrat silicium [46].	29
Figure 1-29 : a) Vue en 3D, b) schéma en coupe du package, c) Paramètres S mesurés d'une ligne emballée de 100 µm de longueur [47].	29
Figure 1-30 : MEMS-RF emballé d'Omron [48].....	30
Figure 1-31 : Photo MEB de l'encapsulation par collage de tranche avec un scellement en glass frit [49].	30
Figure 1-32 : Considérations pour avoir une meilleure herméticité des MEMS-RF.	33
Figure 1-33 : Efficacité et choix des matériaux du point de vue de l'herméticité [50].....	34
Figure 1-34 : Principe de test de fuite fine par Hélium.....	36
Figure 1-35 : Principe de test de fuite fine par Kr ⁸⁵	37

Chapitre 2

Figure 2-1 : Principe de fonctionnement d'un actionnement électrostatique entre deux plaques métalliques.	40
Figure 2-2 : Déplacement de la poutre en fonction de la tension appliquée.	41
Figure 2-3 : Bilan de forces appliqué lors d'actionnement électrostatique d'un commutateur MEMS-RF.....	42
Figure 2-4 : Actionnement et relâchement électrostatique d'un micro-commutateur MEMS-RF.	42

Figure 2-5 : Vue de dessus et en coupe du commutateur MEMS-RF.....	44
Figure 2-6 : Deux formes des électrodes d'activation étudiées.	44
Figure 2-7 : Raideurs d'activation et de relâchement en fonction de l'épaisseur de la poutre.	46
Figure 2-8 : Évolution de la tension d'activation et relâchement du MEMS en fonction du gap pour différents épaisseurs de la poutre.	46
Figure 2-9 : Évolution de la force de contact et rappel du MEMS en fonction du gap pour différents épaisseurs de la poutre.	46
Figure 2-10 : Modèle d'un gradient de contrainte dans deux couches de mêmes épaisseurs.	48
Figure 2-11 : La courbe typique de la contrainte en fonction du temps pour représenter le comportement du fluage qui est divisé en trois régimes.	48
Figure 2-12 : Von Mises stress en MPa de trois différentes formes d'ancrage pour une force de contact de 1,34 mN et une tension appliquée de 70V.	49
Figure 2-13 : Déflexion de la poutre en présence de contraintes résiduelles en tension et compression a) vue en coupe axe Y, b) au niveau de dimple de contact.	50
Figure 2-14 : Déflexion de la membrane suivant l'axe Z en présence de contraintes résiduelles de 100 MPa a) en compression, b) en tension.	50
Figure 2-15 : Propriétés du commutateur en fonction de $\Delta\sigma$ a) Tension d'abaissement et de relâchement, b) force électrostatique, c) force de contact et d) force de relâchement	52
Figure 2-16 : Influence de la température sur le micro-commutateur.....	52
Figure 2-17 : Illustration du comportement mécanique du rebond subit par un commutateur MEMS.	54
Figure 2-18 : Déplacement de la poutre mobile en fonction du temps pour différentes tension d'activation appliquée.	55
Figure 2-19 : Vue en coupe AA' du principe de l'étude proposée pour réduire le nombre du rebond.....	56
Figure 2-20 : Modes de résonance mécanique du commutateur.....	57
Figure 2-21 : Les stoppeurs qui ont été étudiés (en rouge) pour avoir une épaisseur plus grande que celle de dimple principal (en bleu pointillé).....	57
Figure 2-22 : Résultats de rebond pour différents valeurs de la hauteur de stoppeur de chaque mode de résonance étudié.	59
Figure 2-23 : procédé de fabrication.	60
Figure 2-24 : Photo MEB du commutateur optimisé.	60
Figure 2-25 : Paramètres S mesurés du commutateur a) à son état bloqué et passant.	61

Figure 2-26 : Montage expérimental pour la mesure d'une tension aux bornes de commutateur en fonction du temps.	63
Figure 2-27 : Mesure de temps de commutation du MEMS pour différentes tensions d'activation.....	64
Figure 2-28 : Temps de relâchement de la poutre pour revenir à son état initial.....	64
Figure 2-29 : Zoom sur les fronts montants de temps de commutation à gauche et temps de relâchement à droite.	64
Figure 2-30 : Montage utilisé pour mesurer la linéarité IP1 du composant.	65
Figure 2-31 : Comparaison entre la mesure et la réponse idéale du point de compression 1 dB du commutateur à 2 GHz, a) non activé, b) activé.....	65

Chapitre 3

Figure 3-1 : Vue en coupe et schéma électrique équivalent du commutateur MEMS-RF non encapsulé.	68
Figure 3-2 : Vue en coupe et schéma équivalent du commutateur encapsulé.....	69
Figure 3-3 : Vue de dessus et en coupe du micro-commutateur MEMS-RF encapsulé.	70
Figure 3-4 : Paramètres [S] simulés à l'état bas et haut du micro-commutateur encapsulé et non encapsulé.	71
Figure 3-5 : Déflexion (en μm) du capot pour une contrainte résiduelle de 300 MPa en tension.	73
Figure 3-6 : Déflexion du capot en fonction des contraintes résiduelles suivant l'axe AA'....	74
Figure 3-7 : Déflexion du capot en fonction de gradient de contraintes suivant l'axe AA'. ...	74
Figure 3-8 : Vue en coupe du principe de scellement du capot.	75
Figure 3-9 : Déflexion du centre du capot en fonction de différentes pressions appliquées par-dessus.	76
Figure 3-10 : Déflexion pour -300 MPa de contraintes résiduelles dans l'or avec un scellement de 3 μm a) Vue en 3D et b) centre du capot.....	77
Figure 3-11 : Déflexion du capot scellé par 3 μm en SiN sous une température $T=150^\circ\text{C}$ et a) $\sigma_{\text{res}}= 0$ MPa, b) $\sigma_{\text{res}}= -150\text{MPa}$ dans l'Or et $\sigma_{\text{res}}= -500\text{MPa}$ dans la couche diélectrique. ..	78
Figure 3-12 : Déflexion au centre du capot scellé en fonction de la température en présence de a) $\sigma_{\text{res}}=0$ MPa, b) $\sigma_{\text{res}}= -150\text{MPa}$ dans l'Or et $\sigma_{\text{res}}= -500\text{MPa}$ dans la couche diélectrique.78	
Figure 3-13 : Structure sous HFSS du MEMS encapsulé (à gauche) et scellé par SiN (à droite).	79

Figure 3-14 : Paramètres [S] simulés à l'état bas et haut du micro-commutateur scellé et non scellé.....	80
Figure 3-15 : Vue en coupe YY' du procédé de fabrication du commutateur encapsulé.	81
Figure 3-16 : Photo MEB du commutateur sans et avec son capot métallique avant scellement.	82
Figure 3-17 : Micro photo du commutateur et de son capot.	83
Figure 3-18 : Mesures des paramètres [S] à l'état bas et haut du micro-commutateur encapsulé et non encapsulé.	84
Figure 3-19 : Mesure d'isolation du commutateur encapsulé avant et après scellement.	84
Figure 3-20 : Micro photo du commutateur encapsulé et scellé avec SiN.....	85

Chapitre 4

Figure 4-1 : Influence RF dans le dimensionnement du package d'une ligne coplanaire.	88
Figure 4-2 : Structure sous HFSS d'une ligne coplanaire en Or encapsulée par un capot en silicium.	89
Figure 4-3 : Influence de la hauteur H de la cavité sur la réponse RF d'une ligne coplanaire adaptée 50 Ω	90
Figure 4-4 : Vue de dessus de la ligne coplanaire encapsulée avec un capot en silicium a) centré, b) X+50 μm et c) X+50 μm ; Y+50 μm	90
Figure 4-5 : Décalage du capot suivant l'axe X ou Y, a) perte d'insertion, b) perte de réflexion.	91
Figure 4-6 : Modèle sous HFSS du commutateur encapsulé.	92
Figure 4-7 : Paramètres S simulées du commutateur avant et après l'encapsulation.	93
Figure 4-8 : Gravure d'un substrat de Silicium qui forme les capots.	94
Figure 4-9 : Photo MEB du package sans et avec le glass frit.	95
Figure 4-10 : Une comparaison des paramètres S mesurés du commutateur encapsulé et non encapsulé sur un substrat de verre a) à son état passant, et b) son état bloqué.	96
Figure 4-11 : Photo MEB du commutateur encapsulé réalisé sur Silicium.	97
Figure 4-12 : Mesure paramètres S du commutateur encapsulé sur Silicium a) à son état passant, et b) son état bloqué.	98
Figure 4-13 : Réponse dynamique du commutateur encapsulé dans deux milieux différents : en air et sous vide.....	99
Figure 4-14 : Synoptique général du banc de fiabilité DC.....	100

Figure 4-15 : Schéma du banc de mesure DC 8 voies.	100
Figure 4-16 : Évolution de la résistance de contact et des tensions en fonction du nombre de cycles.	101
Figure 4-17 : Schéma équivalent d'un SPST MEMS-RF en configuration Série/Shunt a) à l'état passant, b) à l'état bloqué.	102
Figure 4-18 : Photo du commutateur SPST MEMS-RF encapsulé en configuration série/shunt avec une coupe transversale.	103
Figure 4-19 : Simulations et mesures des paramètres S du SPST MEMS-RF, A) Pertes d'insertion et réflexion, B) Isolation.	104
Figure 4-20 : Schéma équivalent du SPDT MEMS-RF basé sur deux SPSTs étudiés dans la partie précédente.	104
Figure 4-21 : Simulations et mesures des paramètres S du SPDT MEMS-RF, A) transmission et Réflexion en entrée, B) Isolation P1-P2, C) Isolation P2-P3.	106
Figure 4-22 : Photo du commutateur SPDT MEMS-RF encapsulé.	106
Figure 4-23 : Schéma électrique du commutateur SPDT MEMS-RF.	106
Figure 4-24 : Interconnexion par wire bonding entre une plaque de fiabilité et un commutateur encapsulé.	109
Figure 4-25 : Étapes de conception de la transition flip-chip étudiée.	110
Figure 4-26 : Structure de la ligne encapsulée sur HFSS.	111
Figure 4-27 : Paramètres S simulés de la ligne encapsulée.	112
Figure 4-28 : Structure HFSS de la transition flip-chip conçue sur un substrat RT/Duroid 5880 avec des accès adaptés 50Ω.	112
Figure 4-29 : Paramètres S simulés de la ligne encapsulée et reportée sur Duroid (RO5880).	113
Figure 4-30 : Photo d'une ligne coplanaire encapsulée avec les billes de transition.	114
Figure 4-31 : Photo de la ligne coplanaire encapsulée et reportée sur un substrat RT/Duroid 5880.	114
Figure 4-32 : Paramètres S mesurés de la ligne encapsulée avant et après report sur le substrat Duroid.	115

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1-1 : Comparaison des performances entre commutateurs MEMS-RF électrostatiques et autres technologies.	9
Tableau 1-2 : Tableau de synthèse qui résume les différentes techniques de packaging.....	32
Tableau 1-3 : Tests d’herméticité de la méthode 1014 (MIL-STD-883).	35
Tableau 1-4 : Autres tests d’herméticité applicables aux composants MEMS-RF.....	35
Tableau 1-5 : Applications des MEMS-RF selon leur durée de vie, leurs taux de fuite et leurs types et matériaux de scellement utilisés.	37

Chapitre 2

Tableau 2-1 : Paramètres simulés du commutateur pour deux différentes surfaces d’actionnement.	45
Tableau 2-2 : Mesure de la tension V_p de plusieurs commutateurs du même substrat.	62

Chapitre 3

Tableau 3-1 : Extraction des paramètres de modèle du commutateur encapsulé.....	72
Tableau 3-2 : Caractéristiques des diélectriques utilisées dans la simulation pour sceller le capot.	75

Chapitre 4

Tableau 4-1 : Mesure de la tension V_p du commutateur encapsulé.....	97
Tableau 4-2 : Paramètres du SPST simulés	107
Tableau 4-3 : Tableau comparatif avec des commutateurs SPDT commerciaux et publiés. .	108

Introduction générale

Depuis la fin du 20^{ème} siècle, le nombre de données numériques échangées n'a cessé de croître poussant l'industrie des secteurs de la téléphonie mobile, de l'internet haut débit, des objets connectés et des satellites de télécommunications à développer de nouveaux systèmes électroniques moins coûteux, plus petits et plus performants. L'une des premières grandes révolutions fut l'arrivée de la technologie MMIC (acronyme anglais de Monolithic Microwave Integrated Circuit) créée en 1968 [1]. Cette technologie a permis l'intégration de composants actifs et passifs (mélangeur, filtre, antenne, oscillateur, multiplexeur, etc.) sur un seul et même substrat réduisant drastiquement la taille des chaînes d'émission/réception radios. Dans les années 80, les systèmes radiofréquences reconfigurables font leur apparition tandis que les standards sans-fils évoluent et se diversifient. La recherche se focalise alors sur la conception de nouveaux circuits RF agiles en fréquence (filtre, déphaseur, antenne, tuner d'impédance, etc.).

Un des éléments clé de ces circuits reconfigurables faisant l'objet de nombreuses publications scientifiques [2], [3], [4], est l'élément d'accord dans la plupart du temps assuré par un ou plusieurs commutateurs. En effet, au-delà de leur simple rôle de routeur (interrupteur, matrice de commutation, etc.), les commutateurs doivent assurer un certain niveau de performance pour éviter une dégradation du circuit reconfigurable qu'ils intègrent tout en leur procurant le maximum d'agilité.

Actuellement, l'industrie des semi-conducteurs offre deux solutions pour réaliser la fonction de commutation : soit par les diodes PIN, soit par les transistors à effet de champs plus communément disposés sur une base en Arséniure de Gallium, Silicium, SOI (Silicon on Insulator), SOS (Silicon on Sapphire) ou Nitrure de Gallium. Aujourd'hui, ces deux types de technologies garantissent des performances acceptables à basse fréquences (10-6000 MHz), un temps de commutation faible et une basse consommation pour un coût dérisoire. Cependant, au-delà de 6 GHz, il est souvent nécessaire d'effectuer un compromis entre les pertes d'insertion, l'isolation, la linéarité et le temps de commutation. De plus, leur tenue en puissance se dégrade sévèrement avec la fréquence.

La technologie MEMS-RF (acronyme anglais de "Radio Frequency Micro Electro Mechanical Systems" : systèmes micro-électromécaniques radiofréquences) rassemble le meilleur des technologies semi-conducteurs jusqu'à 100 GHz. Inventée en 1965 par Nathanson

[5] sous la forme d'un transistor MOS N-P-N à grille résonnante, elle fut mise en œuvre en 1970 pour des capteurs de pression, température et accéléromètres. C'est en 1979 qu'apparait le premier commutateur MEMS développé par *K.E. Peterson* [6] fonctionnant à basses fréquences sur la base d'un actionnement électrostatique. Il faudra attendre 1991 pour voir apparaître le premier commutateur électromécanique pour des applications micro-ondes [7] conçu par *Larry Larson* du laboratoire HRL à Malibu en Californie aux États-Unis sur un projet financé par la défense américaine (*DARPA*).

Depuis ce jour, les MEMS-RF présentent toujours la meilleure solution de commutation radiofréquence en termes d'isolation, des pertes d'insertion et de linéarité, l'écart avec les semi-conducteurs étant d'autant plus significatif avec la montée en fréquence. Ces dernières années, de nombreux efforts institutionnels et industriels ont permis de résoudre les problèmes de fiabilité faisant barrière à l'industrialisation des MEMS-RF permettant même leur intégration dans le secteur de la téléphonie mobile. S'agissant de structures mécaniques à l'échelle micrométrique nécessitant une protection vis-à-vis de l'environnement extérieur, l'encapsulation de ces composants reste un sujet d'actualité.

Ce manuscrit présente les travaux de thèse effectués au laboratoire de recherche XLIM en collaboration avec la société AirMems ayant pour objectif la conception et l'optimisation d'une encapsulation zero-level hermétique destinée au commutateur MEMS-RF d'AirMems.

Dans le premier chapitre, nous ferons une introduction générale sur la technologie MEMS-RF. Les différents types d'encapsulation niveau zéro et leurs techniques de scellement les plus communément appliquées aux MEMS-RF seront ensuite présentées. Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'herméticité, facteur garantissant une atmosphère de fonctionnement contrôlée du composant et assurant un certain niveau de fiabilité.

Dans le deuxième chapitre, les paramètres électromécaniques d'un composant MEMS-RF de type ohmique seront optimisés pour garantir la robustesse du contact électrique lors d'activations répétées et une stabilité thermique de la membrane. Tous les paramètres du commutateur (force de contact, force de rappel, tension d'activation, temps de commutation, etc...) seront présentés dans ce chapitre, également le procédé de fabrication et les performances du commutateur (caractérisation RF, linéarité, temps de commutation).

Dans le troisième chapitre, une encapsulation par un film mince métallique du commutateur MEMS-RF optimisé sera réalisée. Le principe de cette encapsulation est de déposer une couche d'or électrolysée au-dessus du commutateur pour le protéger. Ensuite, un diélectrique isolant spécifique est utilisé pour sceller ce capot métallique. Cette encapsulation est une technique faible coût puisqu'elle est partie intégrante du procédé de fabrication. La

conception et les dimensions du film métallique sont optimisées pour réduire son influence sur les performances du micro-commutateur afin d'obtenir de faibles pertes d'insertion et une isolation élevée.

Enfin, *le chapitre 4* présentera une encapsulation par collage de tranches. Le principe est de reporter un substrat de silicium de haute résistivité (HRSi) micro usiné sur un substrat HRSi comportant sur la structure MEMS en utilisant un verre fritté pour sceller ces deux substrats. La première partie de ce chapitre est consacrée à étudier l'influence de ce package sur les performances RF du commutateur. Nous présenterons ensuite le procédé de fabrication et les mesures RF du commutateur encapsulé et non encapsulé et des mesures d'herméticité. La deuxième partie de ce chapitre présente la conception et la réalisation d'une transition Flip-chip. Cette réalisation a pour but la montée en fréquence (DC-40 GHz) tout en conservant les performances du commutateur. Des simulations et des mesures en paramètres S seront réalisées.

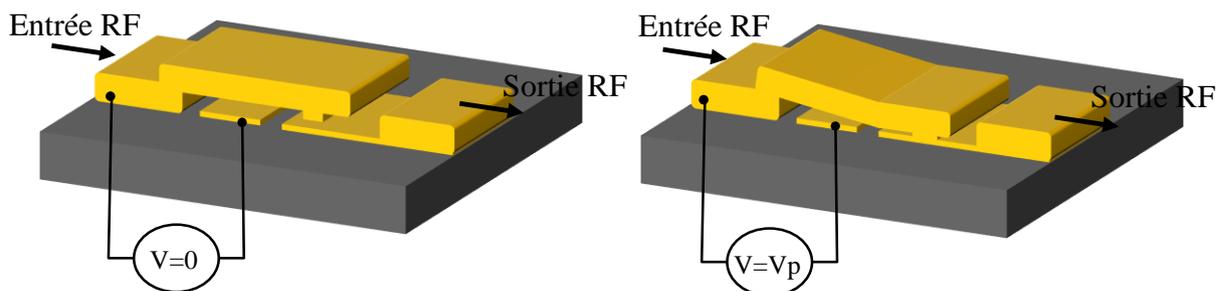
Chapitre 1 : Les différents types de packaging des MEMS-RF

1.1 Introduction

La technologie MEMS-RF est un sujet de recherche très développé dans le domaine micro-électronique. Ces composants électromécaniques miniatures peuvent être commutés de manière électrostatique, magnétique, thermique et piézoélectrique. Globalement, la taille des MEMS-RF varie de la dizaine de micromètres jusqu'au millimètre, ils sont différenciables en deux catégories: des commutateurs à contact ohmique (contact métallique) et des commutateurs capacitifs. La première partie de ce chapitre fera la description de ces types de commutateurs MEMS-RF. Ensuite un état de l'art des différents types de packaging des MEMS-RF sera présenté.

1.2 Les commutateurs MEMS-RF ohmiques

Les commutateurs MEMS-RF ohmiques ou commutateurs à contact métallique sont constitués d'une poutre mobile métallique reliée à l'entrée RF et disposée en face de la ligne de sortie RF. À l'état bloqué (figure 1-1-a), la tension amenée sur l'électrode d'activation est nulle ($V=0$ Volts), la ligne d'entrée est alors séparée de la ligne de sortie par une capacité C_{MEMS} .



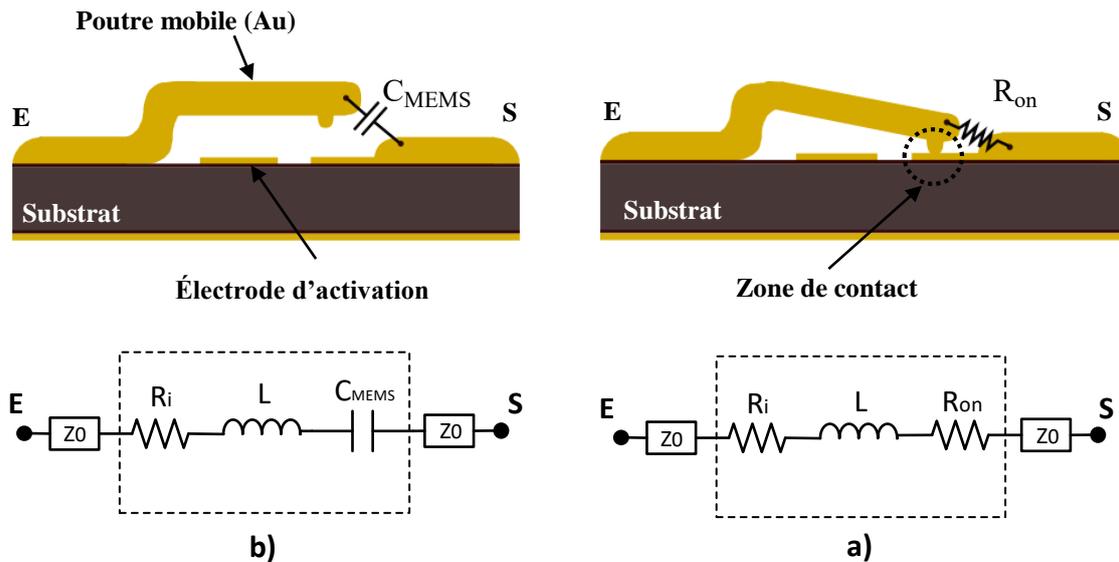
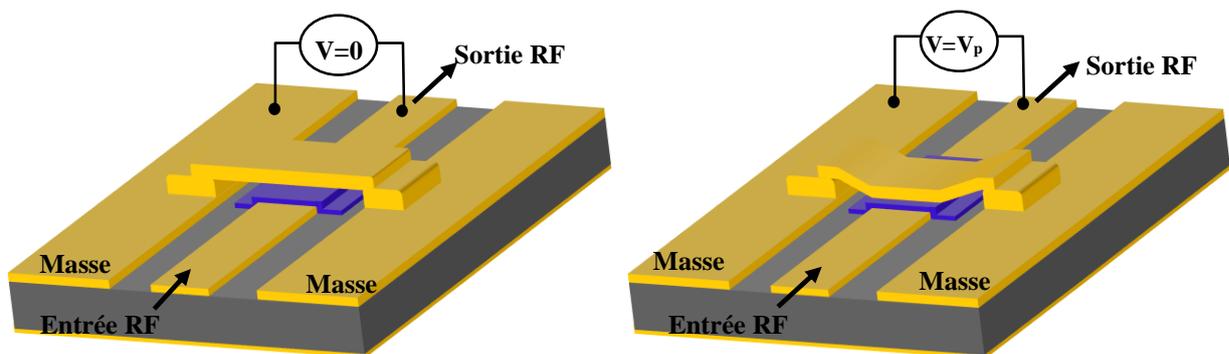


Figure 1-1 : Principe de fonctionnement d'un commutateur ohmique et son schéma équivalent.

Lorsqu'un potentiel électrique suffisant est amené sur l'électrode d'activation, la poutre mobile rentre en contact avec la ligne RF de sortie créant un contact métallique présenté par une résistance de contact en série R_{on} (0,5 - 3 Ω) (figure 1-1-b). Les pertes du signal transmis sont alors liées à cette résistance, plus cette résistance est faible, moins le signal transmis sera atténué. De la même manière, plus C_{MEMS} est faible, plus le commutateur sera capable de bien isoler la sortie de l'entrée.

1.3 Les commutateurs MEMS-RF capacitifs

On parle d'un commutateur capacitif lorsque la partie mobile et la ligne de transmission RF sont séparées par une couche diélectrique. Le composant présente une faible capacité C_{off} lorsque le commutateur est à l'état haut ($V=0$) (Fig.1-2.a) et une forte capacité C_{on} lorsque le commutateur est à son état bas ($V=V_p$) (Fig.1-2.b). Ce type de commutateur est caractérisé par son rapport capacitif (C_{on} / C_{off}).



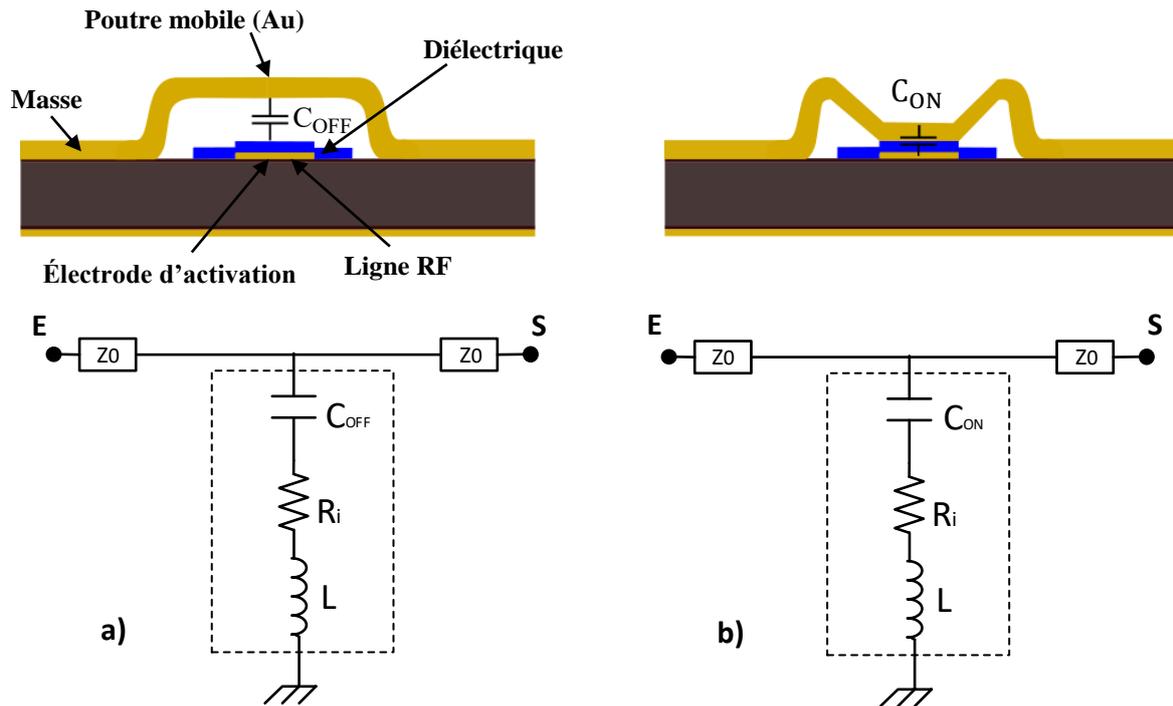


Figure 1-2 : Principe de fonctionnement d'un commutateur capacitif et son schéma équivalent.

1.4 Avantages des commutateurs MEMS-RF

Les commutateurs MEMS-RF présentent certains avantages par rapport aux commutateurs semi-conducteurs (FET et diode PIN) puisqu'ils offrent:

1. De très faibles pertes d'insertion : les commutateurs MEMS-RF sont composés de structures métalliques relativement épaisses et créent une jonction métal-métal quasi parfaite entre l'entrée et la sortie RF qui procure de très faibles pertes métalliques entre 0,05 - 0,2 dB sur la bande de fréquence de DC à 50 GHz [8].
2. Une isolation élevée : à l'état non-activé, les lignes RF d'entrée et de sortie sont séparées par une fine couche d'air (0,2- 2,5 μm) et présentent une surface en vis-à-vis très faible engendrant une faible valeur de capacité (1-40 fF) [8].
3. Linéarité élevée : la mécanique du composant procure une très faible sensibilité à l'envoi de plusieurs signaux RF. Les produits d'intermodulation d'ordre 2 et 3 (IIP2 et IIP3) sont en général supérieurs à 110 et 70 dBm respectivement [9].

4. Très faible consommation de puissance : Malgré leur tension de commande élevée (en général >20 V), il circule très peu de courant dans la ligne d'activation. La puissance consommée par un MEMS-RF est de l'ordre de quelques centaines de nano watts lorsque la poutre est en mouvement et reste quasi nulle en dehors.

Le tableau 1-1 montre une comparaison de performances entre les commutateurs MEMS-RF et les autres technologies.

Tableau 1-1 : Comparaison de performances entre commutateurs MEMS-RF électrostatiques et autres technologies.

	PIN Diodes GaAs/ AlGaAs	MESFET/ HEMT	CMOS SOI/SOS	HEMT GaN	Relais mécanique	Commutateur ferrite	MEMS-RF
R_{on}.C_{off} (fs)	40	150	100	150	<5	<5	5-50
Fréquence de travail	DC - 100 GHz	DC - 10 GHz	DC - 100 GHz	DC - 20 GHz	DC - 100 GHz	DC - 100 GHz	DC - 100 GHz
Linéarité (IP3)	45 dBm	45 dBm	> 70 dBm	60 dBm	> 70 dBm	50 dBm	>70 dBm
Tenue en puissance (Commutation froide)	> 50W	8 W	17 W	>50W	> 50W (quelques Millions de cycles)	>50W	10-20 W
Consommation de puissance	50 mW	10-50 μ W	10-100 μ W	10 mW	> 100 mW	1 W	< μ W
Temps de commutation	5 ns	0,5-10 ns	0,2-10 μ s	20 ns	-	1 μ s	50-500 ns
Temps de latence	-	-	1-20 μ s	-	0,5-20 ms	1-10 μ s	1-10 μ s (50 ns démontré)
Taille	petite	petite	petite	petite	grande	grande	petite
Références	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]

1.5 Le packaging des MEMS-RF niveau zéro

Les composants MEMS-RF sont très sensibles à leur environnement extérieur. Par conséquent, des boîtiers doivent les protéger contre l'humidité, la variation de pression, les poussières et la corrosion qui peuvent avoir des conséquences désastreuses sur les performances des composants MEMS-RF. C'est pourquoi les MEMS-RF doivent être encapsulés hermétiquement au niveau zéro dans un environnement salle blanche. Il existe deux types d'encapsulation des MEMS-RF qui seront présentés dans ce chapitre.

Le premier est l'encapsulation par films minces ou en anglais «WLTFP» (Wafer Level Thin Film Package). Cette technique d'encapsulation est très intégrée et donc très peu coûteuse puisqu'elle permet d'augmenter le nombre de composants fabriqués par substrat. De plus, elle fait partie intégrante du procédé de fabrication qui reste à basse température ($\sim 250^{\circ}\text{C}$) ce qui rend cette technique très compatible aux MEMS-RF.

Le deuxième est l'encapsulation par collage de tranche ou en anglais «WLP» (Wafer Level Packaging). Les matériaux utilisés pour ce type d'encapsulation sont généralement du verre ou du silicium. Ce type de packaging nécessite de faire appel à des techniques de scellement qui ont généralement besoin de températures plus élevées qu'avec un procédé film mince ce qui limite parfois leur application aux MEMS-RF. Néanmoins, les matériaux utilisés pour cette technique de collage (glass frit, scellement anodique, direct et eutectique) sont de manière générale très hermétiques et sont largement utilisés dans la technologie MEMS-RF.

1.5.1 Package par film mince (WLPTF)

L'encapsulation par des films mince est un sujet de recherche qui a fait l'objet de nombreuses publications dans le domaine des MEMS-RF ([17]–[22]). En effet, ces packages sont compacts, sur mesure, et peu coûteux puisqu'ils sont un prolongement du procédé de fabrication du composant. Il en existe plusieurs sortes, en fonction du matériau de la couche mince déposée. Les différentes étapes de procédé de fabrication de cette encapsulation sont présentées sur la figure 1-3. Tout d'abord, la fabrication d'un composant MEMS-RF est réalisée par un empilement de couches minces (Métal-couche sacrificielle-Métal). Ensuite, un capot métallique (Au, Ni, Al,...), diélectrique (SiN, SiO₂, Alumine,...) ou polymère (BCB) est réalisé de manière à préformer l'encapsulation. Des ouvertures sont laissées apparentes pour permettre la gravure des couches sacrificielles du MEMS-RF. Après libération de la poutre MEMS, les ouvertures

sont refermées par un dépôt de couche mince additionnel permettant ainsi une encapsulation hermétique. Le design et le choix des matériaux constituant le capot et le scellement sont donc des considérations importantes qui ont fait l'objet de nombreuses publications.

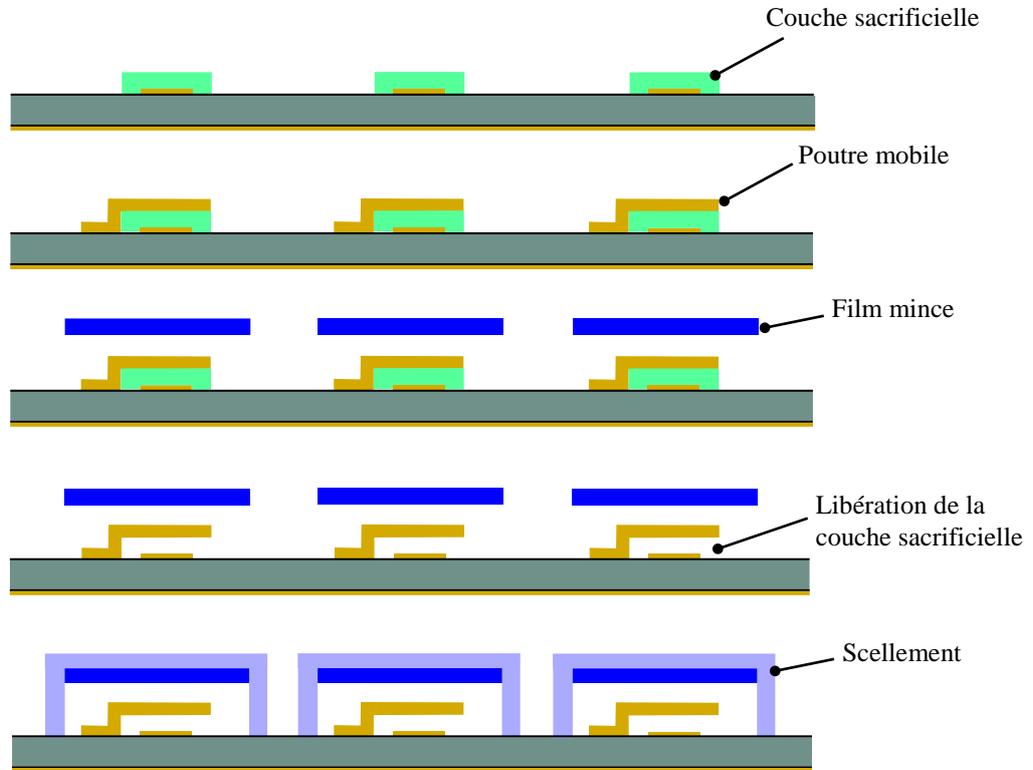


Figure 1-3 : Principe de l'encapsulation par dépôt de film mince.

1.5.1.1 Réalisation du capot

1.5.1.1.1 Capot avec ouvertures latérales

Ce type de capot est réalisé par dépôt de couches minces directement sur le dessus de la couche sacrificielle supplémentaire qui protège le composant MEMS-RF (fig.1-4). Des ouvertures de libération sur les côtés du capot sont nécessaires pour libérer les couches sacrificielles du MEMS-RF et de son capot. Cette technique de réalisation a fait l'objet de beaucoup travaux publiés [19], [20], [21], [23].

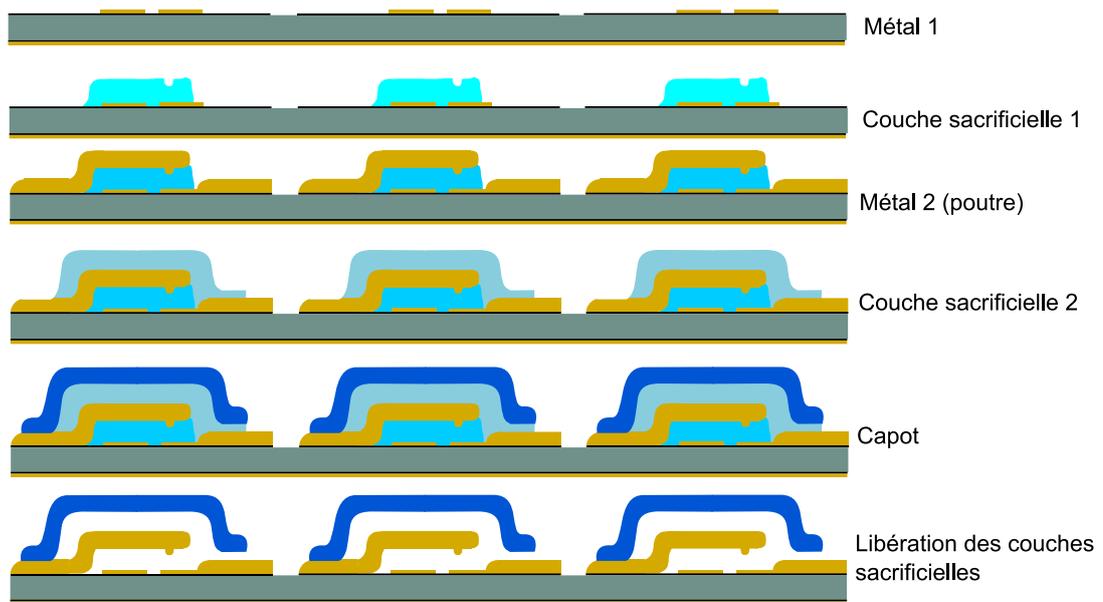


Figure 1-4 : Principe de l'encapsulation par dépôt de film mince.

1.5.1.1.2 Capot à ouvertures micrométriques

Le principe de ce capot est d'utiliser des matériaux poreux ou de créer des nano trous sur la structure pour permettre une libération des couches sacrificielles du MEMS-RF avant scellement [24], [25], [26] (Fig.1-5). Cette technique présente l'avantage de permettre une gravure moins nette des couches sacrificielles du composant.

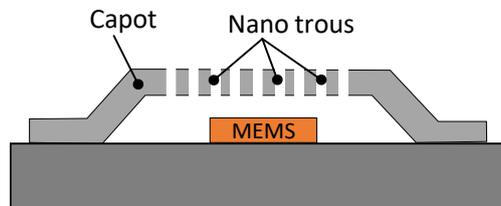


Figure 1-5 : Exemple d'un capot avec nano trous sur le dessus.

1.5.1.1.3 Techniques de collage de capots en films minces

Cette technique consiste à reporter des capots en films minces sur un substrat contenant les MEMS-RF à encapsuler et ensuite sceller ces capots (Cf. figure 1-6). Ils sont préformés sur un substrat différent du substrat accueillant les MEMS-RF. Pour cela, des cavités sont réalisées dans le silicium puis une couche sacrificielle est déposée (1). Un film mince hermétique est ensuite déposé au-dessus de la couche sacrificielle au niveau des cavités pour préformer le capot qui recouvrira le MEMS-RF (2). Le substrat est ensuite aligné puis reporté sur le substrat

contenant les MEMS-RF libérés (3). La couche sacrificielle est ensuite gravée pour libérer les capots de leur moule et créer une encapsulation film mince par-dessus du MEMS-RF (4). La couche sacrificielle peut être en céramique (par exemple silice) éliminée par l'acide fluorhydrique (condition : boîtier en polymère). Il peut être utilisé une résine photosensible et des membranes en Parylène libérées par une gravure chimique à l'isopropanol et l'acétone [27].

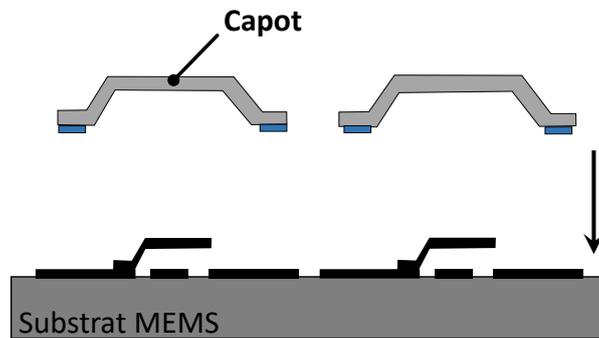


Figure 1-6 : Principe d'encapsulation par collage d'un film mince.

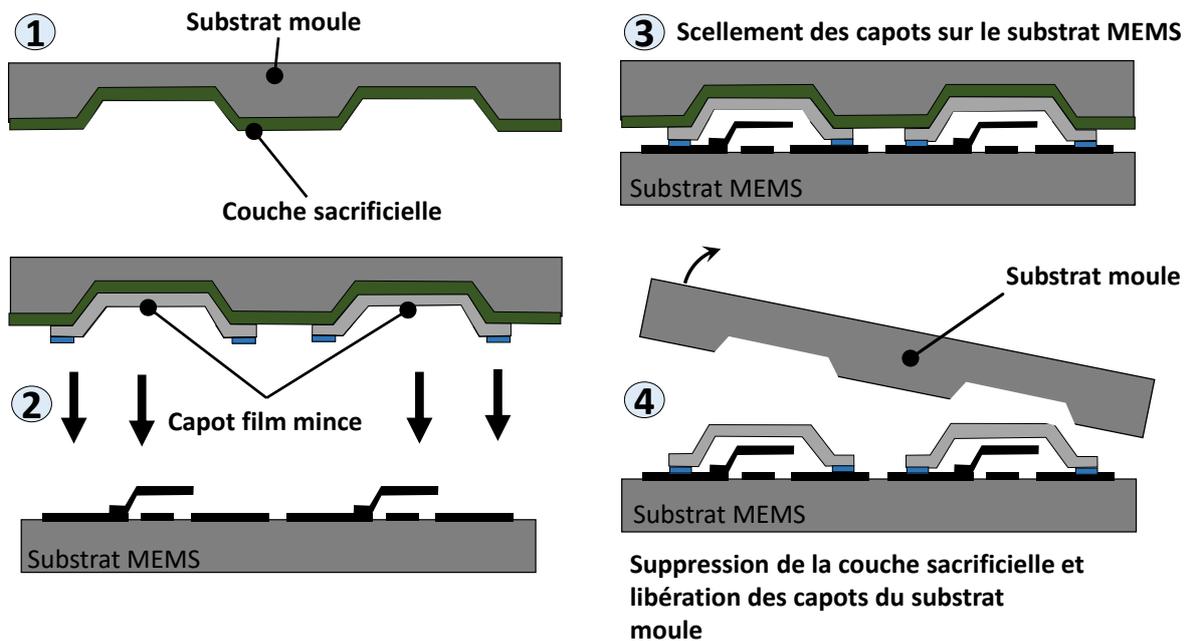


Figure 1-7 : Principe du conditionnement par collage de films en utilisant une couche sacrificielle et un substrat moule.

1.5.1.2 Types de scellement

1.5.1.2.1 Métal évaporé / pulvérisé

Ce type de scellement peut s'adapter aux trois types de capots présentés précédemment (Fig.1-8). L'avantage majeur de ce scellement est qu'il permet de garantir une bonne herméticité. De plus, les dépôts peuvent être effectués à basse température ($<100^{\circ}\text{C}$). Néanmoins, elle peut engendrer des perturbations électromagnétiques et dégrader les performances RF du composant si elle n'est pas correctement conçue.

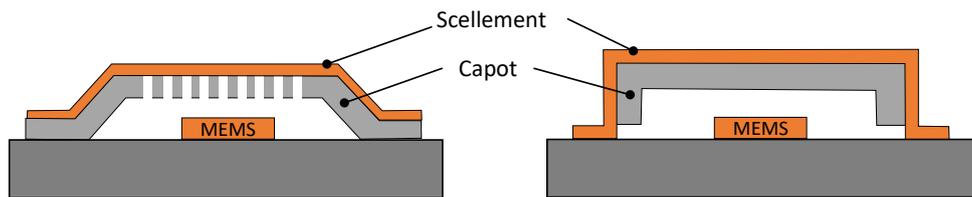


Figure 1-8 : Scellement par un métal évaporé / pulvérisé.

1.5.1.2.2 Par fusion d'un métal

Dans cette technique, un métal (en général constitué d'un alliage eutectique) est déposé sur les ouvertures et crée un bouchon métallique (en anglais solder plug) [21], [28] (Fig.1-9). Un système de chauffage est nécessaire pour faire fondre ce métal et garantir une herméticité suffisante une fois la température abaissée.

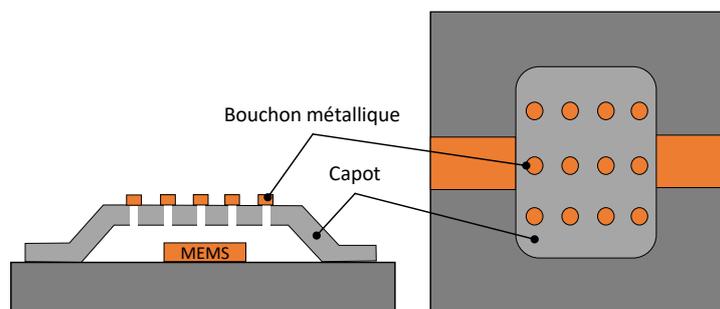


Figure 1-9 : Vue en coupe et de dessus d'un scellement par un bouchon métallique.

1.5.1.2.3 Par diélectrique pulvérisé

Le scellement par un diélectrique d'une encapsulation film mince est très utilisé dans la littérature des MEMS-RF [19], [20], [25] (Fig.1-10). Les diélectriques utilisés pour ce scellement sont généralement en SiN ou SiO₂ déposés par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ou en Français : Dépôt en phase vapeur assistée par plasma). Au même titre

qu'un métal, ils garantissent une bonne herméticité pour des épaisseurs élevées ($>10 \mu\text{m}$). De plus, ils présentent l'avantage de ne pas dégrader les performances RF du composant. Par contre, si le dépôt du diélectrique pénètre dans la cavité du MEMS, cette pénétration risque de dégrader le fonctionnement du MEMS.

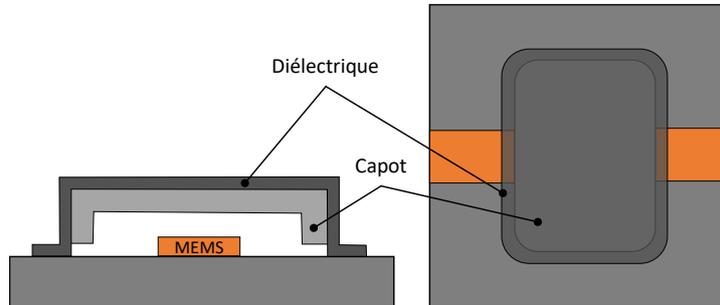


Figure 1-10 : Vue en coupe et de dessus d'un scellement par un film diélectrique.

1.5.1.2.4 Par un étalement d'un polymère

Basé sur le même principe du scellement diélectrique, les polymères sont encore utilisés pour le packaging des MEMS-RF [29]. Par contre, ce type de scellement ne garantit pas une bonne herméticité et le polymère peut fluer dans la cavité.

1.5.1.3 État de l'art des packages à film mince

En 2004, Stark et al. a développé un package en film mince métallique en Nickel. Cette couche métallique est fabriquée à une température inférieure à 250°C avec une épaisseur de $40 \mu\text{m}$ de Ni électrolysé et une couche sacrificielle de $8 \mu\text{m}$ [21]. Il a étudié trois techniques pour sceller son package.

La première méthode est basée sur une soudure localisée au niveau de trou de libération en utilisant un laser de forte puissance orienté sur la traversée entre le capot et les accès RF, le scellement se fait par chauffage grâce à ce laser pour créer un bouchon qui ferme le trou (figure 1-11-b). La deuxième méthode est basée sur un dépôt d'un film mince en or au-dessus du package pour fermer les trous de libérations (figure 1-11-c). Enfin, une troisième technique est développée, basée sur une soudure d'une bille en Sn/Pb sur le package qui le couvre totalement (figure 1-11-d). Basé sur ces études, il a conclu que la soudure des billes en Sn/Pb offre la meilleure méthode pour sceller les grandes traversées (gap des trous), avec une pression de 1,5 torr mesurée après le scellement. En termes d'herméticité, deux tests sur la résistance de composant sont faits : le composant encapsulé hermétiquement (sans aucune fuite) est placé dans une chambre contrôlée par une pression interne, n'a pas présenté un changement de sa

résistance, tandis qu'un composant avec une fuite importante a engendré des changements de performances.

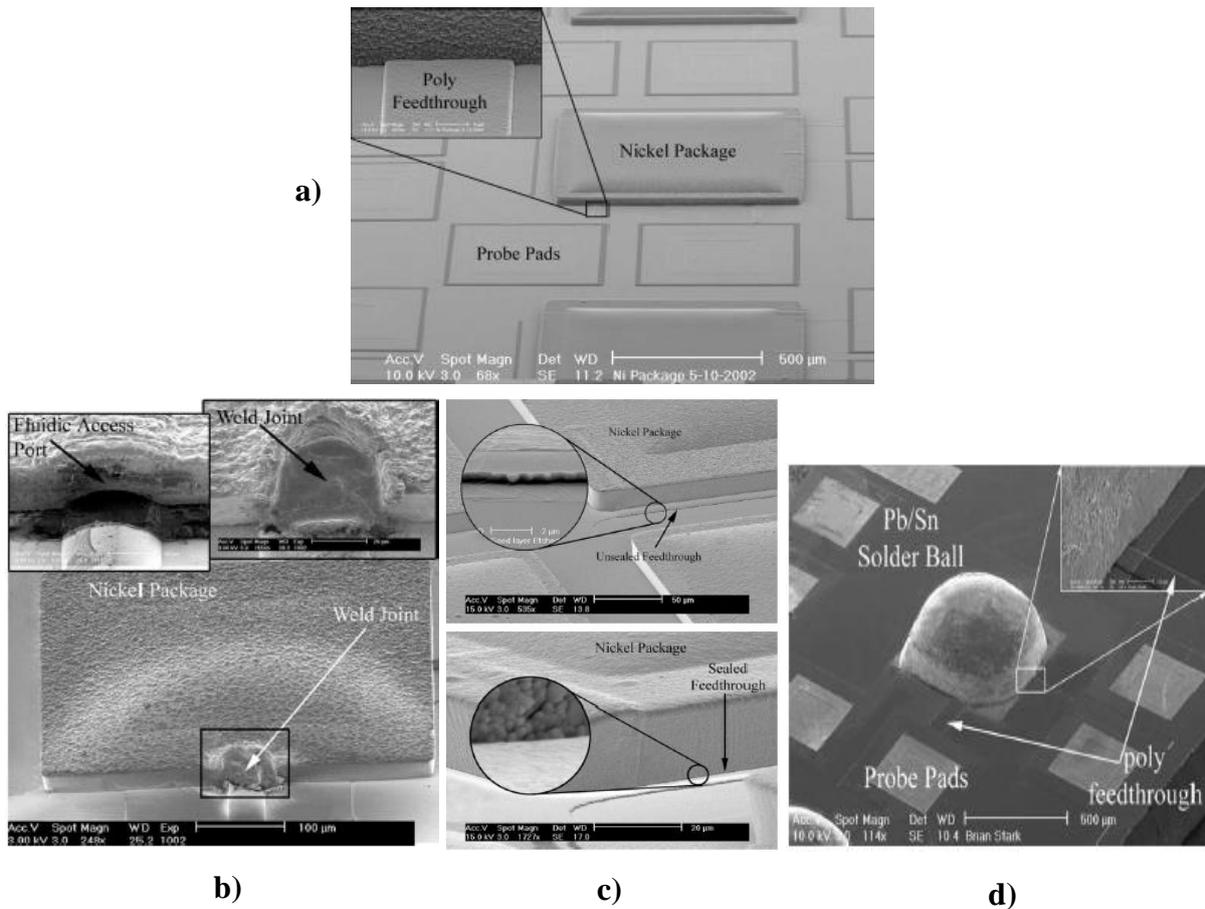


Figure 1-11 : Photo MEB a) de package en Ni, b) scellement par une soudure localisée au niveau de trous de libération, c) scellement par un dépôt d'un film mince en Or et d) scellement par une bille métallique [21].

En 2005, le *CEA Leti* a utilisé cette technique pour encapsuler un MEMS-RF ohmique par un film mince de dioxyde de silicium (SiO_2) à une température inférieure à 450°C présenté en figure 1-12. Cette couche de SiO_2 est déposée par PECVD pour créer le capot avant de le sceller. Notons que s'il engendre une augmentation significative de la durée de vie des MEMS-RF, ce type de package ne garantit pas une encapsulation totalement hermétique [20] du fait du matériau utilisé.

En 2006, *MEMtronics* a présenté une technique similaire [18], [30], [31] (Fig.1-13). Leur procédé de fabrication a été développé de cette manière :

- un procédé classique pour former le MEMS (métal / couche sacrificielle / métal).
- une autre couche sacrificielle est déposée sur la poutre mobile.
- un film mince diélectrique est déposé pour former le capot qui protège le MEMS.

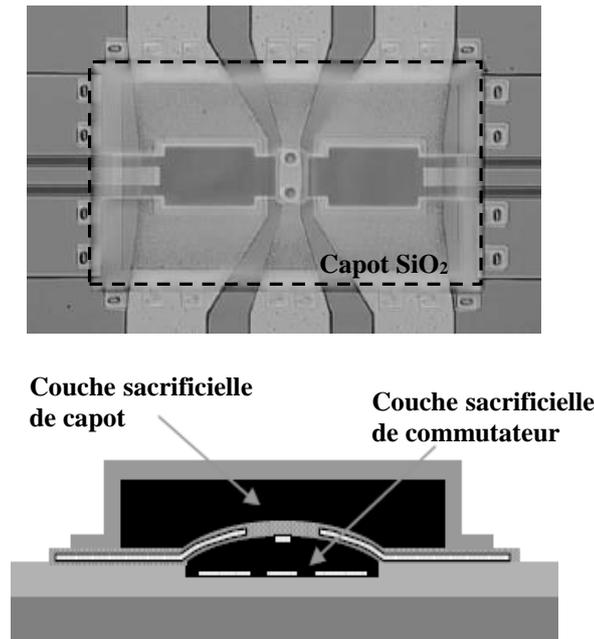


Figure 1-12 : Commutateur MEMS-RF encapsulé par un film mince de dioxyde de silicium réalisé par CEA-LETI [20].

Une fois le capot formé, une libération de deux couches sacrificielles (Couche sacrificielle-MEMS + couche sacrificielle-capot) est réalisée. Pour refermer les trous de libération et garantir une bonne herméticité, une couche de BCB (Benzo-Cyclo-Butène) et un scellement en nitrure de silicium (SiN) à 250°C ont été déposés sur le dessus du capot.

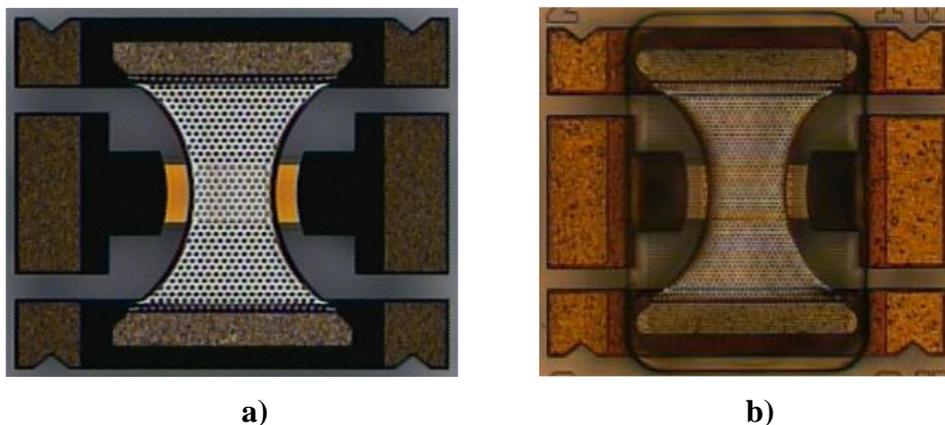


Figure 1-13 : Vue de dessus de commutateur capacitif de MEMtronics a) non encapsulé, b) encapsulé [18].

Cette encapsulation ne présente pas de parasites sur les performances RF du MEMS et reste très peu couteuse puisqu'elle est intégrée dans le procédé de fabrication de commutateur. Néanmoins, le dépôt de BCB peut potentiellement engendrer des dégazages de solvant dans l'encapsulation qui viendraient détériorer le fonctionnement électromécanique. De plus, l'herméticité long terme reste n'a pas été démontrée. Les tests de fiabilité ont montré plus de 10 Milliards d'activation avec ce type d'encapsulation.

En 2010, *RFMD* a développé un commutateur ohmique type cantilever encapsulé par un film mince diélectrique en SiN déposé par PECVD basé sur un procédé de fabrication CMOS pour les applications sans fil (Front End Wireless applications) [32] (Fig.1-14). Ce commutateur encapsulé a montré une fiabilité de 100 millions de cycles, un temps de commutation de 5 μ s, de faibles pertes d'insertion (0,1 dB à 2 GHz) grâce à une très faible résistance de contact $<1\Omega$ pour une tension d'activation de 90 V [33].

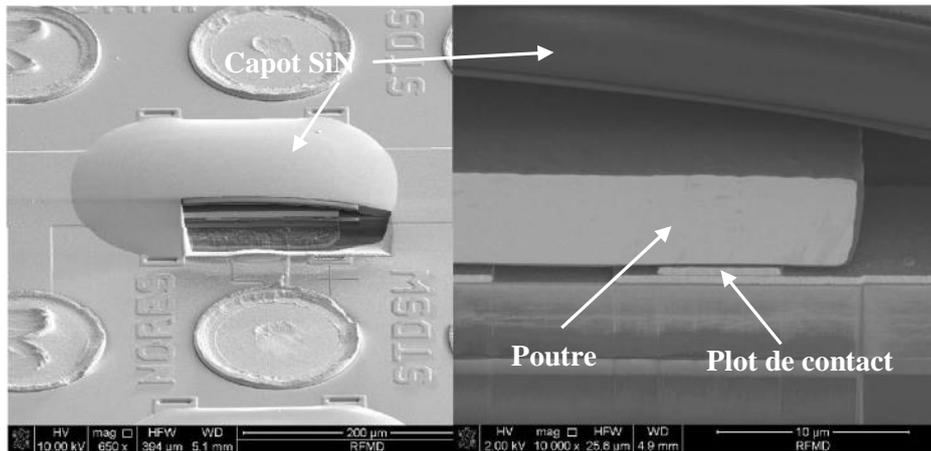


Figure 1-14 : Photo MEB de commutateur encapsulé de RFMD [33].

Également, la société *Cavendish Kinetics* a développé un MEMS-RF capacitif qui est complètement encapsulé par un film mince en SiN lors d'un procédé de fabrication CMOS [34] (Fig.1-15). L'intérêt de ce concept est de réduire l'influence de contraintes internes dans les couches minces. Ce commutateur se repose sur une conception de cavités très petites qui sont moins susceptibles de se déformer sous l'effet de contraintes internes ou de la pression atmosphérique. En plus, l'intégration d'un composant MEMS dans un procédé de fabrication a pour avantage de servir la partie active pour générer la tension d'actionnement de MEMS. Ce procédé de fabrication reste faible coût.

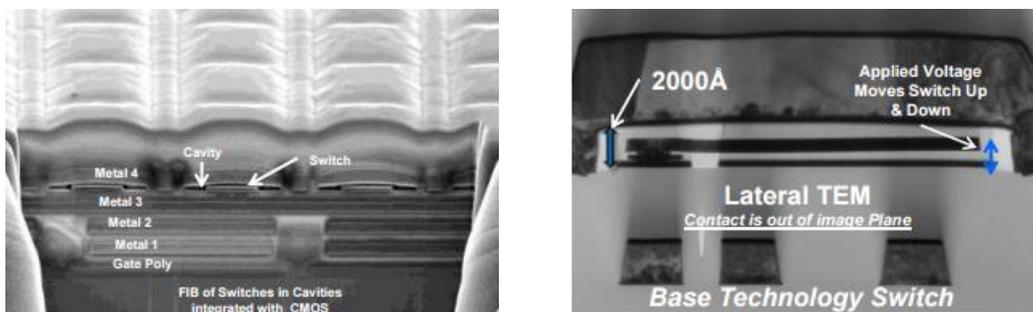


Figure 1-15 : MEMS-RF capacitifs de Cavendish Kinetics, à gauche : vue en coupe des niveaux de procédé CMOS intégrant les MEMS-RF encapsulés, à droite : Zoom sur un MEMS-RF dans sa cavité [34].

La figure 1-15 montre l'interconnexion de composant MEMS-RF et les autres niveaux du procédé CMOS et la cavité qui protège les MEMS-RF. Cette encapsulation est hermétique et ces composants ont montré une très bonne fiabilité.

En 2010, *XLIM* a conçu et réalisé une encapsulation film mince métallique en Or. Le principe de cette encapsulation (figure 1-16) est de déposer une couche en Or au-dessus du composant MEMS, cette couche est électrolysée pour atteindre une épaisseur de 4 μm , ensuite une couche en SiO_2 de 2 μm est déposée sur ce capot pour le sceller. Ils ont démontré que l'influence du capot présente de faibles parasites sur la réponse RF du composant [19].

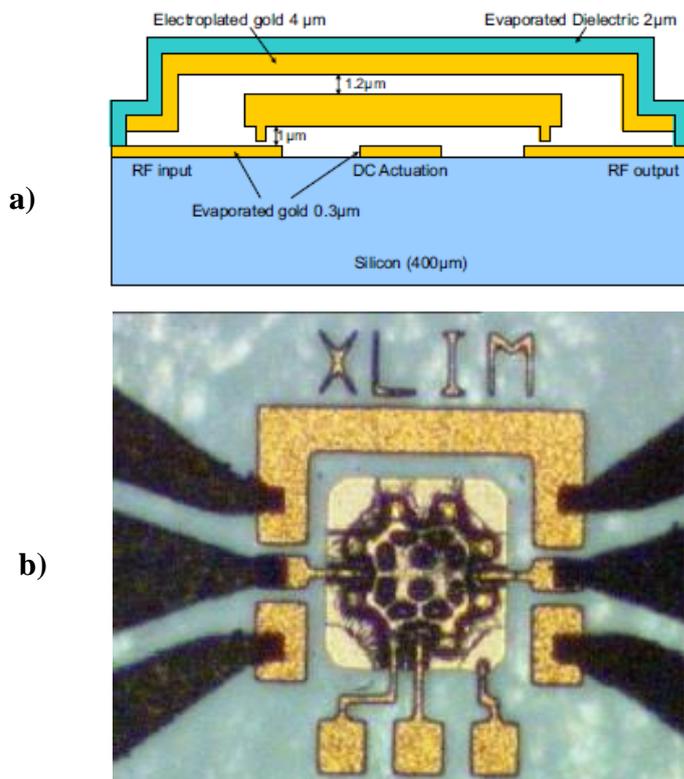


Figure 1-16 : a) Principe de l'encapsulation métallique développée par XLIM, b) Micro-photo du MEMS packagé [19].

En 2011, *NXP* a développé un commutateur MEMS-RF utilisant l'encapsulation d'un film mince en SiN (figure 1-17). Un procédé basse température est utilisé pour fabriquer à la fois le commutateur MEMS-RF ainsi que son package hermétique couche mince permettant d'obtenir un dispositif de très faible encombrement. Ce commutateur a démontré de bonnes performances RF et temps de commutation de 3 μs . Des tests en fiabilité sur le composant ont montré l'intérêt d'un tel package puisqu'il garantit une meilleure durée de vie [22].

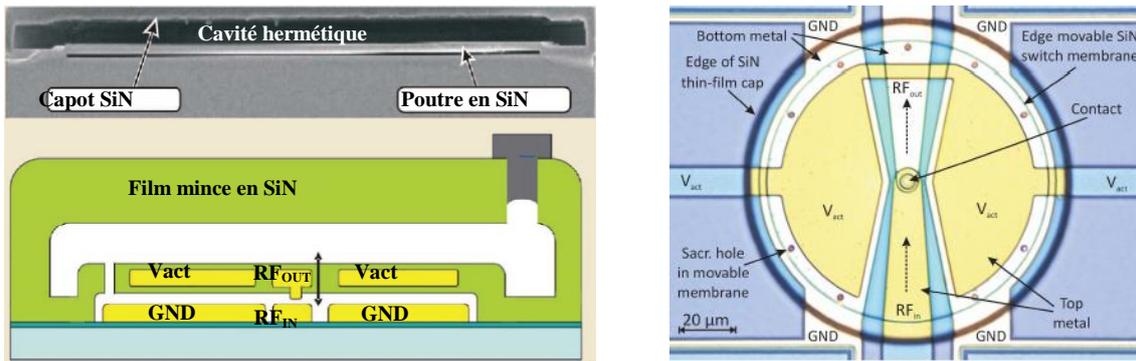


Figure 1-17 : Commutateur ohmique développé par NXP encapsulé par un film mince en SiN [22].

La même année, l'IMEC a présenté une encapsulation film mince à base d'une couche d'alumine nano-structurée [24]. Un dépôt d'aluminium qui a été anodisé dans une solution acide est nécessaire pour former les capots en alumine nano structurés tout en contrôlant la température, la concentration et la tension appliquée. Dans ce cas, l'aluminium s'oxyde et une tension appliquée est nécessaire pour concentrer l'attaque de l'acide à des endroits stratégiques de la couche. Des trous cylindriques se forment ensuite dans l'aluminium et créent par réaction une couche en alumine poreuse. Après un certain temps, des nano-trous se forment sur toute la surface de package. Ces trous ont pour objectif de faire passer des solutions pour libérer les couches sacrificielles: dans ce cas une couche de SiO₂ sera libérée par un acide fluorhydrique gazeux. La figure 1-18 montre le procédé de fabrication proposé par IMEC pour avoir un package en alumine nano poreuse.

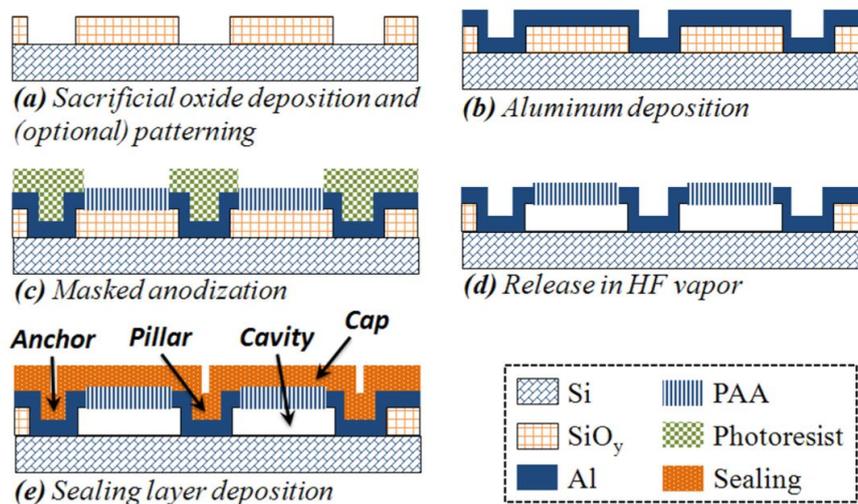


Figure 1-18 : Étapes de procédé de fabrication des packages à base alumine nano poreuse.

Le principe de l'anodisation est présenté par la figure 1-19. Des nano pores de 15 à 20 nm de diamètre sont obtenus grâce à une tension de 20V et un bain d'acide sulfurique à 30°C. Après

la réalisation de capot, un scellement en SiN de $4 \mu\text{m}$ est déposé par PECVD pour réaliser le scellement.

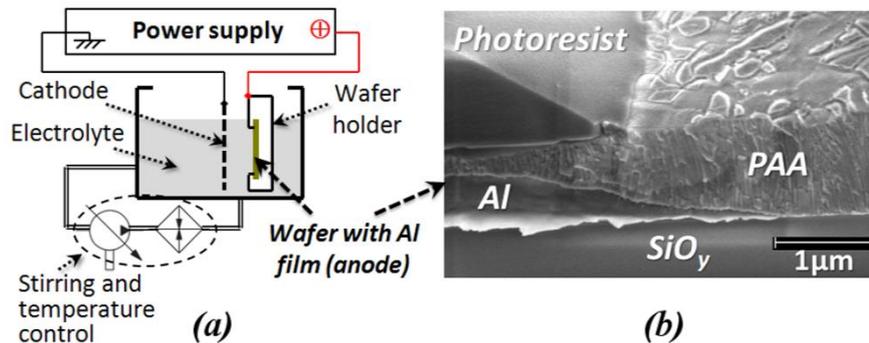


Figure 1-19 : a) Schéma de principe d'anodisation utilisé par IMEC, b) Photo MEB de l'alumine nano structurée avant scellement.

1.5.2 Package par collage de tranche (WLP)

À l'heure actuelle, cette technique de packaging reste la plus répandue. Elle permet d'obtenir un package robuste, hermétique et protège les MEMS-RF lors de la découpe. Cependant, le cout de fabrication est plus élevé que les films minces puisque nous avons besoin deux substrats pour créer cette encapsulation. Durant la fabrication, quelques difficultés peuvent être rencontrées comme l'alignement et le report des deux substrats qui nécessitent parfois l'utilisation d'équipements supplémentaires onéreux.

1.5.2.1 Principe de réalisation

L'encapsulation par collage de tranche dont le principe est présenté en figure 1-20 permet d'encapsuler un substrat contenant les composants MEMS-RF (a), par un autre substrat de capots micros-usinés contenant la couche intermédiaire du scellement (b). Les deux substrats sont ensuite reportées l'une sur l'autre après un alignement (c), enfin on découpe ces deux substrats ensemble pour obtenir les composants encapsulés (d). Le silicium et le verre sont les matériaux les plus couramment utilisés pour former les capots. Le procédé de fabrication de cette encapsulation varie entre chaque type de scellement utilisé qui seront détaillés par la suite.

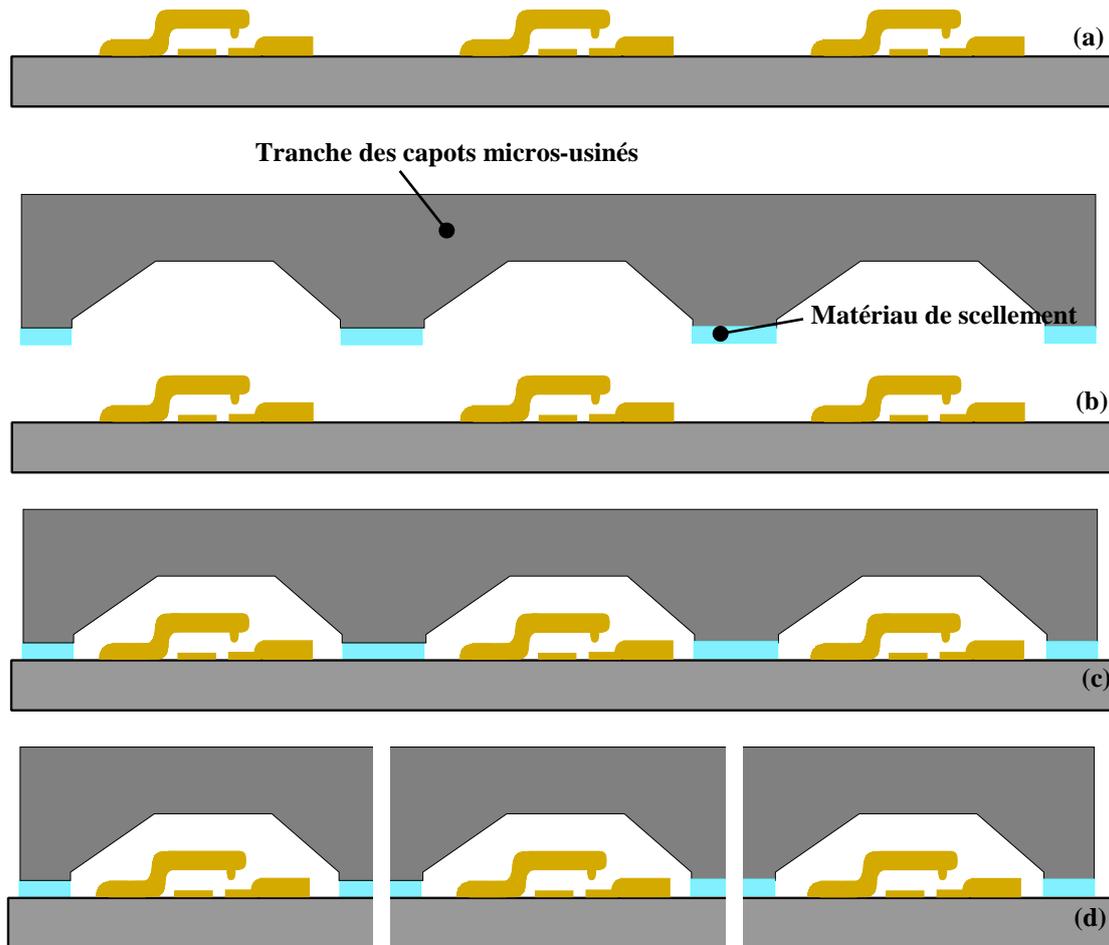


Figure 1-20 : Principe de l'encapsulation par collage de tranche.

1.5.2.2 Les différents types de scellement

Le scellement utilisé dans les techniques d'encapsulation par liaison de deux substrats, soit par la technique puce par puce (en anglais « Chip Scale Package ») ou la technique par collage de tranche (en anglais « Wafer to Wafer packaging ») va déterminer la solidité et l'herméticité du package. Le risque d'avoir de fissures ou de fuites va être localisé au niveau du scellement, donc dans la connexion entre le substrat et le capot du boîtier, la qualité de l'encapsulation va dépendre directement de la qualité du scellement réalisé. Dans ce paragraphe, nous allons présenter les techniques les plus couramment utilisées pour le scellement des micro-boîtiers MEMS.

1.5.2.2.1 Le scellement anodique

Cette liaison peut être réalisée lorsque deux substrats de silicium et de verre sont mis en contact et une haute tension est appliquée aux bornes de ces deux couches pour créer une liaison

chimique stable [35], [36], [37], [38]. Le substrat de verre doit contenir de l'oxyde de sodium (Na_2O). Une fois les surfaces alignées et mises en contact, les deux substrats sont chauffés à une température comprise entre 200 et 500°C qui augmente la mobilité des ions (sodium : Na^+ et oxygène : O^{2-}) dans le verre. Leur direction de migration est alors forcée en appliquant une tension continue variant de 500 - 1000V entre l'anode (silicium) et la cathode (verre).

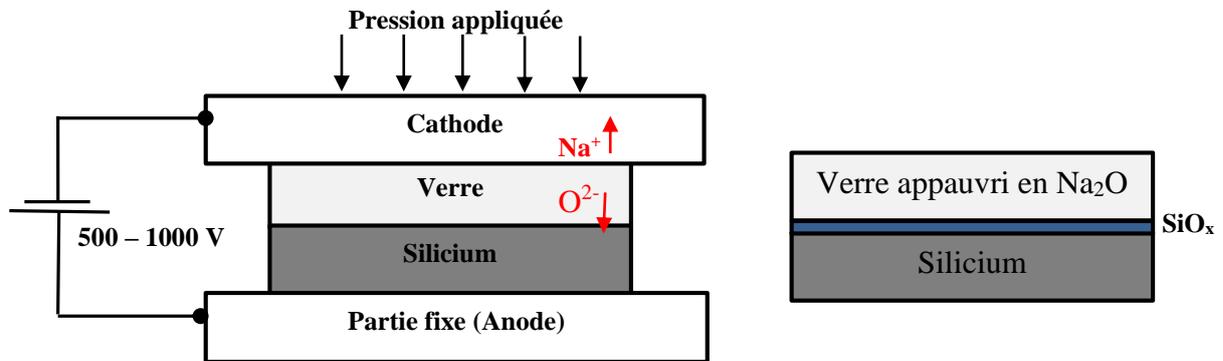


Figure 1-21 : Principe de scellement anodique verre-silicium.

Ainsi, les ions O^{2-} diffusent vers le silicium favorisant des liaisons covalentes entre le silicium et l'oxygène formant une couche de silice à l'interface du contact. Une fois que la liaison est complète, la structure est refroidie jusqu'à la température ambiante. Malgré que ce scellement résulte une bonne herméticité, les surfaces au niveau de contact doivent être très planes et propres pour avoir un bon scellement, ce qui est en pratique difficile pour les MEMS-RF.

1.5.2.2.2 Le scellement direct (Si - Si)

Le scellement direct est le scellement par fusion du silicium. C'est une technique également utilisée pour le scellement des micro-boîtiers silicium-silicium [36].

Cette technique permet d'obtenir un scellement hermétique. Cependant, elle a l'avantage de supprimer l'étape du dépôt de l'anneau de scellement. Une simple pression combinée avec une température très élevée ($> 700^\circ\text{C}$ ce qui n'est pas compatible avec les MEMS-RF) sur les deux substrats de silicium crée une liaison covalente au niveau de l'interface de scellement. Les deux substrats de silicium doivent être préalablement oxydés pour garantir un scellement de bonne qualité. Les surfaces à sceller doivent être parfaitement planes.

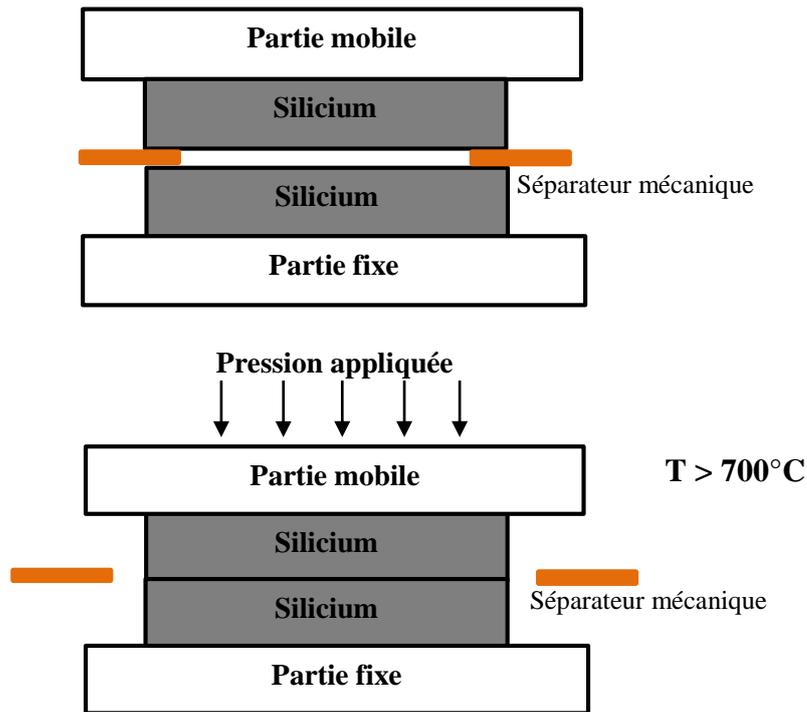


Figure 1-22 : Principe de scellement direct Silicium-Silicium.

Il est donc impossible de faire passer des lignes d'interconnexions au niveau de l'interface entre le substrat et le capot. Des vias devront être intégrés à travers le boîtier pour pouvoir échanger des données avec l'extérieur.

1.5.2.2.3 Le scellement eutectique

Une liaison eutectique est nommée pour sa composition eutectique et sa température eutectique [39], [40], [41]. Prenons par exemple une liaison silicium-or avec une composition eutectique de 3,9 wt-% (poids % Si) qui fond à 363°C (figure 1-23). Elle est formée par un dépôt d'or sur une plaquette avec une source de silicium qui peut être sous forme d'un monocristal à partir de la même plaque, un autre substrat sous la forme de silicium polycristallin est mis en contact avec de l'or en mettant les deux substrats ensemble et l'ensemble est chauffé au-delà du point eutectique.

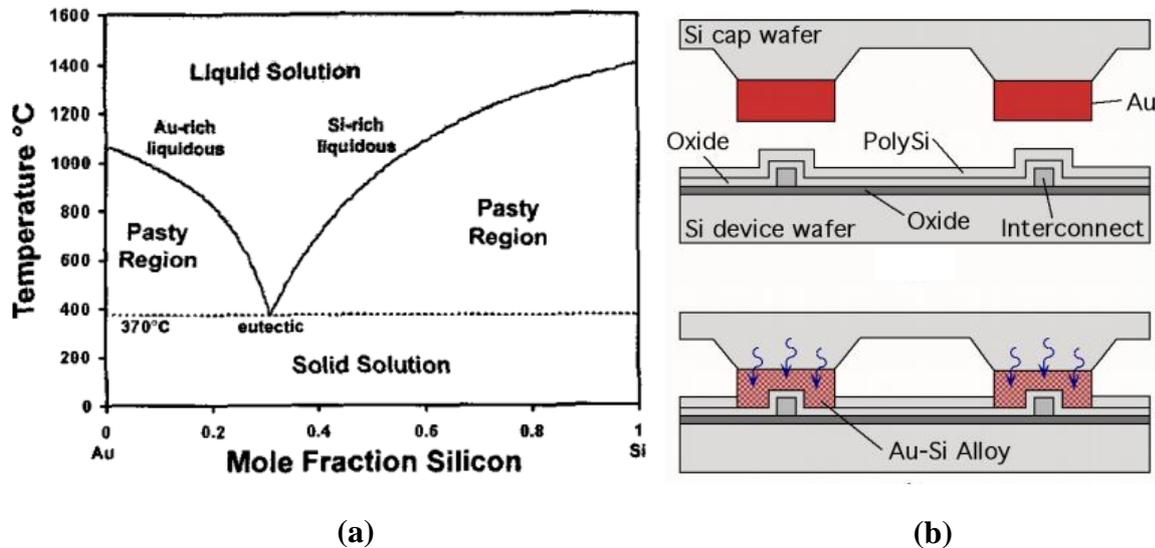


Figure 1-23 : a) Diagramme de phase Au-Si, b) liaison eutectique Au-Si à la température ambiante et à 363 °C [39].

Une fois que le système atteint la température eutectique, le silicium se diffuse dans l'or, et vice versa, pour former le composé eutectique fondu. Ce scellement métallique se fait par une couche métallique intermédiaire entre deux substrats et garantit une bonne herméticité. Les scellements présentés précédemment permettent d'obtenir un package hermétique, mais leurs conditions de réalisation sont dans certains cas difficilement applicables à la technologie MEMS-RF.

1.5.2.2.4 Le scellement par polymère

Une solution intermédiaire existe : le scellement par polymère [42]. Les avantages de cette technique sont la faible température pour créer la connexion et l'absence des effets parasites sur les performances RF parce que la liaison entre le capot et la ligne RF ne présente aucun couplage comparé avec un scellement métallique. Un inconvénient majeur de cette technique est qu'elle ne garantit pas une très bonne herméticité au niveau du scellement.

1.5.2.2.5 Le scellement par glass-frit (Verre fritté)

Le glass frit est un matériau isolant utilisé dans le packaging électronique pour souder deux substrats l'un à l'autre. Il est largement utilisé pour l'encapsulation des accéléromètres MEMS et peut être utilisé pour le packaging des MEMS-RF. Cette technique de scellement a été déjà réalisée par un certain nombre de MEMS-RF commerciaux dont certains ont montré une très bonne fiabilité (Omron, Radant). Il est déposé sur l'un des substrats en utilisant une méthode de sérigraphie (en anglais « screen printing method »), puis il subit plusieurs

traitements thermiques pour éliminer tous les solvants organiques et forment un film continu de verre comme nous montre la figure 1-24.

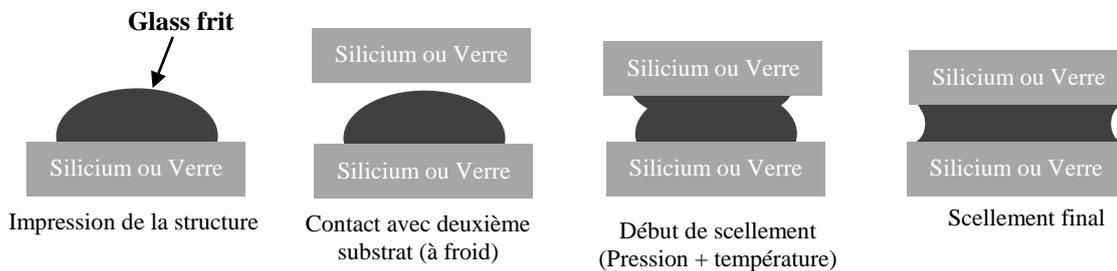


Figure 1-24 : Principe du scellement par glass frit.

Le substrat qui contient le glass frit est ensuite aligné, pressé avec l'autre substrat et les deux sont ensuite chauffés à haute température (entre 350 et 450°C) pour créer la liaison. Il présente beaucoup d'avantages : il peut être appliqué sur des surfaces rugueuses, absence d'une tension appliquée lors du scellement (cas du scellement anodique) et finalement il permet d'avoir une connexion hermétique entre deux substrats. À noter que le composant encapsulé doit être en mesure de tenir la température.

1.5.2.3 Interconnexion des encapsulations par collage de tranche

Plusieurs types d'interconnexion ont été démontrés dans la littérature présentant des encapsulations par collage de tranche des MEMS-RF. Il en existe trois types (Fig.1-25):

- *Par traversée planaire (Fig.1-25-a)*

L'interconnexion par une traversée planaire consiste à reporter le capot directement sur les lignes d'accès RF. Cette technique est appliquée pour les scellements qui sont isolants (diélectriques ou polymères) et ne créant pas de parasites sur les performances du signal RF.

- *Par traversée enterré (Fig.1-25-b)*

Une traversée enterrée dans une couche isolante déposée sur le substrat peut également être utilisée. Cette traversée est généralement appliquée pour les scellements métalliques, la couche isolante permet alors de minimiser les parasites engendrés par ce scellement métallique sur le signal RF.

- Par des vias dans le substrat (Fig.1-25-c) ou dans le capot (Fig.1-25-d)

L'autre possibilité est de créer des vias dans le substrat. Cette technique est très intéressante puisqu'elle permet d'avoir des capots de petite taille, et facilite le montage en surface des composants. Également, en se basant sur le même principe, les vias peuvent être intégrés dans le capot du package mais cette technique nécessite un niveau d'alignement supérieur et une bonne planéité.

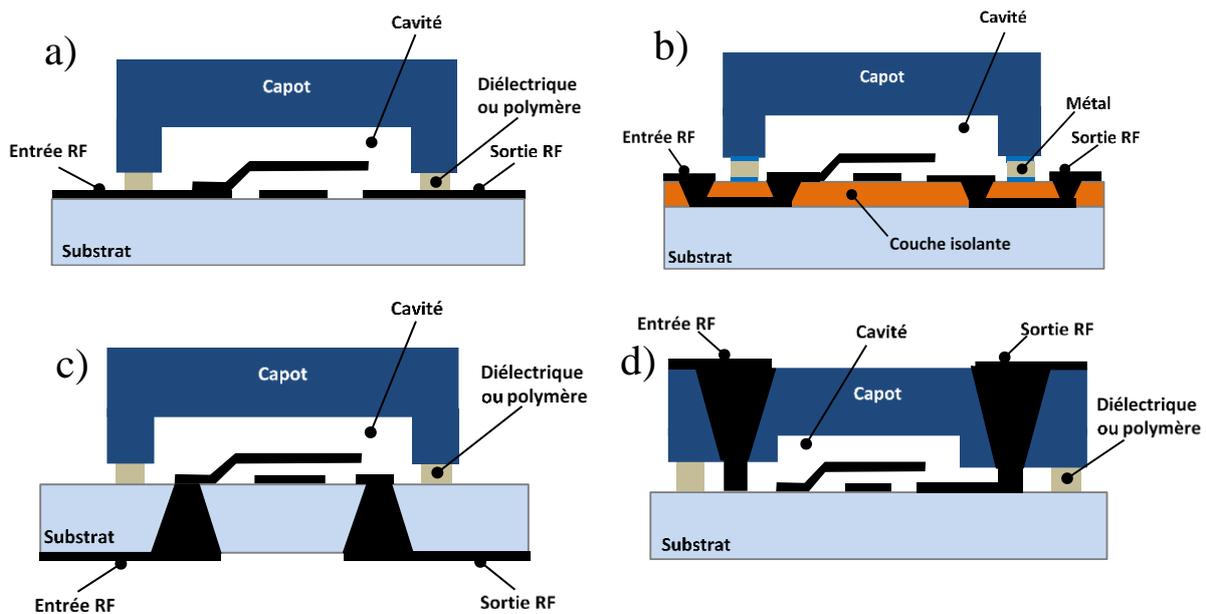


Figure 1-25 : Différents types d'interconnexion pour une liaison par collage de tranche.

1.5.2.4 État de l'art de l'encapsulation par collage de tranche

En 2001, l'IMEC a présenté une encapsulation par collage de tranche en utilisant un capot en verre et un scellement basé sur une soudure eutectique de Sn/Pb [41]. Une couche métallique est déposée sur la plaquette des capots, ensuite reportée sur la plaquette qui contient les MEMS-RF, les deux plaquettes seront ensuite alignées. Les deux plaquettes seront soumises à une température eutectique pour créer la liaison entre ces deux plaquettes. Les matériaux et la technique de scellement utilisés dans ce travail garantissent une très bonne herméticité. En effet, les tests de fine fuite par Hélium et de grosse fuite par hydrocarbure perfluoré sont appliqués sur 17 échantillons (9 composants avec des capots en Silicium et 8 avec des capots en verre) placés dans une chambre à haute pression (24 h dans He à 2,5 Bars). Un taux de fuite

de $0,2 \times 10^{-9}$ mbar.l.s⁻¹ a été détecté par un spectromètre d'hélium qui indique que l'encapsulation est hermétique selon la méthode 1410 de la norme américaine MIL-STD883 [43].

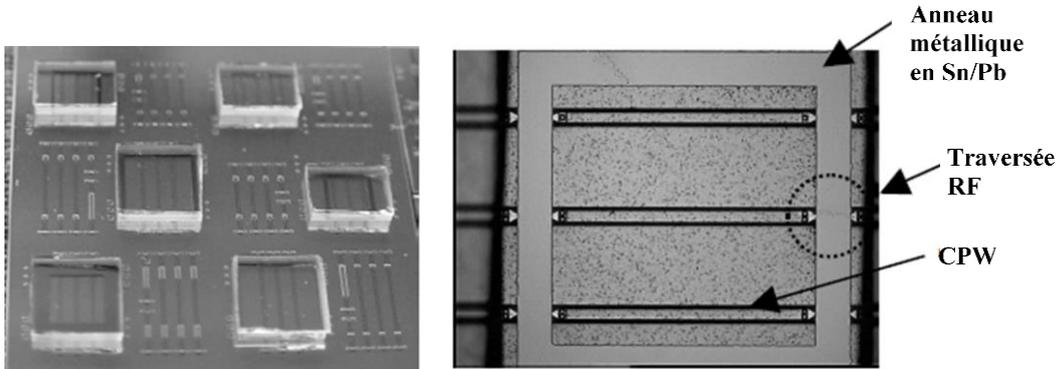


Figure 1-26 : Exemple d'un scellement eutectique entre un capot en verre et une tranche en silicium [41].

Un effort plus poussé sur un commutateur ohmique développé par l'université de Northeastern et Analog devices [44] a fait l'objet de la création de l'entreprise Radant MEMS avec le soutien de DARPA.

En 2003, Radant MEMS a montré le premier commutateur MEMS-RF encapsulé par collage de tranche utilisant le verre fritté comme une couche intermédiaire pour sceller les deux substrats à une température de 350-500°C [45] (Fig.1-27). L'herméticité de ce composant est bonne puisque certains composants ont montré plus de 1000 Milliards de cycles.

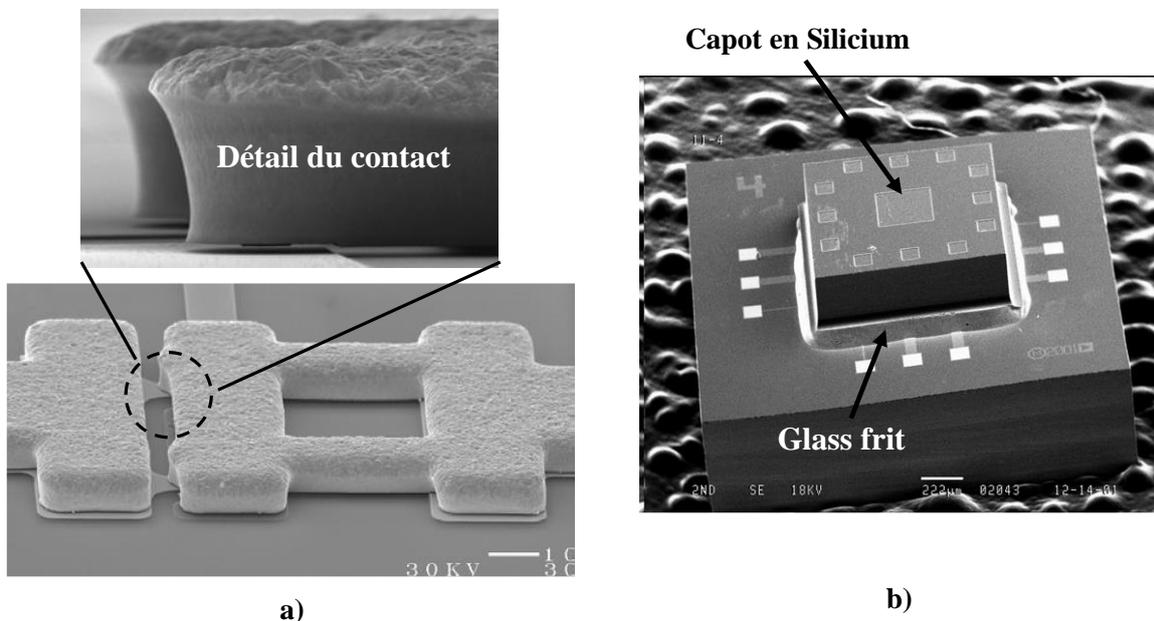


Figure 1-27 : a) Photo MEB de commutateur Radant, b) Photo MEB d'une puce contenant 4 MEMS-RF packagée par un capot en Silicium utilisant un scellement glass Frit [45].

La même année, l'IMEC a développé dans [46] une encapsulation en utilisant un capot de verre et un scellement de BCB (Benzo-Cyclo-Butène) (Fig.1-28). Ils ont montré qu'un scellement par polymère peut garantir une très faible influence sur les performances RF du composant, par contre une bonne herméticité ne sera pas obtenue.

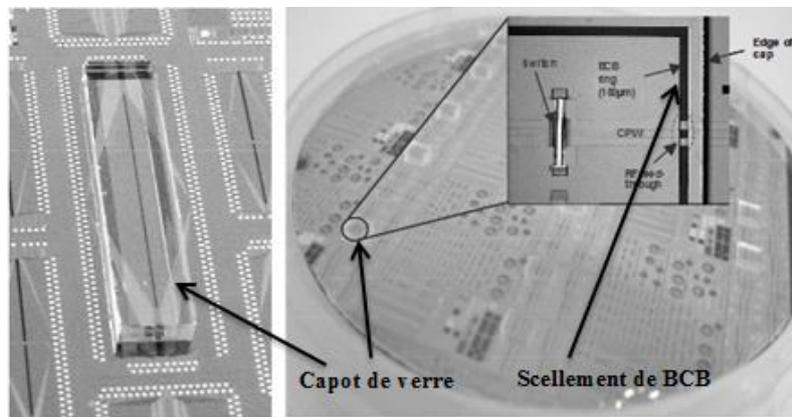


Figure 1-28 : Exemple de commutateur MEMS-RF encapsulé par un scellement BCB entre un capot verre et un substrat silicium [46].

En 2005, le laboratoire *Lincoln-MIT* a développé une encapsulation par collage de tranche en utilisant un scellement métallique [47] (Fig.1-29). Ce scellement est par thermo-compression métallique entre un substrat en SOI de 25 μm et un package en silicium à haute résistivité. Le métal utilisé pour créer la liaison est l'or. Pour éviter les parasites qui peuvent être générés par ce type de scellement, des vias métalliques en tungstène ont été faits dans le substrat qui relient l'entrée et la sortie RF via le composant.

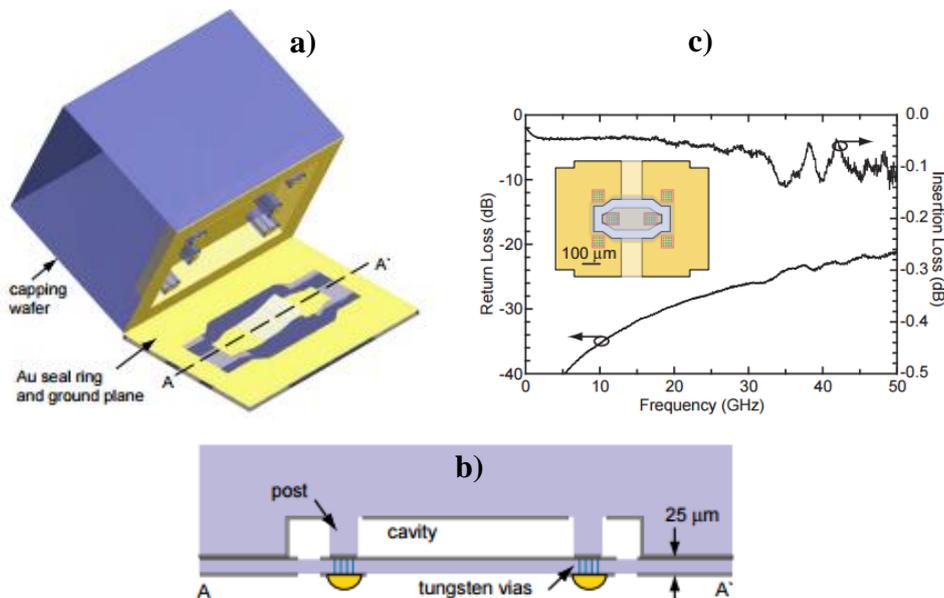


Figure 1-29 : a) Vue en 3D, b) schéma en coupe du package, c) Paramètres S mesurés d'une ligne packagée de 100 μm de longueur [47].

En 2009, La société japonaise *OMRON* a utilisé aussi cette technique pour encapsuler hermétiquement un commutateur MEMS-RF ohmique. La figure 1-30 montre le principe d'encapsulation du commutateur. Un scellement en glass frit à 450°C est utilisé pour sceller le capot en verre.

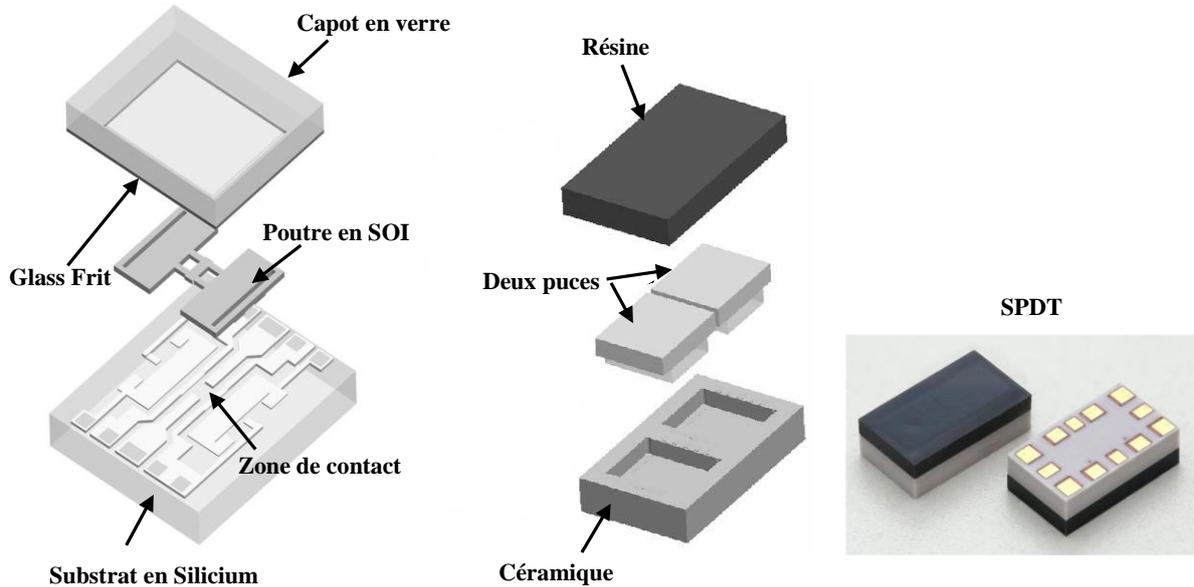


Figure 1-30 : MEMS-RF packagé d'Omron [48].

En 2014, Comart et al. a montré une approche de packaging des MEMS-RF en utilisant un scellement de glass Frit [49]. Il a étudié l'effet de parasites RF d'un capot en silicium faible et haute résistivité (HRSi et LRSi) sur une ligne coplanaire, scellée par glass frit. Il a montré ensuite qu'une température maximale de 450°C et une force de 800 N appliquées, sont nécessaires pour créer la connexion entre les deux substrats. La figure 1-31 montre une photo MEB de la ligne coplanaire encapsulée par un capot en silicium et scellée par glass frit.

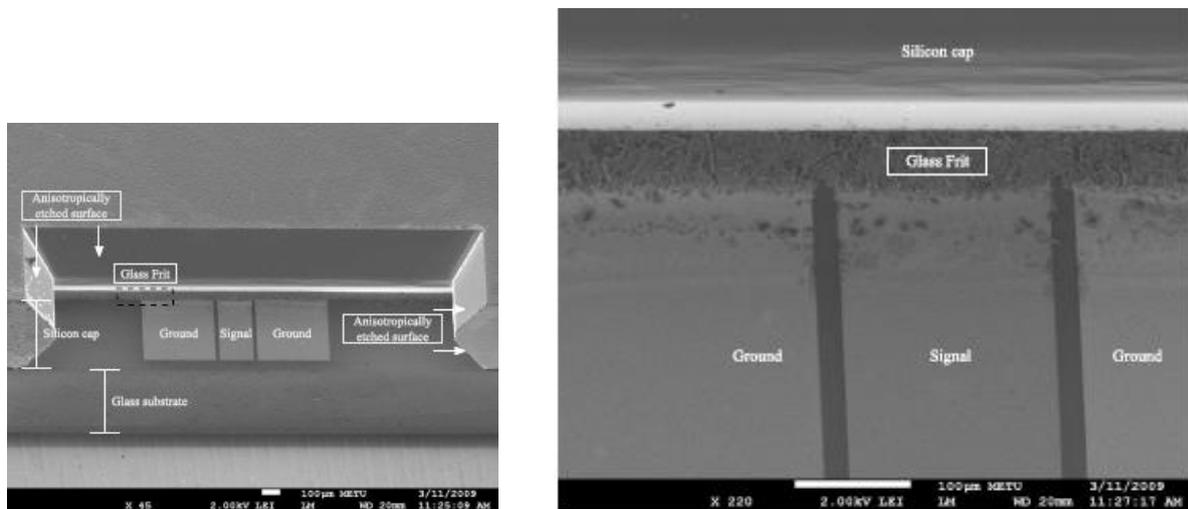


Figure 1-31 : Photo MEB de l'encapsulation par collage de tranche avec un scellement en glass frit [49].

En se basant sur l'état de l'art de ces deux types de packaging (WLTFP et WLP) niveau zéro, le tableau ci-dessous présente une synthèse générale qui résume ces différentes techniques de packaging.

Tableau 1-2 : Tableau de synthèse qui résume les différentes techniques de packaging.

Type de packaging	Capot micro usinés (WLP)				Film mince (WLPTF)	
Matériaux du capot		HRSi		Verre	Diélectrique	Métallique
Type de scellement	Métallique (SnPb)	Polymères (BCB)	Glass Frit	Eutectique (AuSn)	SiN	SiO ₂
Type de la ligne d'accès RF	TSV	planaire	planaire	Enterré (Buried)	Planaire (Or)	Planaire (Or)
Fréquence	@ 40 GHz	@ 40 GHz	@ 20 GHz	@ 40 GHz	@ 8 GHz	@ 10 GHz
ΔS_{21}^* (état haut)	N/C	N/C	Influence faible	N/C	2 dB	3 dB
ΔS_{21}^* (état bas)	5 dB	0,5 dB	Influence faible	0,5 dB	0,02 dB	0,3 dB
S ₂₁ dB (état bas)	-0,6 dB	-0,5 dB	Faible IL	-0,6 dB	-0,06 dB	-1,2 dB
S ₂₁ dB (état haut)	-15 dB	-25 dB	Isolation élevée	-15 dB	-40 dB	-12 dB
Herméticité	+	-	+	+	-	+
Température (scellement)	<350°C	<350°C	<400°C	<300°C	≤400°C	<120°C
Fiabilité	+	-	+	+	-	+
Références	[46]	[46]	[45]	[41]	[22]	[19]

*Influence du capot

1.6 Herméticité des packages

L'herméticité d'une encapsulation est primordiale pour de nombreux dispositifs électroniques et plus particulièrement des MEMS-RF pour assurer un environnement constant à l'intérieur du package qui garantit un bon fonctionnement et une durée de vie prolongée. Pour garantir une bonne herméticité, le package doit (Fig.1-32):

- ✓ Être constitué d'un matériau adéquat. La figure 1-33 montre que la perméabilité d'un matériau est directement liée à sa nature. Il est donc primordial d'utiliser un matériau hermétique (exemple : métal, silicium, cristaux purs) et d'avoir une épaisseur conséquente pour que l'herméticité du package dure dans le temps.
- ✓ Être bien scellé. L'interface entre le capot et le substrat d'accueil doit être parfaitement hermétique et ne doit pas perturber les performances RF du composant.

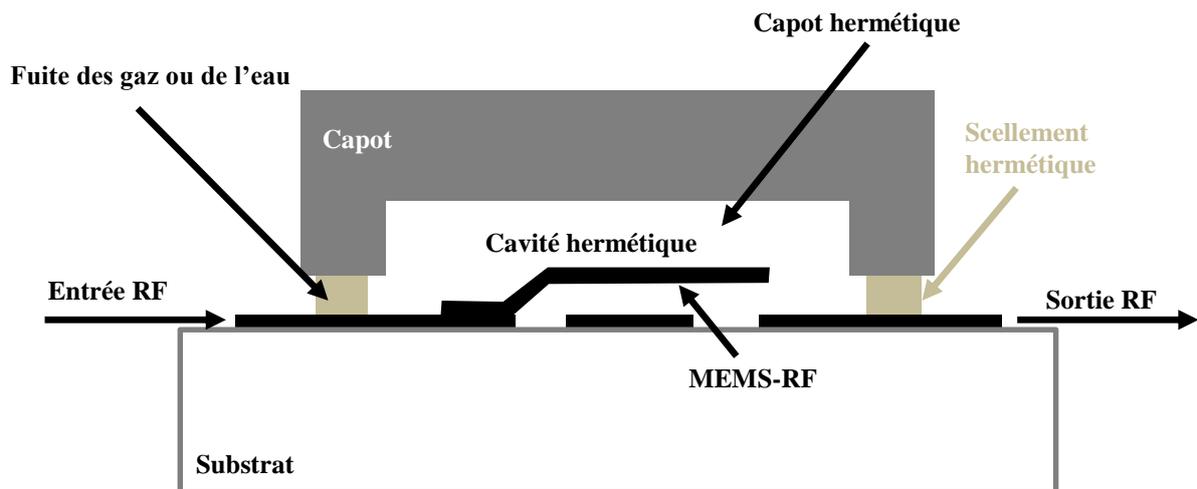


Figure 1-32 : Considérations pour avoir une meilleure herméticité des MEMS-RF.

La mesure d'herméticité des composants électroniques packagés est effectuée par la mesure de la quantité des espèces chimiques selon leurs états (gaz ou liquides) qui peuvent pénétrer à l'intérieur des packages par des canaux de fuite. Généralement, les matériaux utilisés pour encapsuler un MEMS-RF sont le verre et le silicium (matériaux très hermétiques).

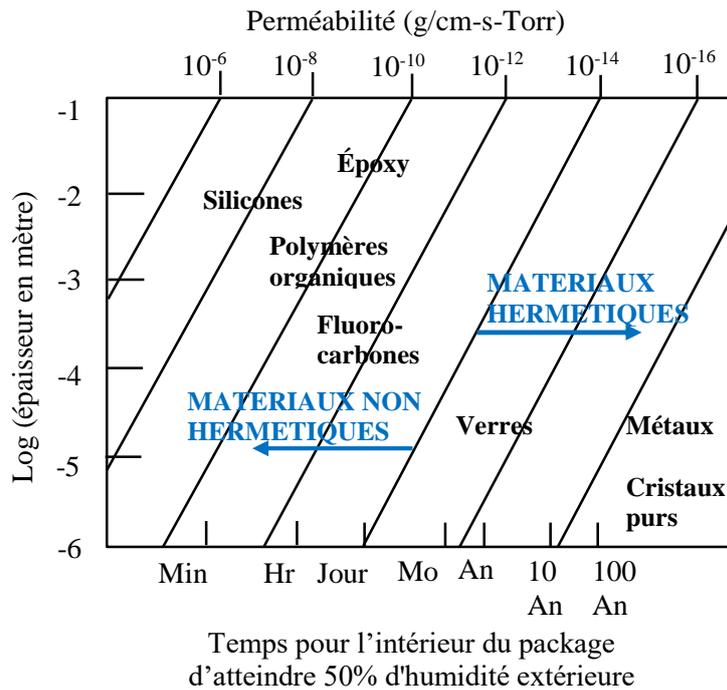


Figure 1-33 : Efficacité et choix des matériaux du point de vue de l'herméticité [50].

La norme américaine (MIL-STD-883) [43] établit des procédures et méthodes de contrôle permettant de tester les dispositifs microélectroniques dans des conditions environnementales appropriées aux applications militaires et spatiales. La méthode de test 1014 de cette norme concerne plus particulièrement l'herméticité d'une encapsulation pour les composants microélectroniques. Dans cette procédure, l'encapsulation subit dans un premier temps un test dit « fines fuites ». Ce type de test assure la détection des taux de fuite très faibles et permet de prédire l'efficacité de l'encapsulation en fonction du temps. Puis, le package est soumis à un second test dit « grosses fuites ». Ce test détecte des fuites plus importantes, non détectables avec le test « fines fuites » (sauf test optique qui peut faire les deux tests). Il existe deux types de tests couramment utilisés pour les MEMS-RF.

Des tests de fuite conventionnelles, ces sont les tests d'herméticité présentés par la méthode 1014 de la norme MIL-STD-883 qui sont présentés dans le tableau 1-3 et les tests de fuites non conventionnelles mais applicables aux composants MEMS-RF et qui ont fait l'objet de plusieurs travaux publiés dans la littérature. Ces tests sont présentés dans le tableau 1-4.

Tableau 1-3 : Tests d'herméticité de la méthode 1014 (MIL-STD-883).

Méthode de mesure	Taux de fuite minimal	Types de fuite	Avantages	Inconvénients
Test de fuite par Hélium (fine fuite) [43], [51], [52]	10^{-12} (atm.cm ³ .s ⁻¹)	Fine fuite	- Normes applicables - Non destructif	- Problèmes de sensibilité pour les packages petites tailles - Pas de mesure de dégazage - Résultat de mesure est estimé pour la pénétration de He dans les packages films minces comme le SiO ₂
Krypton 85 (fine fuite) [53]	10^{-12} (atm.cm ³ .s ⁻¹)	Fine fuite	- Normes applicables	- Manipulation de test de gaz radioactif
Test optique (fine/grosse fuite) [54], [55], [56]	10^{-9} - 10^{-8} (atm.cm ³ .s ⁻¹) Dépend de la géométrie de composant a été démontré	Fine / grosse fuite	- Non destructif - Disponible pour les packages film mince - Adaptable aux fines et grosses fuites	- Une membrane mince est nécessaire - La sensibilité affectée par la géométrie du capot
Test par hydrocarbure perfluoré (grosse fuite) [43], [57]	0.167 µL d'hydrocarbure	grosse fuite	- Principe de test très simple - Temps de test (30 mn) très court - Normes applicables - Non destructif	- Pas capable de tester les fines fuites - Non applicable sur les MEMS 10^{-3} cm ³
Test de colorant (grosse fuite) [43]	Si des traces de colorants sont trouvées : scellement défectueux	grosse fuite	- Informations précieuses sur les chemins de fuite à travers le scellement des boîtiers	- Destructif

Tableau 1-4 : Autres tests d'herméticité applicables aux composants MEMS-RF.

Méthode de mesure	Taux de fuite minimal	Types de fuite	Avantages	Inconvénients
Facteur Q [58], [20]	$\sim 10^{-15}$ (mbar.l.s ⁻¹) Dépend de la géométrie de composant	Fine fuite	- Non destructif - Applicable sur tous les composants MEMS - Aucune dépendance de volume	- N'est pas standard - Calibration est nécessaire pour chaque type de composant
Capteur in situ [59]	$\sim 10^{-15}$ (atm.cm ³ .s ⁻¹) Dépend de la structure	Fine fuite	- Intégration facile du capteur dans le capot - Contrôler de la pression interne - Une bonne résolution de détection	- Trouver ou concevoir des capteurs miniatures pour des capots de petits volumes - Interconnexion supplémentaires (capteur), risque d'augmenter le nombre de fissures de fuite
Résonance de la membrane	10^{-9} (mbar.l.s ⁻¹) Dépend de la géométrie de chaque composant a été démontré	Fine fuite	- Non destructif - Disponible pour les packages film mince	- Une membrane mince est nécessaire - Actionnement de la membrane devrait être possible

Les tests de mesure qui sont le plus couramment utilisés pour les composants MEMS-RF sont les tests de fuite par Hélium et par Krypton 85 radioactif (Kr^{85}).

1.6.1 Test de fuite par Hélium

Le test de fuite d'hélium est le premier test de fuite (connu aussi par test A) énoncé dans la méthode 1014 de la norme MIL-STD-883J. Tout d'abord, il faut insérer le composant encapsulé dans une chambre hermétique. La chambre doit être mise sous vide puis remplie d'hélium à haute pression pour forcer l'hélium à traverser les fissures du scellement vers l'intérieur de la cavité fermée. La concentration d'hélium nécessaire varie selon chaque dispositif et peut être obtenue par réglage de la pression et du temps d'exposition.

Ensuite, la chambre est remise sous vide et le gaz traceur qui a déjà été piégé dans l'encapsulation (hélium dans ce cas) est mesuré par un détecteur. Le principe de test de d'hélium est présenté par la figure 1-34. Néanmoins ce test peut s'avérer limité lorsque les encapsulations sont très petites (comme le WLPTF par exemple). Dans ce cas, une détection au Kr peut être réalisée.

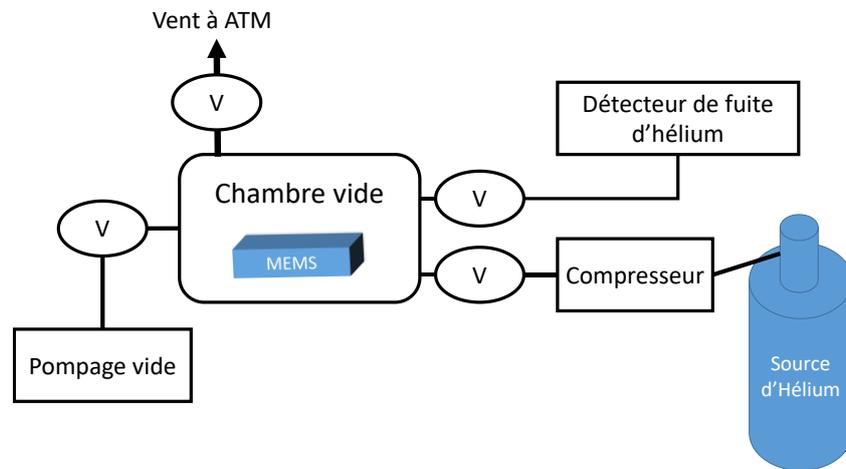


Figure 1-34 : Principe de test de fuite fine par Hélium.

1.6.2 Test de fuite par Krypton 85

Le Kr^{85} est un gaz inerte radioactif qui émet de faibles rayons gamma et des particules bêta. La capacité de détection du gaz est un million de fois supérieure à la détection de l'hélium dans un test de fuite par un spectromètre de masse. La détection de fuite par Kr^{85} est une technique très sensible utilisée pour mesurer taux de fuite fine dans les dispositifs de haute fiabilité [60]. Il a des avantages par rapport aux autres tests d'avoir un temps de test rapide, faible coût, et peut détecter des taux de fuite ($<10^{-12}$ atm-cc / sec).

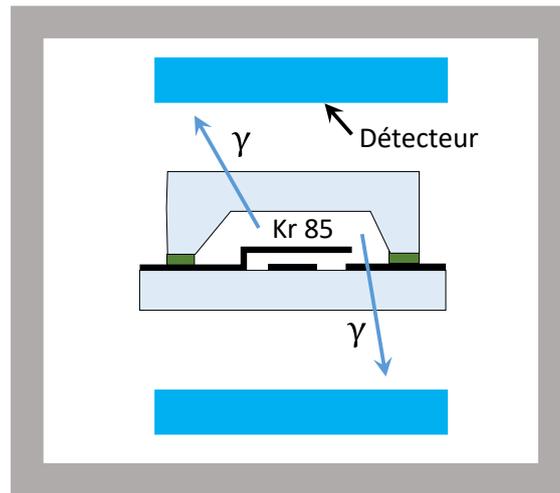


Figure 1-35 : Principe de test de fuite fine par Kr⁸⁵.

1.6.3 Taux de fuite requis par applications

L’herméticité du package et le type de scellement utilisé sont forcément liés à la durée de vie de composant MEMS-RF et à leurs applications. Par exemple, dans les applications militaires et spatiales, la durée de vie d’un composant MEMS devrait dépasser les dix ans contre 2 à 5 ans pour les applications industrielles. Le tableau 1-5 présente un résumé sur les applications des MEMS-RF selon leur durée de vie, leurs taux de fuite et leurs types et matériaux de scellement utilisés [61].

Tableau 1-5 : Applications des MEMS-RF selon leur durée de vie, leurs taux de fuite et leurs types et matériaux de scellement utilisés.

Applications	Température (°C)	Durée de vie (ans)	Taux de fuite demandé (atm.cm ³ .s ⁻¹)	Matériaux de scellement
Spatiale - militaire - aéronautique	-55 à 150	>10	10 ⁻¹³ à 10 ⁻¹⁶	Silicium Verre
Télécoms	-20 à 65	>10	10 ⁻¹³ à 10 ⁻¹⁶	Silicium Verre
Automobile	-40 à 125	5 - 10	10 ⁻¹⁰ à 10 ⁻¹⁶	Silicium Verre
Industriels	-20 à 65	2 - 5	10 ⁻¹⁰ à 10 ⁻¹⁶	Silicium Verre
Bio techno	-	Dépend de quelle application (1 à 10)	10 ⁻⁶ à 10 ⁻¹⁶	Verre polymères
Autres applications	0 à 50	2	10 ⁻⁶ à 10 ⁻¹⁶	Silicium Verre polymères

1.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre, une introduction générale sur les commutateurs MEMS-RF de type ohmiques et capacitifs. L'intérêt de développer ces commutateurs est basé sur une technologie qui a beaucoup d'avantages en terme des pertes d'insertion, pertes d'isolation, linéarité, consommation et durée de vie qui peuvent être une meilleure solution permettant d'obtenir des dispositifs hyperfréquences plus petits, plus performants et moins chers.

Nous avons aussi montré les différentes techniques de packaging et de scellements utilisés pour la technologie MEMS-RF. Chacune de différentes techniques qui ont été présentées, présente des avantages et des inconvénients en terme d'herméticité, l'influence du package sur les performances radiofréquences du composant et sur le coût de fabrication. Par la suite, nous étudierons deux types de packaging présentant des avantages en termes de performances RF tout en garantissant une bonne herméticité.

Chapitre 2 : Conception d'un commutateur MEMS- RF ohmique robuste

2.1 Introduction

Pour maintenir les avantages des commutateurs MEMS-RF (faibles pertes d'insertion, excellente isolation, bonne linéarité et petite taille) dans le domaine hyperfréquences, il est indispensable d'encapsuler la membrane mécanique pour assurer un bon fonctionnement et une meilleure fiabilité. La partie (1.5) du chapitre 1 a montré les différentes conditions de fabrication d'un package (température, pression, matériaux utilisés, type de scellement, etc...) pouvant s'avérer contraignant pour certains MEMS-RF non robustes. Dans ce chapitre, nous allons mettre en place toutes les démarches nécessaires à la conception d'un commutateur robuste afin de faciliter son encapsulation et garantir un niveau de fiabilité élevé en fonctionnement.

Pour cela, il sera réalisé une optimisation de l'épaisseur de la poutre du commutateur d'AirMems, de la forme des ancrages, de contraintes mécaniques résiduelles, des gradients de contraintes et des stoppeurs, afin d'obtenir une force de contact et force de rappel élevée. Ensuite une étude thermique sera effectuée dans le but de limiter les déformations en présence de températures élevées lors de la fabrication du composant et de son encapsulation. Nous détaillerons par la suite tous les paramètres (force de contact, force de rappel, tension d'activation, temps de commutation, etc...), le procédé de fabrication, les mesures effectuées des performances du commutateur (caractérisation RF, linéarité, temps de commutation, etc...).

2.2 Principe de l'actionnement électrostatique

2.2.1 Théorie

Le principe d'un actionnement électrostatique se fait par une différence de potentiel appliquée entre deux électrodes métalliques dont l'une est mobile et l'autre fixe. Il se crée alors une force électrostatique proportionnelle au champ électrique qui va mettre en mouvement l'électrode métallique mobile. La figure 2-1 montre le principe d'un actionnement électrostatique entre deux plaques métalliques soumises à une différence de potentiel externe.

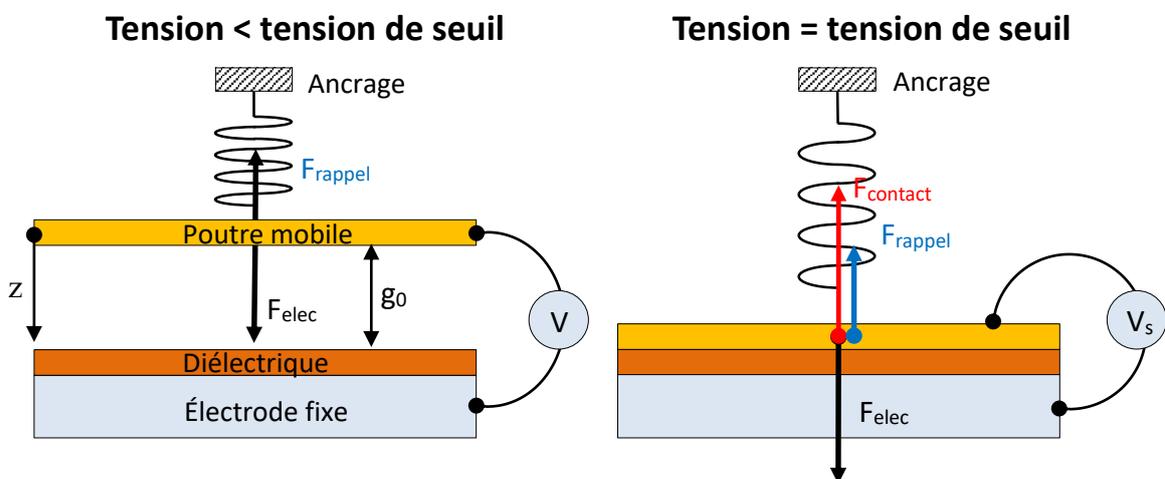


Figure 2-1 : Principe de fonctionnement d'un actionnement électrostatique entre deux plaques métalliques.

Le bilan des forces montre qu'une force électrostatique \vec{F}_{elec} attire l'électrode mobile vers l'électrode fixe. Celle-ci est proportionnelle à la quantité de charge Q présente sur les deux électrodes, et E le champ électrostatique créé par la tension appliquée entre les deux électrodes et se définit par l'expression $F_{elec} = \frac{1}{2}QE$. Les deux électrodes formant une capacité polarisée et d'après le théorème de Gauss, nous pouvons remplacer Q par $\frac{\epsilon SV}{g_0}$, et E par $\frac{V}{g_0}$. L'expression de la force électrostatique F_{elec} est alors donnée par l'équation (2-1),

$$F_{elec} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S V^2}{(g_0 - z)^2} \quad (2-1)$$

Où S est la surface de l'électrode fixe, V est la tension appliquée entre les électrodes, ϵ est la permittivité du milieu, g_0 est le gap initial et z est le déplacement de l'électrode mobile.

Une force de rappel notée $\overrightarrow{F}_{\text{rappel}}$ liée au système masse-ressort créée par l'électrode mobile (membrane ancrée dans le cas d'un MEMS) se crée alors de sens opposé à celle de $\overrightarrow{F}_{\text{elec}}$. Cette force mécanique de rappel dépend linéairement du déplacement « z » et de la constante de raideur « K ». Elle est donnée par l'équation (2-2),

$$F_{\text{rappel}} = K \cdot \Delta z \quad (2-2)$$

Où Δz est le déplacement de la membrane mobile. À noter que lorsque la force électrostatique dépasse la force de rappel, l'électrode mobile atteint alors son point d'instabilité mécanique qui l'amène brusquement en contact avec le diélectrique. Il apparait alors une force de contact notée $\overrightarrow{F}_{\text{contact}} = \overrightarrow{F}_{\text{elec}} - \overrightarrow{F}_{\text{rappel}}$. La tension pour laquelle ce point d'instabilité est atteint est donnée par l'équation (2-3),

$$V_{\text{seuil}} = \sqrt{\frac{8 K g_0^3}{27 \epsilon S}} \quad (2-3)$$

La figure 2-2 présente le déplacement d'une électrode mobile en fonction de la tension appliquée, pour une constante de raideur $k=500 \text{ N/m}$, $g_0=1,5 \text{ }\mu\text{m}$, $S=15000 \text{ }\mu\text{m}^2$, $\epsilon=\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ (en air) et une couche intermédiaire de $0,5 \text{ }\mu\text{m}$.

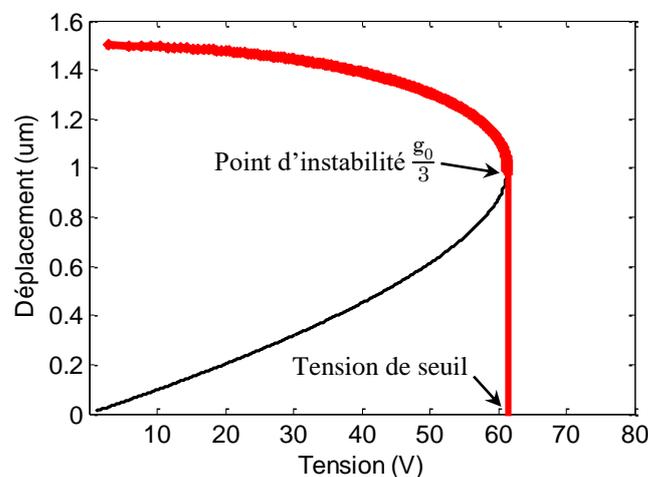


Figure 2-2 : Déplacement de la poutre en fonction de la tension appliquée.

2.2.2 Cas d'un commutateur MEMS-RF ohmique

Le principe d'actionnement d'un commutateur MEMS-RF ohmique est basé sur le même phénomène présenté par la figure 2-3. Généralement pour un commutateur ohmique, l'électrode d'activation ne peut couvrir la surface totale de la poutre mobile (la zone de contact

n'étant pas polarisée). Ainsi, la constante de raideur liée à l'actionnement (K_{act} , en anglais actuation stiffness) prend en compte la surface de l'actionneur tandis que la constante de raideur impliquée dans la force de rappel (K_r , en anglais release stiffness) comprend celle de la zone de contact.

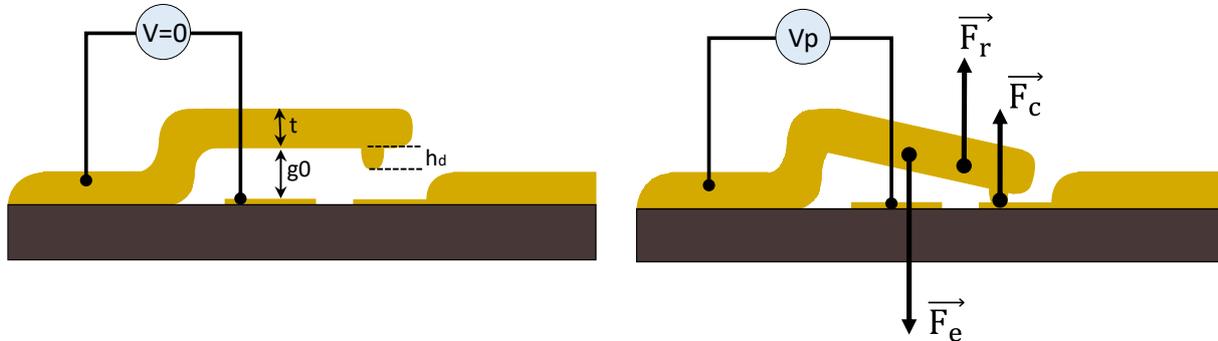


Figure 2-3 : Bilan de forces appliqué lors d'actionnement électrostatique d'un commutateur MEMS-RF.

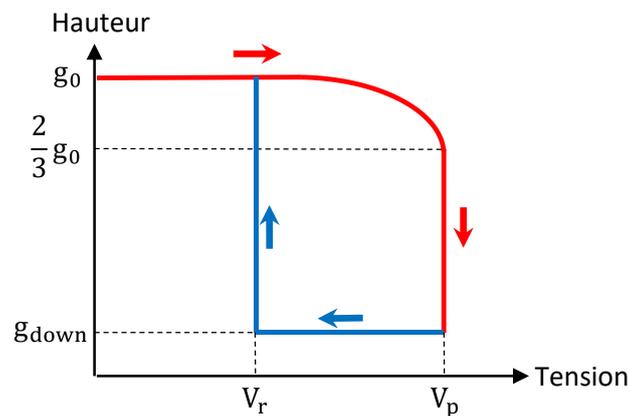


Figure 2-4 : Actionnement et relâchement électrostatique d'un micro-commutateur MEMS-RF.

À l'actionnement, la force électrostatique est alors liée à la constante de raideur d'actionnement notée « K_{act} » par la tension d'abaissement (tension de seuil),

$$V_p = \sqrt{\frac{8 K_{act} g_0^3}{27 \epsilon_0 S}} \quad \text{avec } V_p = V_s \text{ pour } K = K_{act} \quad (2-4)$$

Au relâchement de la poutre, la force de rappel est liée à une constante de raideur de relâchement notée « K_r » présentée par le rapport d'une force appliquée et la déflexion de la poutre au niveau de doigt de contact (dimple) [62]. La tension de relâchement du commutateur peut alors s'écrire de cette manière,

$$V_r = \sqrt{\frac{2 K_{act} h_d^2 (g_0 - h_d)}{\epsilon_0 S}} \quad (2-5)$$

où h_d est la hauteur de dimple (doigt de contact).

2.3 Présentation et optimisation du commutateur

2.3.1 Design du MEMS

Le commutateur MEMS est une membrane de forme circulaire de $7\ \mu\text{m}$ d'Or électrolysé (figure 2-5). Il est constitué par cinq ancrages, un trou est présenté devant chaque ancrage afin de compenser les contraintes résiduelles (soit en compression ou en tension) s'accumulant durant la fabrication du composant. Un dimple (plot de contact) de $0,4\ \mu\text{m}$ d'épaisseur est utilisé pour former le contact métallique du commutateur. Des stoppeurs de la même hauteur que celle du dimple de contact, sont également placés à des endroits stratégiques et empêchent la poutre de venir en contact avec l'électrode d'activation lorsqu'elle est activée. L'électrode d'activation a été conçue pour faire face à la quasi-totalité de la poutre, tout en étant proche de la zone de contact du commutateur de façon à garantir une meilleure force de contact permettant une bonne fiabilité et de faibles pertes d'insertion.

Le tableau 2-1 présente une comparaison des paramètres électriques et mécaniques simulés du commutateur présentant deux formes différentes d'électrodes d'activation : la première électrode s'étend jusqu'à la zone de contact et la deuxième fait face à la quasi-totalité de la poutre tout en entourant la zone de contact. Les résultats montrent que l'électrode d'activation entourant totalement la zone de contact procure une force de contact au moins 30% plus importante.

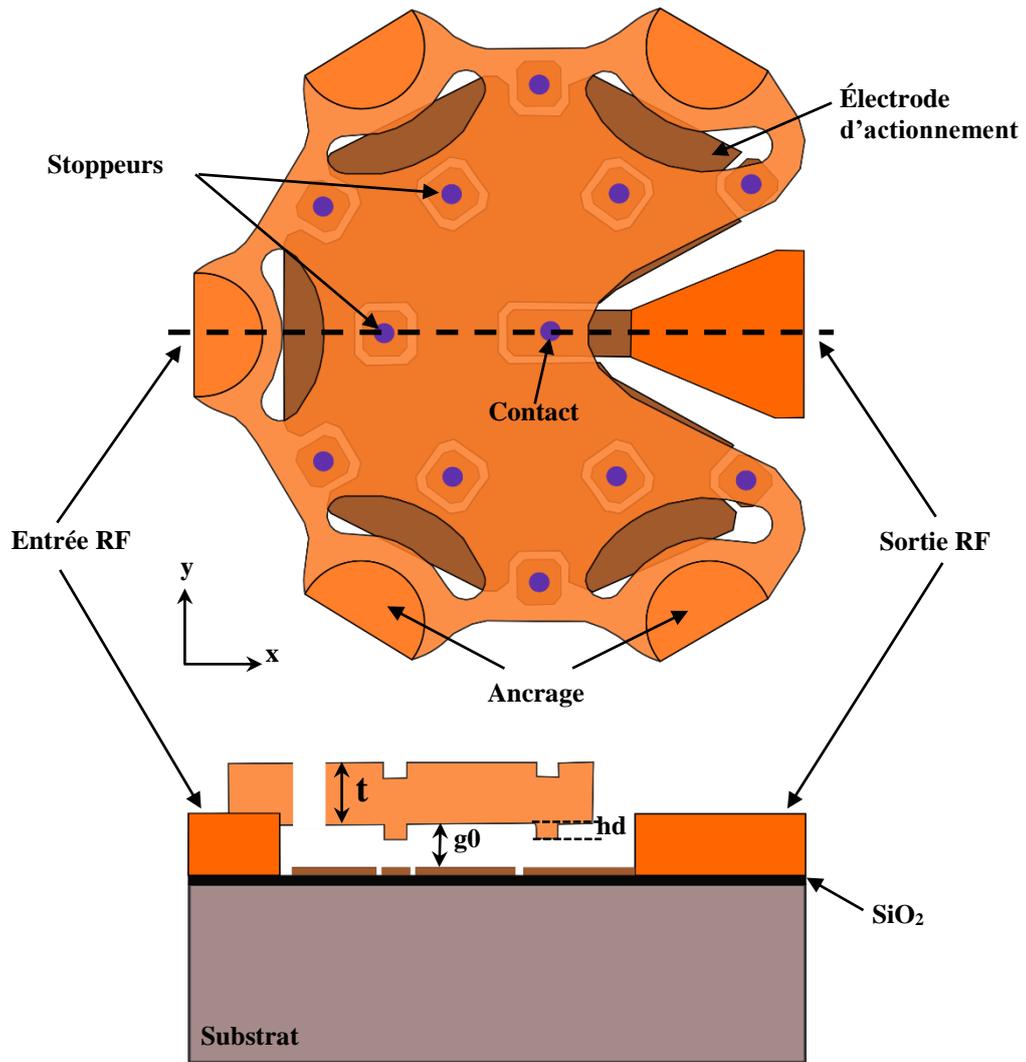


Figure 2-5 : Vue de dessus et en coupe du commutateur MEMS-RF.

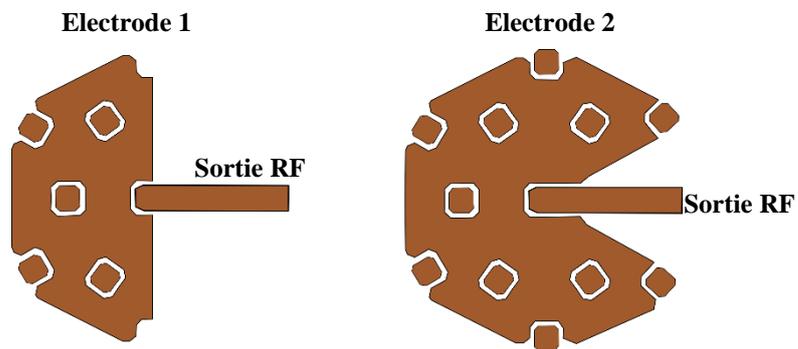


Figure 2-6 : Deux formes des électrodes d'activation étudiées.

Tableau 2-1 : Paramètres simulés du commutateur pour deux différentes surfaces d'actionnement.

Paramètres	Électrode 1		Électrode 2
Raideur d'activation K_{act} (N/m)	4100	3355	3355
Raideur de relâchement K_r (N/m)	1860	1682	1860
Gap initial (g_0) (μm)	0,8	0,8	0,8
Hauteur de dimple (h_d) (μm)	0,4	0,4	0,4
Épaisseur de la poutre (t) (μm)	7	6,4	7
V_p (V)	70	50	50
V_r (V)	48	42	42
Force de rappel (mN)	0,75	0,67	0,75
Force de contact (mN)	0,5 ^a	0,9 ^a	1,34 ^a
$F_{rés}$ (KHz)	215	204	162
Temps de commutation (μs)	2,54 ^a	1,91 ^a	2,7 ^a

^a : à $V_{app}=70V$

La suite de l'étude présente une analyse détaillée des paramètres électromécaniques et thermiques pour une tension d'abaissement « V_p » de 50V.

2.3.2 Optimisation de la robustesse

Cette partie présente les choix technologiques réalisés permettant d'obtenir une force de contact et de rappel élevée (de l'ordre de 1mN), une faible sensibilité aux contraintes de fabrication en température tout en respectant la limite de la tension d'abaissement à 50V (Valeur préférée par AirMems). Cette dernière dépend de trois paramètres : le gap initial présenté entre l'électrode d'actionnement et la poutre mobile « g_0 », la constante de raideur d'actionnement de la poutre « K_{act} », et la surface d'électrode d'actionnement « S ». La figure 2-7 montre l'évolution des constantes de raideur d'actionnement « K_{act} » et de relâchement « K_r » en fonction de l'épaisseur de la membrane. À noter que K_{act} est forcément plus élevée que K_r puisque l'électrode d'activation couvre une zone plus rigide de la membrane comparée à la zone de contact. Ce type de simulations est déterminant dans le choix des dimensions (hauteur, épaisseur...) de la membrane, pour une tension d'activation et de relâchement donnée.

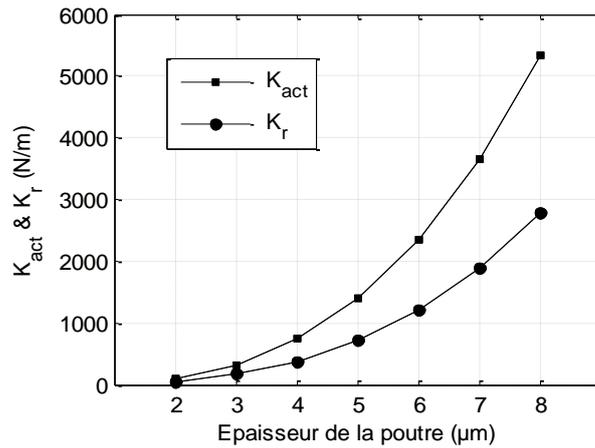


Figure 2-7 : Raideurs d'activation et de relâchement en fonction de l'épaisseur de la poutre.

La figure 2-8 présente l'évolution de la tension V_p et V_r du MEMS en fonction de g_0 pour différentes épaisseurs d'or constituant la membrane. La hauteur du plot de contact et des stoppeurs sont fixés à $0,4 \mu\text{m}$, paramètre largement maîtrisé en fabrication.

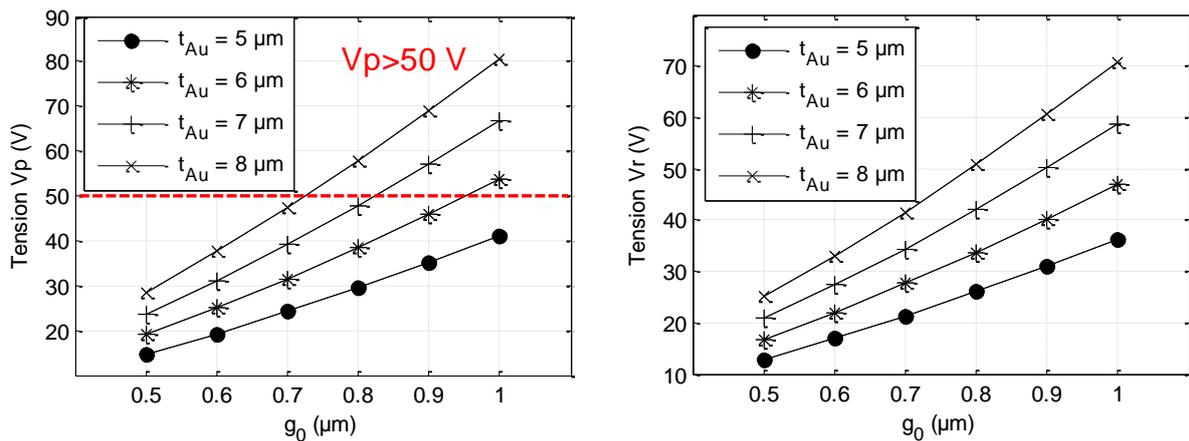


Figure 2-8 : Évolution de la tension d'activation et relâchement du MEMS en fonction du gap pour différents épaisseurs de la poutre.

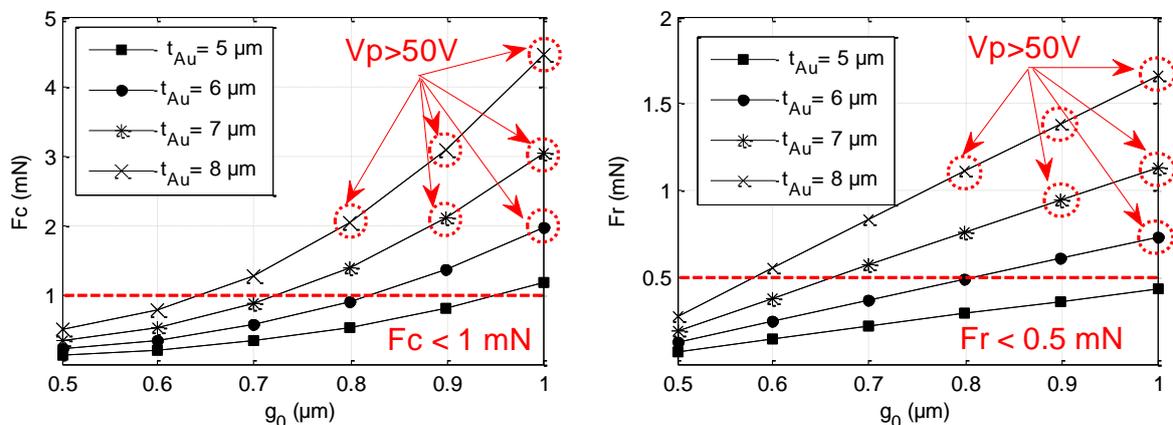


Figure 2-9 : Évolution de la force de contact et rappel du MEMS en fonction du gap pour différents épaisseurs de la poutre.

Il en découle plusieurs couples « gap (g_0) et épaisseur de poutre (t_{AU}) » permettant d'obtenir une force de contact supérieure à 1 mN et une force de rappel supérieure à 0,5 mN représenté par les ronds rouges en figure 2-9. Ainsi les meilleures combinaisons de paramètres pour des tensions d'activation inférieures à 50V sont $t_{AU} = 7 \mu\text{m}$ et $g_0 = 0,8 \mu\text{m}$ ou $t_{AU} = 8 \mu\text{m}$ et $g_0 = 0,7 \mu\text{m}$. Pour améliorer l'isolation électrique du composant, un gap à $0,8 \mu\text{m}$ sera préféré. Par la suite, le gap et l'épaisseur de la membrane utilisés seront respectivement choisis à $0,8 \mu\text{m}$ et $7 \mu\text{m}$ garantissant une tension d'activation de 50V, une force de contact de 1,34 mN et une force de rappel de 0,75 mN.

2.3.3 Compensation des effets thermiques

2.3.3.1 Définition des contraintes

Pour les commutateurs MEMS-RF, il en existe 3 types de contraintes à prendre en considérations lors de la fabrication et le fonctionnement du composant :

- Les contraintes résiduelles
- Le gradient de contraintes
- La contrainte appliquée pendant le fonctionnement du composant

Durant la fabrication des MEMS-RF, les couches minces déposées pour former la structure provoquent deux types de contraintes mécaniques : la contrainte résiduelle (σ_{res}) et le gradient de contrainte ($\Delta\sigma$). Les contraintes résiduelles sont liées principalement au gradient de la température que subit le film de la structure mécanique du composant lors du dépôt et à l'accroche des grains de matière aux interfaces. Ce type de contrainte est facilement modélisable par un outil de simulation.

$\Delta\sigma$ en revanche est lié à une légère différence des conditions de dépôt dans l'épaisseur de la couche ou entre plusieurs couches différentes. Il peut être en compression ou en tension.

En effet, ces effets provoquent une déflexion vers le haut ou vers le bas de la poutre mobile selon le signe de gradient. Pour modéliser l'effet de gradient de contraintes, nous avons décomposé la membrane en deux couches de mêmes épaisseurs ($t_1=t_2=t/2$) avec une contrainte σ_1 et σ_2 pour t_1 et t_2 respectivement.

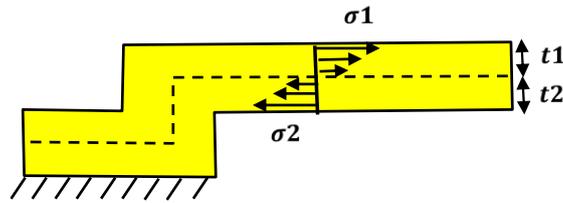


Figure 2-10 : Modèle d'un gradient de contrainte dans deux couches de mêmes épaisseurs.

Les contraintes résiduelles et gradient sont donnés par,

$$\sigma_{\text{res}} = \frac{\sigma_1 t_1 + \sigma_2 t_2}{t} \text{ (MPa)} \quad (2-6)$$

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t} \left(\frac{\text{MPa}}{\mu\text{m}} \right) \quad (2-7)$$

En plus des contraintes de fabrication, la forme des ancrages d'un MEMS-RF a un effet significatif sur les contraintes induites sur la poutre lors de l'actionnement [9]. Le fluage mécanique des MEMS est forcément lié à ces contraintes qui affectent la fiabilité du composant lorsque ce dernier est maintenu activé. Également, nous pouvons dire que les matériaux utilisés de la poutre jouent un rôle primordial sur le fluage de MEMS-RF et leur fiabilité [63], [64], [65], [66]. Le phénomène de fluage comporte 3 phases (figure 2-11). En phase 2, la plus longue, il est défini par l'équation suivante,

$$\dot{\epsilon} = C \cdot \sigma^n \exp^{-\frac{Q_c}{KT}} \quad (2-8)$$

Où « $\dot{\epsilon}$ » est la vitesse de déformation, « C » est une constante dépendante du matériau, « σ » est la contrainte appliquée, « n » est l'exposant de contrainte, « Q_c » est l'énergie d'activation du fluage, « K » est la constante de Boltzmann et « T » est la température.

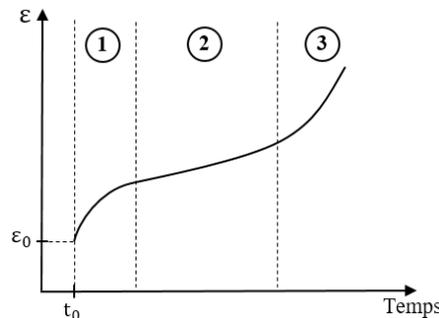


Figure 2-11 : La courbe typique de la contrainte en fonction du temps pour représenter le comportement du fluage qui est divisé en trois régimes.

Il est donc primordial de réduire les contraintes mécaniques de la poutre en fonctionnant pour limiter ces dérives mécaniques au cours du temps.

2.3.3.2 Solutions proposées

En se basant sur des simulations par la méthode des éléments finis (EF), la forme des ancrages et des ouvertures du commutateur a été optimisée pour minimiser ces contraintes afin de diminuer le fluage mécanique. La figure 2-12 montre une comparaison entre plusieurs formes d'ancrage et ouvertures de forme rectangulaire classique ou arrondi optimisées pour avoir le minimum de contraintes pour une tension de polarisation de 70V ($F_c = 1,34$ mN). Les simulations montrent qu'en arrondissant l'ancrage et en adaptant la forme des ouvertures, la contrainte maximale lors de la déflexion du composant est réduite à 86,4 MPa (design n°3). À noter que les simulations sont réalisées à V_p constante.

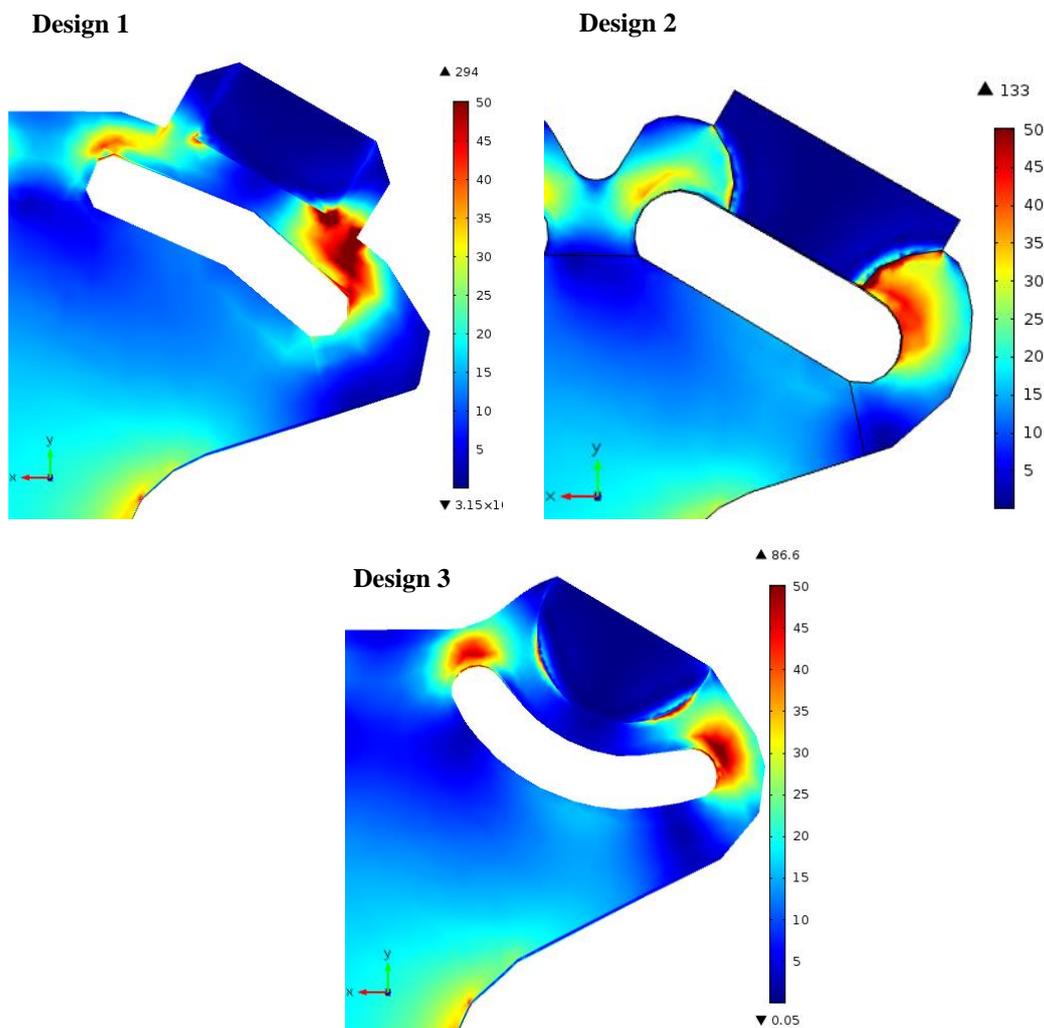


Figure 2-12 : Von Mises stress en MPa de trois différentes formes d'ancrage pour une force de contact de 1,34 mN et une tension appliquée de 70V.

De là, l'impact de contraintes de fabrication a été évalué. La figure 2-13 montre les résultats de simulations de la déflexion de la membrane (design n°3) en fonction de contraintes résiduelles dues aux ancrages qui varient entre ± 400 MPa.

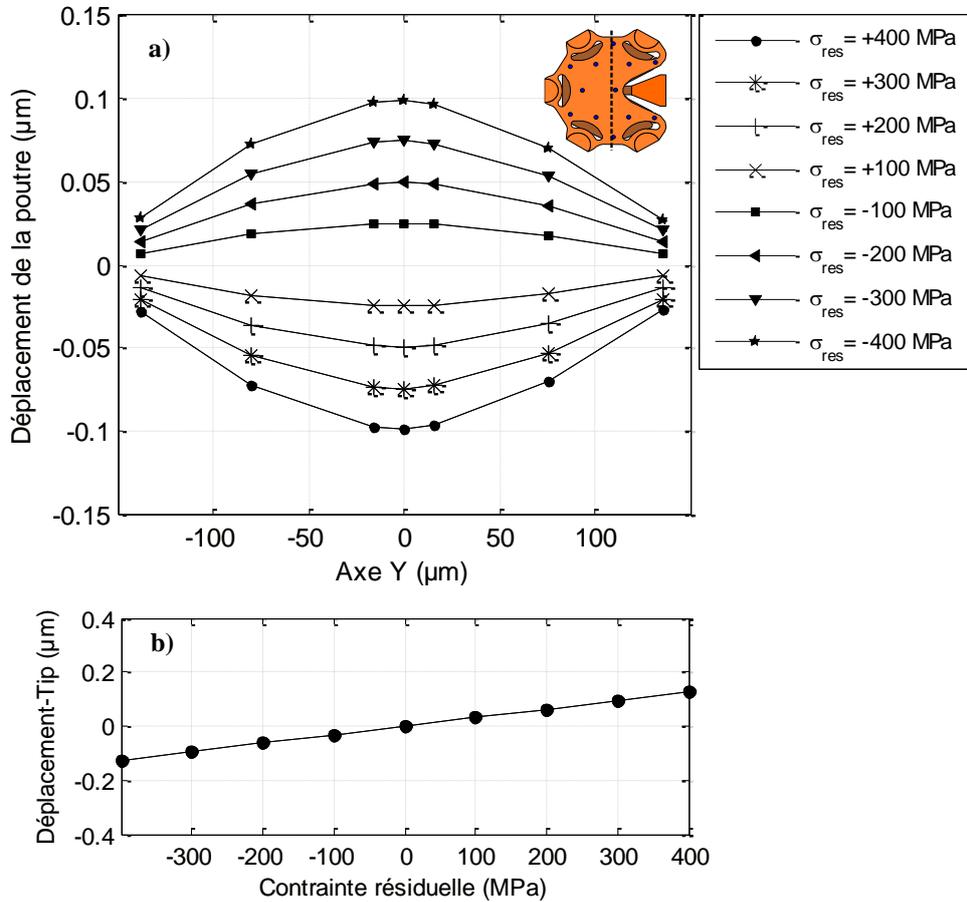


Figure 2-13 : Déflexion de la poutre en présence de contraintes résiduelles en tension et compression a) vue en coupe axe Y, b) au niveau de dimple de contact.

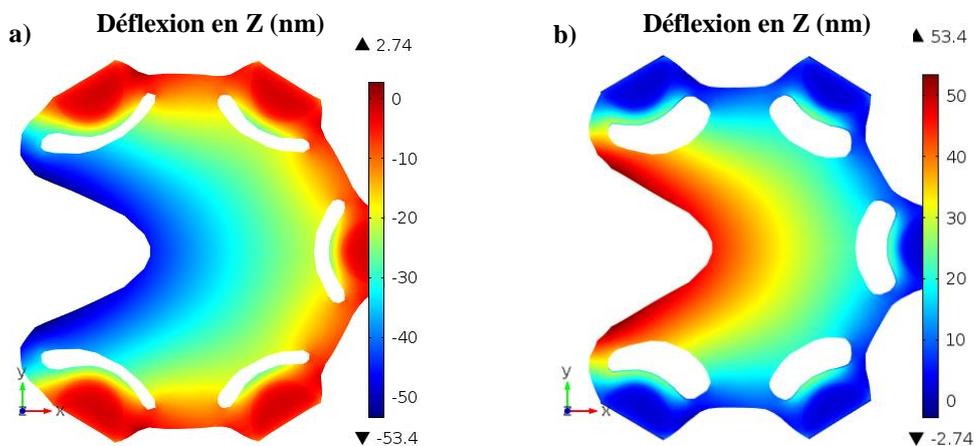
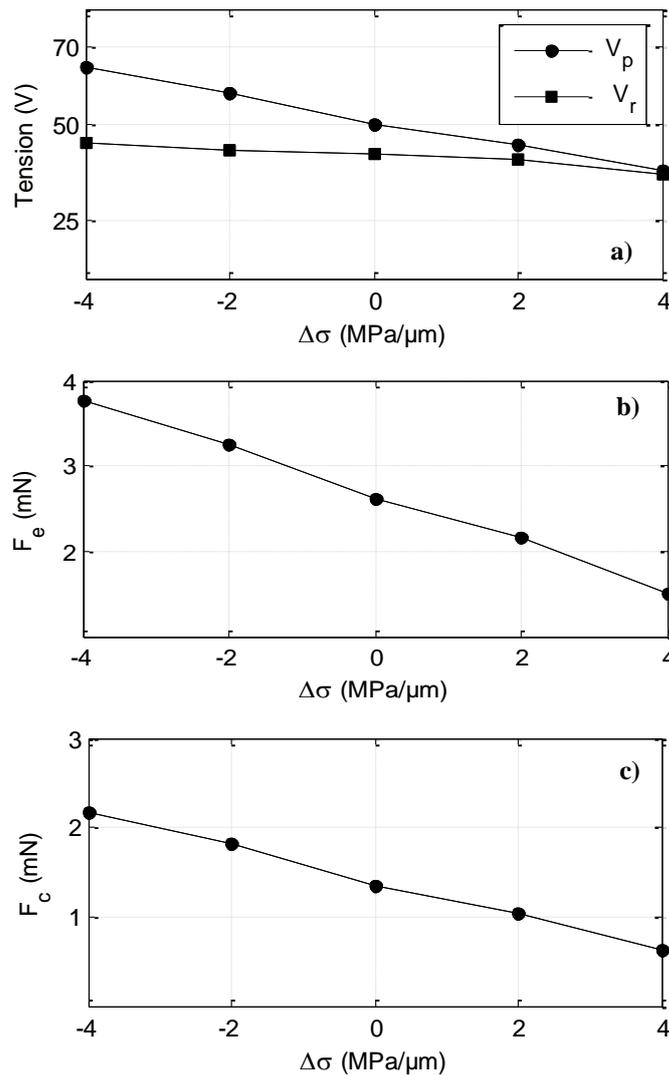


Figure 2-14 : Déflexion de la membrane suivant l'axe Z en présence de contraintes résiduelles de 100 MPa a) en compression, b) en tension.

Les résultats montrent que la poutre est très peu sensible à ces contraintes grâce aux ouvertures réalisées qui viennent compenser les efforts (figure 2-13).

La figure 2-15 présente les performances simulées du commutateur en fonction de gradient de contrainte entre ± 4 MPa/ μm et d'une contrainte résiduelle de 150 MPa en compression. En présence de ce gradient de contrainte, la tension d'abaissement V_p est égale à 50 ± 13 V, et la force de rappel est égale à $0,75 \pm 0,15$ mN. Pour une tension d'activation $V_{\text{app}}=1,5*V_p$, la force de contact est égale à $1,34 \pm 0,7$ mN. Ces valeurs montrent que les gradients de contraintes devront être maîtrisés pour limiter les dérives de la tension d'activation et de la force de contact.



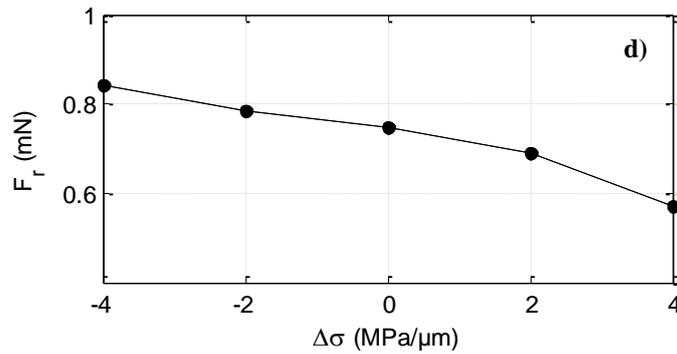


Figure 2-15 : Propriétés du commutateur en fonction de $\Delta\sigma$ a) Tension d'abaissement et de relâchement, b) force électrostatique, c) force de contact et d) force de relâchement

Durant le procédé d'encapsulation, le MEMS est soumis à des températures élevées ($>200^\circ\text{C}$). Lors de l'échauffement, la poutre subit de contraintes résiduelles additionnelles régies par l'équation (2-9),

$$\sigma(T) = \sigma_{\text{res}} - [(\alpha_{\text{poutre}} - \alpha_{\text{substrat}}) \cdot E \cdot (T_0 - T)] \quad (2-9)$$

Où α est le coefficient de dilatation thermique, E est le module de Young équivalent de la poutre et le substrat, T_0 est la température ambiante et T est la température appliquée sur le composant.

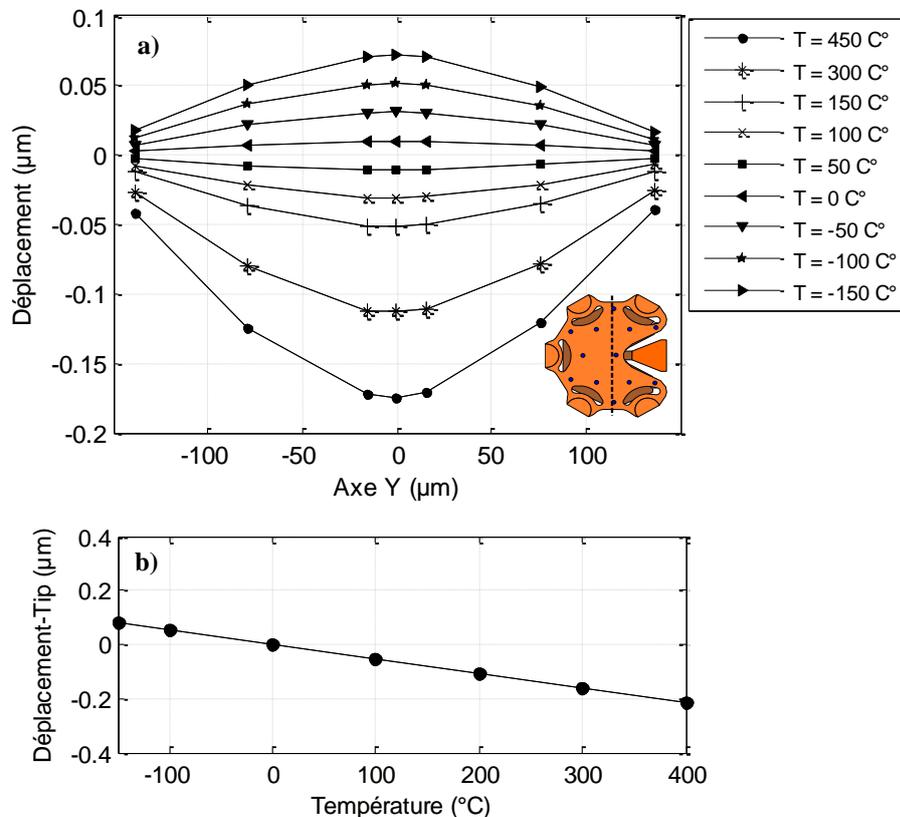


Figure 2-16 : Influence de la température sur le micro-commutateur.

Les simulations montrent une déflexion maximale de 0,18 μm vers le bas pour une température de 450°C. À -150°C, la membrane subit une déflexion de 70 nm vers le haut. Ces résultats de simulations montrent la bonne tenue en température du commutateur et sécurise son intégration dans des procédés d'encapsulation haute température.

2.4 Étude du rebond lors de la fermeture du commutateur

Les commutateurs MEMS-RF à contact ohmique (métal-métal) souffrent de multiples rebonds au niveau de contact lors de l'actionnement. En effet, l'apparition de ces phénomènes pendant la fermeture de commutateur est l'un des facteurs provoquant la défaillance mécanique du composant puisqu'ils dégradent plus rapidement la surface de contact.

Un schéma de principe de la réponse dynamique d'un commutateur MEMS-RF est représenté par la figure 2-17. Cette réponse dynamique est basée sur la seconde loi de Newton ou principe fondamental de la dynamique de translation donnée par l'équation (2-10),

$$m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{ex}} \quad (2-10)$$

m est la masse effective de la poutre, a correspond à l'accélération de l'objet et F_{ext} décrit les forces extérieure exercées sur l'objet. Par analogie, ce phénomène physique peut être comparé à une bille rebondissant sur un support fixe. Dans ce cas, la vitesse de $n^{\text{ième}}$ rebond est définie par l'équation (2-11) où V_n et V_{n-1} sont les vitesses de $n^{\text{ième}}$ et $(n-1)^{\text{ième}}$ rebonds et C_r le coefficient de restitution du matériau de contact ($0 < C_r < 1$).

$$V_n = C_r \cdot V_{n-1} \quad (2-11)$$

Le coefficient de restitution C_r correspond à la réponse mécanique du matériau à l'impact. Lorsque C_r tend vers 0, l'énergie cinétique du contact mobile est absorbée et le contact reste fermé. D'autre part, si C_r se rapproche de 1, le contact est plus élastique et la partie mobile rebondie. Les rebonds des micros commutateurs MEMS-RF dépendent des plusieurs paramètres tels que la masse de la poutre mobile, la vitesse de l'impact, la nature du matériau de contact (dureté, élasticité, etc.) et la pression où la nature du gaz localisé entre la poutre mobile et l'électrode d'actionnement.

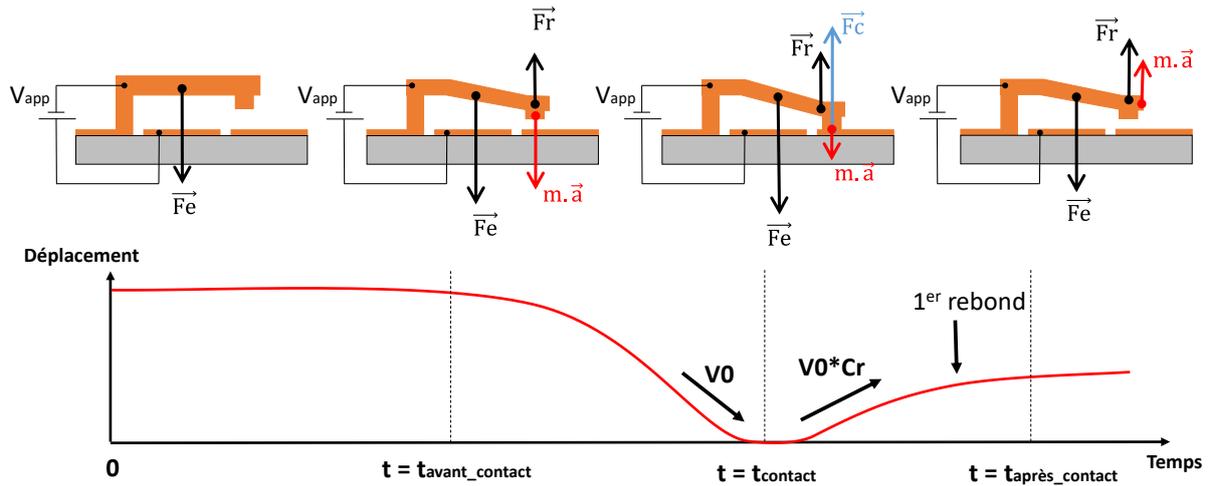


Figure 2-17 : Illustration du comportement mécanique du rebond subit par un commutateur MEMS.

Ainsi l'équation caractérisant la dynamique d'un système masse-ressort est donné par :

$$m \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + D \cdot \frac{d z(t)}{dt} + k \cdot z(t) = -F_e \quad (2-12)$$

Où z est le déplacement de la poutre mobile, m est la masse effective de la poutre, D est le coefficient d'amortissement, k est la constante de raideur et F_e est la force électrostatique appliquée sur la poutre donnée par,

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V_{app}^2}{(g_0 + z(t))^2} \quad (2-13)$$

Pour résoudre ce système non linéaire, ils existent des solutions analytiques en utilisant MATLAB, Mathematica, MAPLE ou des outils de simulation 3D tels qu'ANSYS, CONVENTOR, etc.

2.4.1 Influence de la tension appliquée

En se basant sur l'équation (2-10), la réponse dynamique du commutateur est liée à la tension d'activation via la force électrostatique générée. Pour cela, les équations précédentes ont été intégrées dans un logiciel de simulation mécanique à EF, afin d'étudier l'influence de cette tension sur les phénomènes de rebonds. La figure ci-dessous montre les résultats de la réponse dynamique du MEMS au fur et à mesure que la tension augmente.

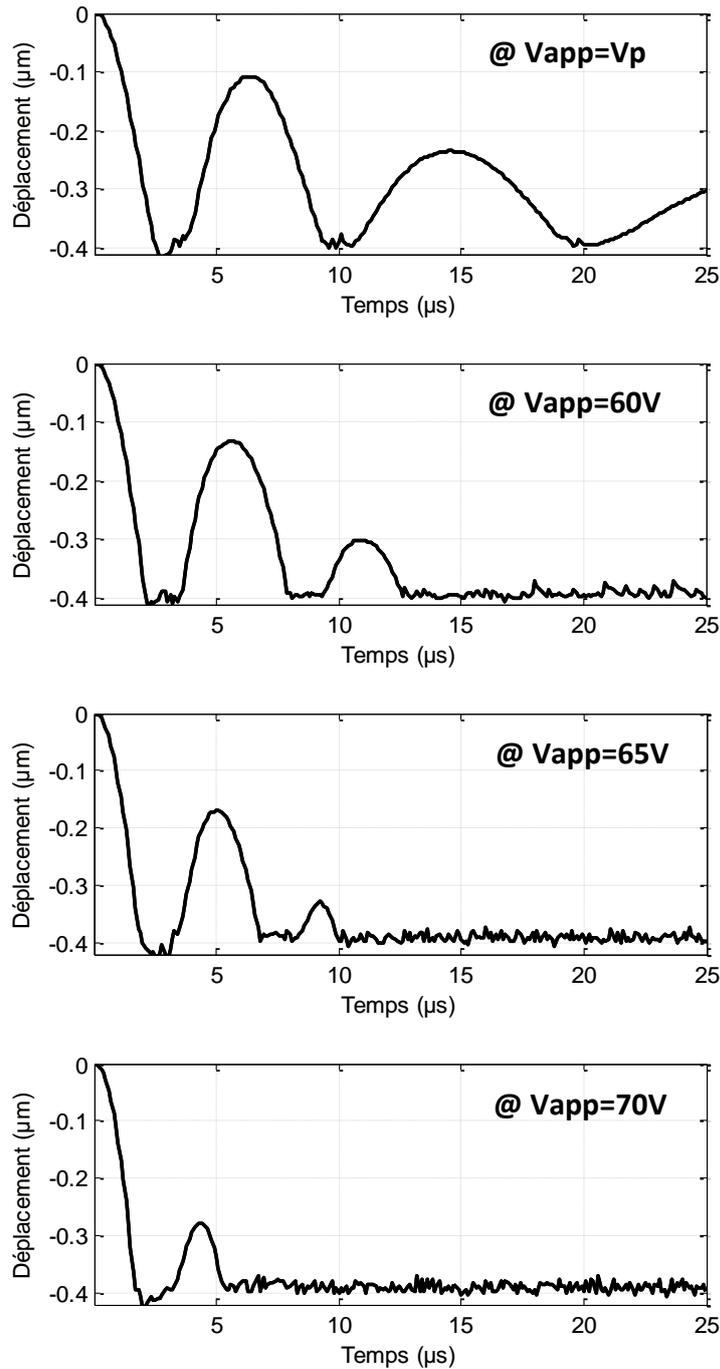


Figure 2-18 : Déplacement de la poutre mobile en fonction du temps pour différentes tension d'activation appliquée.

Les résultats montrent qu'en augmentant la tension d'activation, le nombre de rebonds diminue. En effet, la force électrostatique étant plus élevée, elle permet d'annuler la force de rappel et la force de mouvement qui lui sont opposées. À 70V, l'amplitude du 1^{er} rebond est grandement diminuée et les rebonds ultérieurs ont disparus.

2.4.2 Influence d'un stoppeur plus haut

La diminution du nombre de rebond a fait l'objet de nombreuses publications [67], [68], [69], [70]. Récemment, le laboratoire XLIM a trouvé un moyen de diminuer voire supprimer les rebonds en introduisant une dissymétrie sur les ancrages d'un cantilever [71]. Dans cette partie, le concept a été repris en jouant cette fois-ci sur la hauteur des stoppeurs constituant la membrane. Ainsi, en permettant de toucher premièrement le dimple du contact RF (de hauteur $0,4 \mu\text{m}$), puis un stoppeur plus grand et judicieusement positionné sur la membrane, celle-ci devrait être amortie. L'idée principale est de transférer l'énergie cinétique de la membrane vers des modes de résonance mécanique supérieurs pour dissiper l'énergie restante lors du premier contact par le dimple RF. La figure 2-19 présente le principe de l'étude proposée.

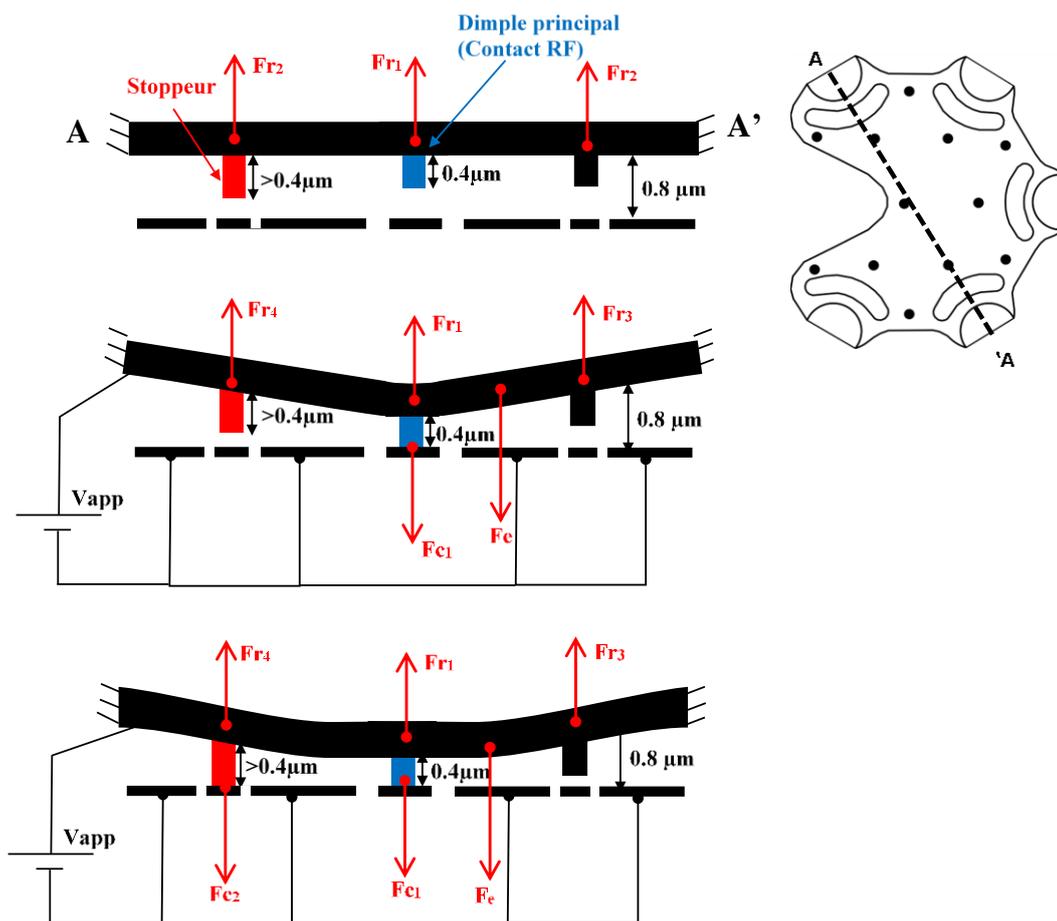


Figure 2-19 : Vue en coupe AA' du principe de l'étude proposée pour réduire le nombre du rebond.

Pour cela, nous avons cherché les 4 premiers modes de résonance propre du commutateur pour positionner le stoppeur chaque fois sur un mode de résonance différent et regarder l'influence

sur la réponse du rebond. La figure 2-20 montre les 4 premiers modes de résonance du notre commutateur.

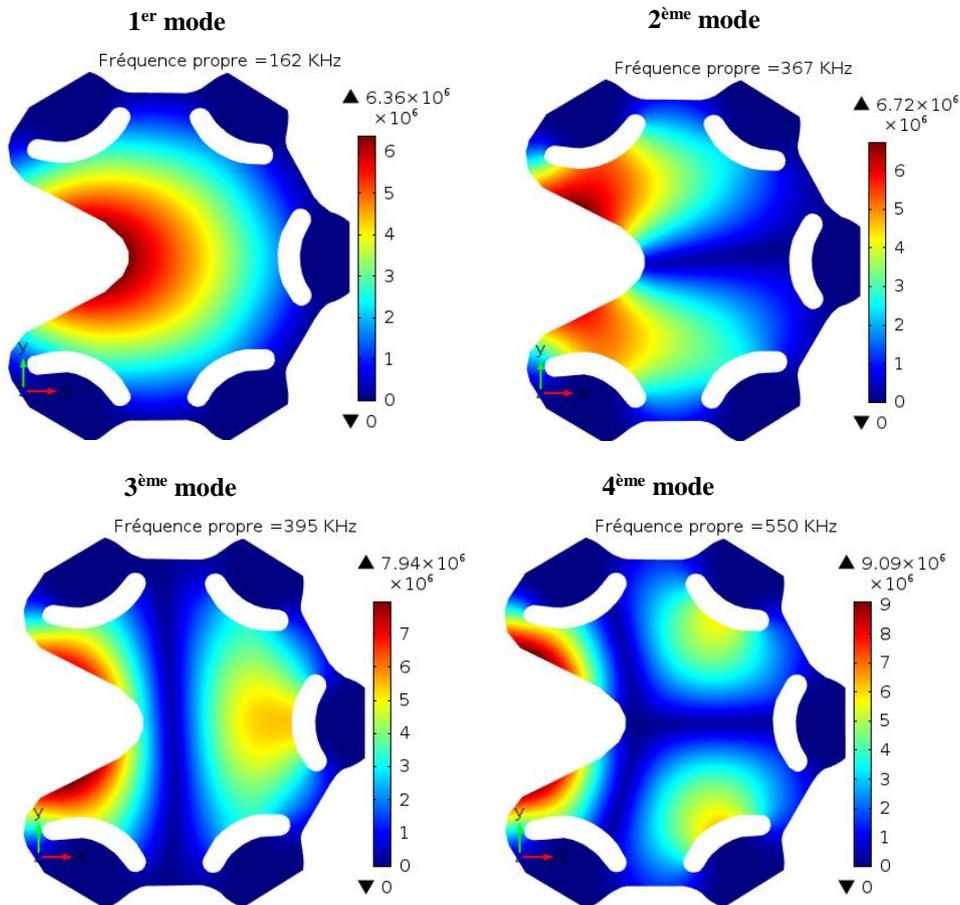


Figure 2-20 : Modes de résonance mécanique du commutateur.

Ensuite, la hauteur des stoppeurs se rapprochant au plus près du point d'amplitude maximal d'un ou plusieurs modes est progressivement augmentée. La figure ci-dessous montre les différentes configurations simulées avec dans chaque cas le(s) stoppeur(s) choisi(s) en rouge.

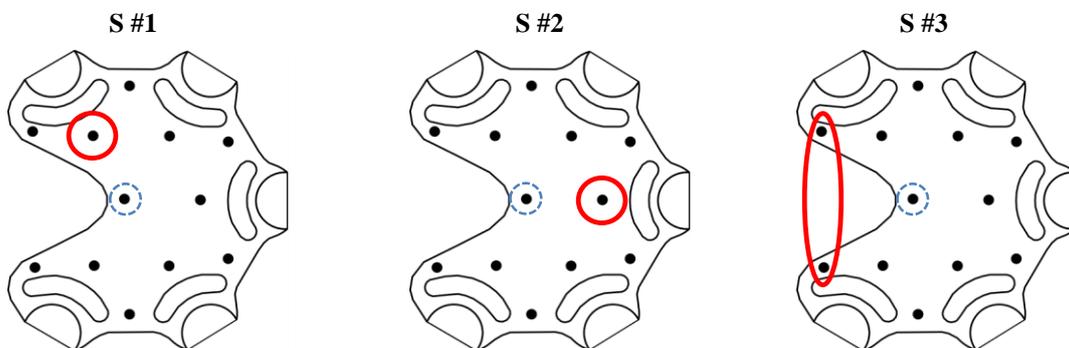
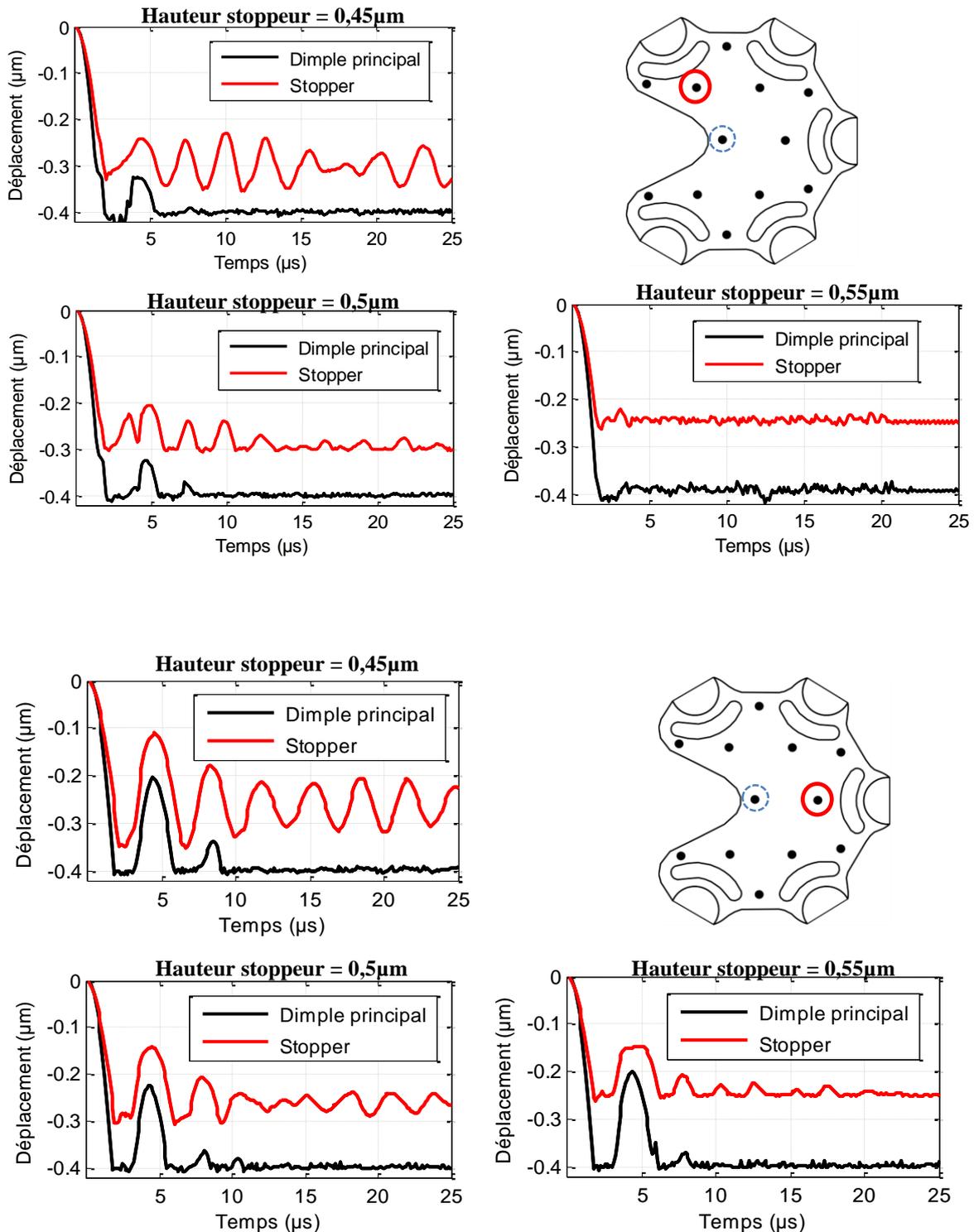


Figure 2-21 : Les stoppeurs qui ont été étudiés (en rouge) pour avoir une épaisseur plus grande que celle de dimple principal (en bleu pointillé).

Les résultats de simulation présentés par la figure 2-22 montrent la réponse dynamique classique du commutateur sans changer aucune hauteur d'un stoppeur (hauteur des stoppeurs égale à celle de dimple 0,4 μm) et une variation des hauteurs des stoppeurs qui sont positionnés sur la partie résonnante de différents modes mécaniques propres (figure 2-21) en transférant l'énergie restée par le premier contact sur le stoppeur avec hauteur plus haut.



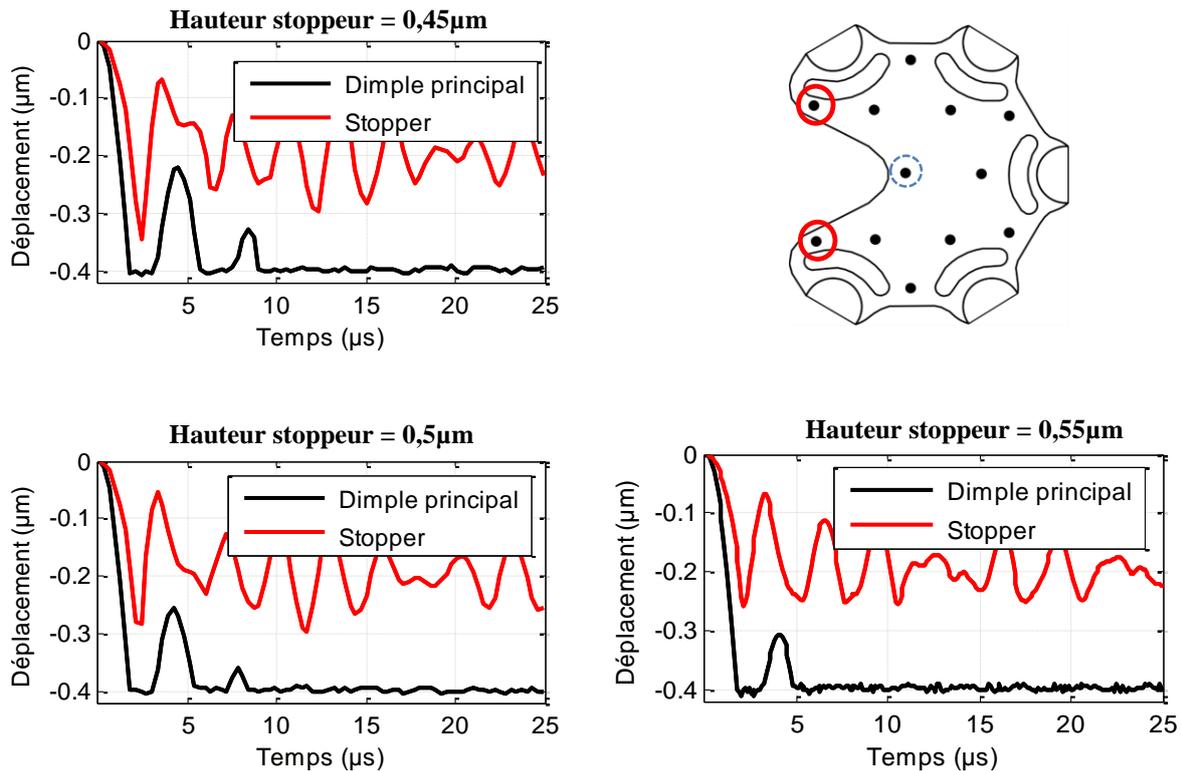


Figure 2-22 : Résultats de rebond pour différents valeurs de la hauteur de stoppeur de chaque mode de résonance étudié.

La tension d'activation appliquée sur la membrane est de 70V. D'après ces résultats, le S#1 (Cf. figure 2-21) celui qui correspond au 2^{ème} mode de résonance paraît le meilleur positionnement. Avec une hauteur de 0,55 μm du stoppeur, une suppression de phénomène du rebond est montrée.

2.5 Fabrication

La fabrication des MEMS-RF est faite par un dépôt des couches minces en utilisant certains matériaux (Au, Ti, Al, Si, SiO₂, SiN, etc...) compatibles avec des solutions chimiques utilisées dans le procédé de fabrication de ces composants. Tout d'abord, pour former l'électrode d'activation et la ligne de contact, un dépôt d'or est réalisé sur un substrat de silicium et une gravure des motifs est effectuée après les avoir définis avec une résine protectrice. Ensuite, deux couches sacrificielles sont déposées et gravées afin de créer le gap qui sépare le MEMS de son électrode d'activation définissant ainsi le dimple de contact RF et les stoppeurs. Pour la réalisation d'un stoppeur plus haut, une troisième couche sacrificielle doit être déposée et gravée. La réalisation de la poutre mobile s'effectue ensuite par un dépôt de Ti/Au réalisé à

l'aide d'un canon à électron puis électrolysé pour atteindre l'épaisseur souhaité (7 μ m). Enfin, la libération des couches sacrificielles est effectuée par procédé chimique, puis le composant est ramené à l'air à l'aide d'un sécheur à point critique (CPD pour Critical Point Dryer).

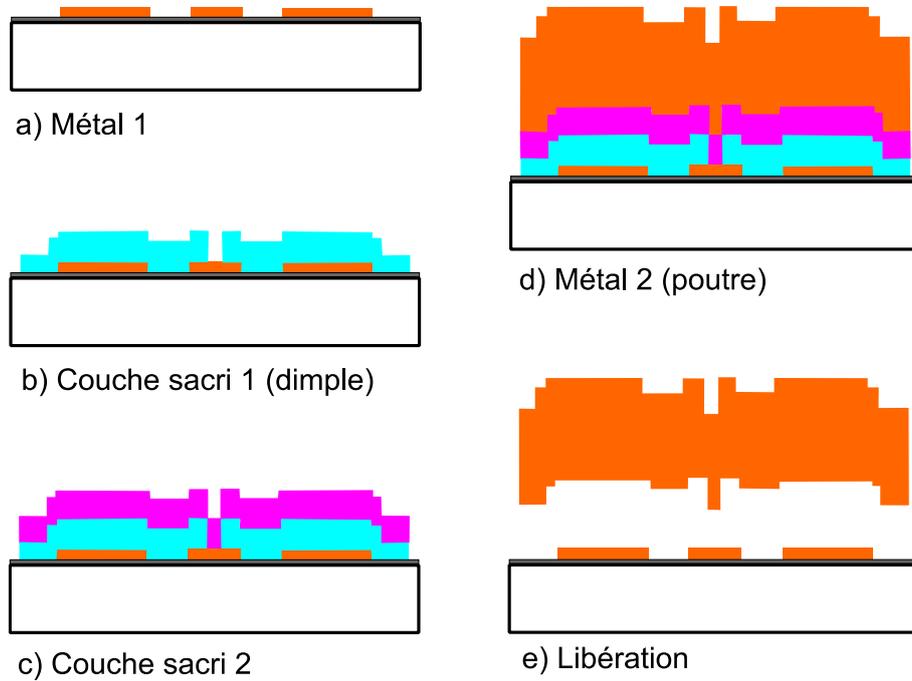


Figure 2-23 : procédé de fabrication.

La figure ci-dessous montre une photo MEB du commutateur optimisé fabriqué sur substrat de Silicium.

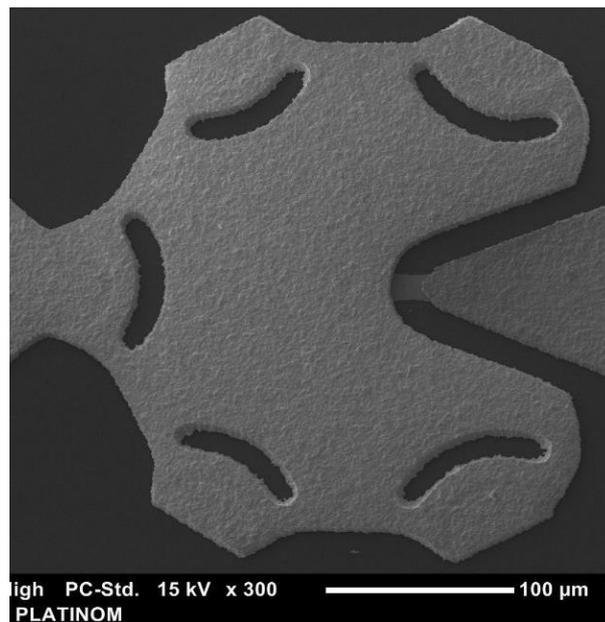


Figure 2-24 : Photo MEB du commutateur optimisé.

2.6 Mesures des performances du commutateur

2.6.1 Caractérisation RF

Les mesures RF du commutateur sont effectuées sous pointes avec un analyseur de réseau vectoriel ZVA Rohde & Schwarz 10 MHz à 24 GHz avec une calibration SOLT (Short Open Load Thru) et dans les conditions normales de température et de pression (salle de mesure climatisée). Le commutateur mesuré n'a pas été encapsulé. La figure 2-25 présente une les mesures des paramètres [S] du commutateur à son état passant et bloqué. À l'état bloqué, une capacité C_{MEMS} de 30 fF est extraite qui isole la sortie et l'entrée RF du commutateur avec 28 dB à 2 GHz. Lors d'une tension de polarisation de 70V est appliquée, le commutateur passe à son état passant et présente une résistance série R_{on} inférieure à 2 Ω . Les pertes d'insertion se situent autour de 0,2 dB à 2 GHz. À noter que les pertes sont dues à la résistance de contact et aux lignes du MEMS, les plans de calibrage étant situés au niveau des pointes.

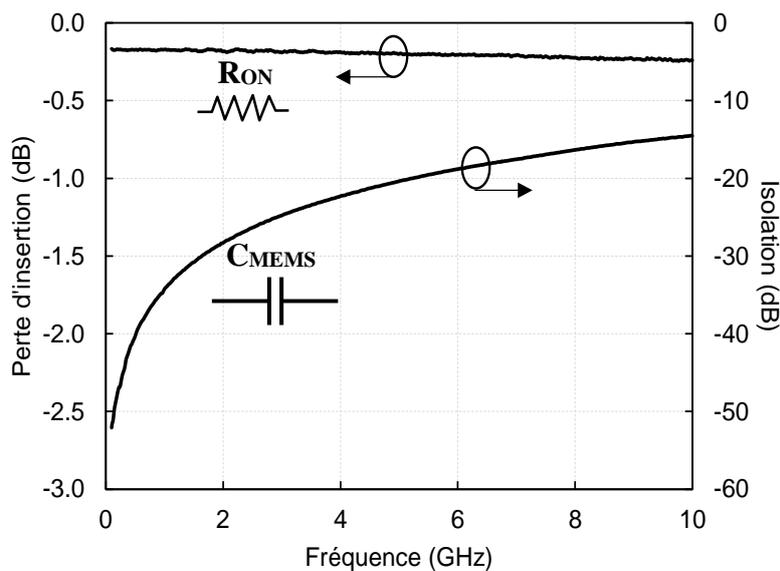


Figure 2-25 : Paramètres S mesurés du commutateur a) à son état bloqué et passant.

Des mesures DC sont faites sur plusieurs MEMS choisis au hasard sur un échantillon de 200 MEMS et montrent une tension d'activation moyenne de 40V (Tableau 2-2). L'écart entre les simulations et les mesures sont principalement liées aux gradients de contraintes évalués à 3 MPa/ μm .

Tableau 2-2 : Mesure de la tension V_p de plusieurs commutateurs du même substrat.

#MEMS mesuré	V_p
A1	38
A2	43
A5	43
A6	44
A8	38
A9	32
B5	46
B7	46
C2	41
C5	37
C6	44
D4	38
D8	37
E2	35
E6	33
F3	34
F7	43
Moyenne V_p (Volts)	40
Ecart type (Volts)	5

2.6.2 Temps de commutation

Le temps de commutation d'un commutateur MEMS-RF est exprimé selon l'équation (2-14),

$$t_c \approx 3,67 \frac{V_p}{V_{app} \times 2\pi \times f_0} \quad (2-14)$$

Il est forcément lié à la fréquence de résonance mécanique du commutateur (f_0) et à sa tension appliquée (V_{app}) [72]. Généralement, la tension appliquée vaut 1,2-1,5* V_p [16], le champs électrique entre les électrodes d'activation devant rester assez faible pour limiter les phénomènes de claquage lors d'activations prolongées. Pour cela, la fréquence détermine principalement la vitesse d'un MEMS-RF. Cette fréquence de résonance dépend directement de la constante de raideur « K » et de la masse effective de la poutre « M_{eff} ». Elle est donnée par l'équation (2-15),

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{M_{eff}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-15)$$

Concevoir un commutateur robuste présente donc un avantage puisqu'il permet de parvenir à un temps de commutation proche de la microseconde [73]. Le montage de la figure 2-26 a été réalisé pour mesurer le temps de commutation. La sortie du commutateur, l'alimentation de 300mV et la polarisation du commutateur sont reliées à un oscilloscope. Lorsque le commutateur est activé, il est en série avec la masse, donc l'oscilloscope affiche une tension de 0V. À l'inverse, si le commutateur n'est pas activé l'oscilloscope affiche la tension 300mV de l'alimentation. Ce montage de mesure simple, présente également l'avantage de pouvoir détecter le nombre de rebonds réalisés par le composant.

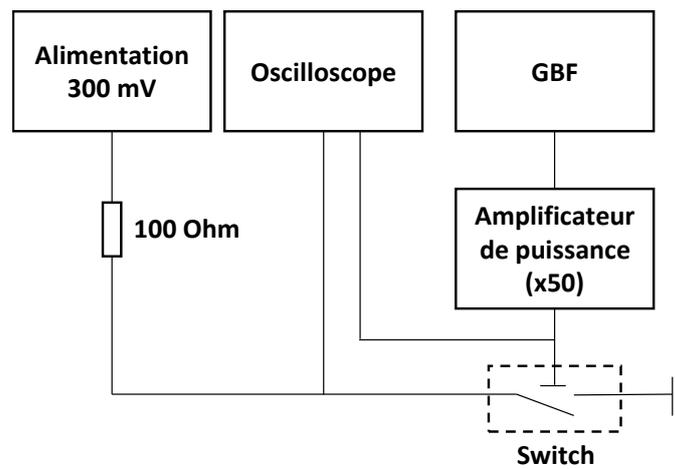
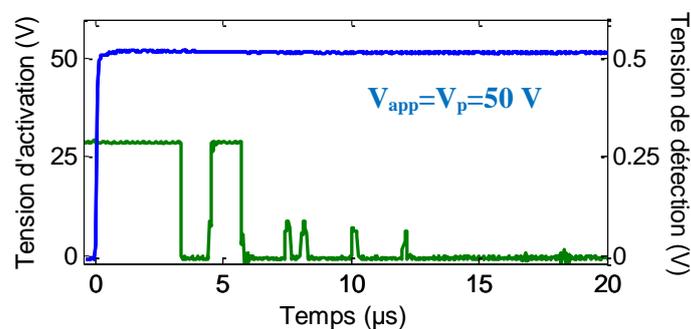


Figure 2-26 : Montage expérimental pour la mesure d'une tension aux bornes de commutateur en fonction du temps.

La figure 2-27 montre la réponse dynamique du commutateur pour des tensions appliquées de 50V (proche de V_p) et 70V. À noter que pour une tension appliquée égale à 50V, le composant réalise 5 rebonds et le temps de commutation est de 3,5 μ s. En augmentant cette tension jusqu'à 70V, le composant ne présente plus de rebonds.



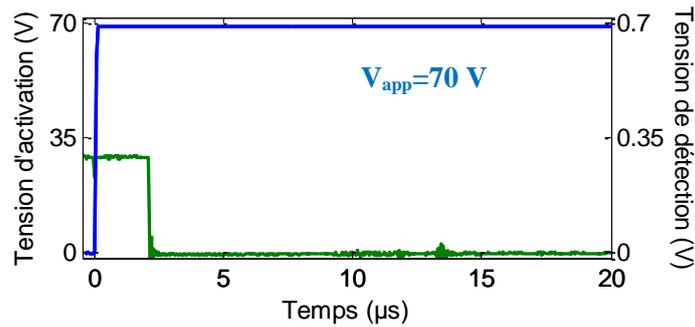


Figure 2-27 : Mesure de temps de commutation du MEMS pour différentes tensions d'activation.

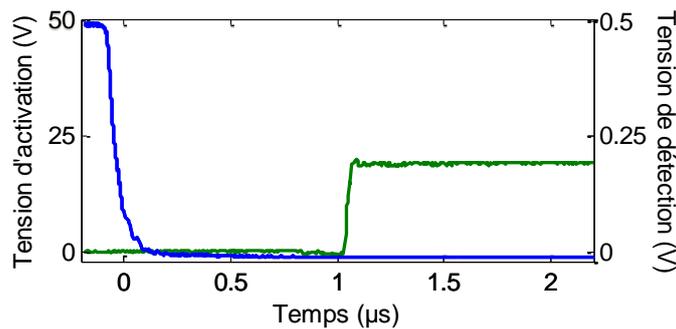


Figure 2-28 : Temps de relâchement de la poutre pour revenir à son état initial.

Les mesures ont également permis d'obtenir un temps de commutation de $2,1 \mu\text{s}$ ($< 100 \text{ ns}$ entre 10 et 90 %) et un temps de relâchement de $1 \mu\text{s}$ ($< 100 \text{ ns}$ entre 10 et 90 %).

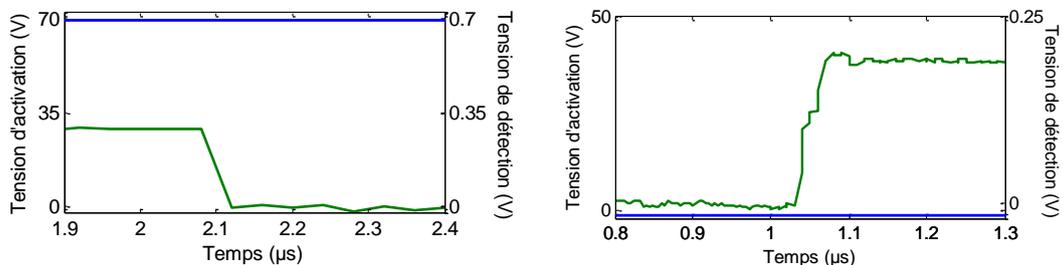


Figure 2-29 : Zoom sur les fronts montants de temps de commutation à gauche et temps de relâchement à droite à $V=70\text{V}$.

2.6.3 Linéarité

Les mesures d'IP1 sont réalisées à l'aide du montage présenté en figure 2-30. Le signal fourni par le générateur est amplifié (zone linéaire de l'amplificateur), transite par le MEMS puis est mesuré par un analyseur de spectre après avoir été atténué. L'IP1 est atteint lorsqu'une compression d'1dB en sortie du dispositif est observée au fur et à mesure que la puissance d'entrée augmente.

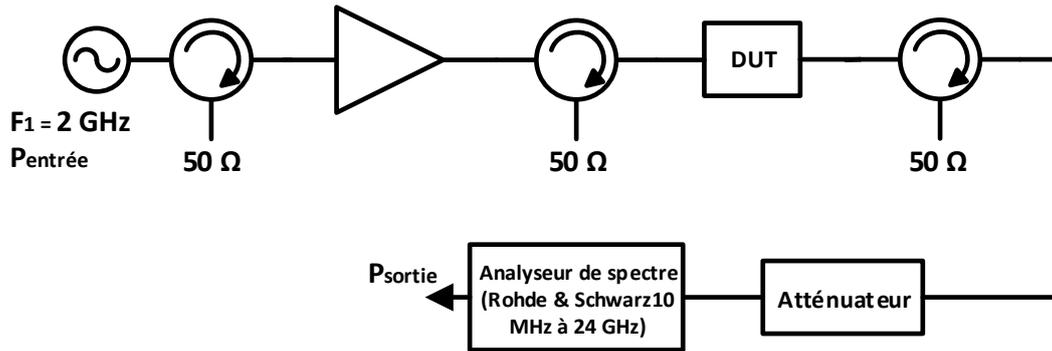


Figure 2-30 : Montage utilisé pour mesurer la linéarité IP1 du composant.

La figure 2-31-a et figure 2-31-b montrent la puissance à la sortie de commutateur non activé et activé (état haut) à 2 GHz respectivement. Les résultats montrent une très bonne linéarité du commutateur jusqu'à 2 GHz, le point de compression à 1 dB n'ayant pas été atteint jusqu'à 10W.

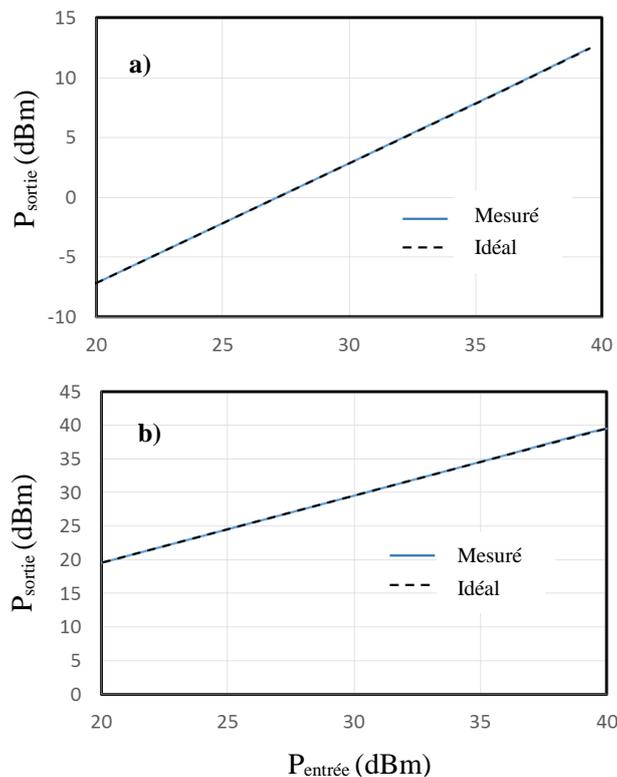


Figure 2-31 : Comparaison entre la mesure et la réponse idéale du point de compression 1 dB du commutateur à 2 GHz, a) non activé, b) activé.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une introduction générale sur le fonctionnement d'un commutateur MEMS-RF. Ensuite, une optimisation de la robustesse du commutateur a été faite pour parvenir à de faibles pertes d'insertion jusqu'à 10 GHz ($R_{on} \sim 1,5 \Omega$) grâce à une très bonne force de contact de 1,34 mN et une force de rappel supérieure à 0,5 mN pour une tension appliquée de 70V. Également, une compensation des effets thermique et des contraintes a été étudiée et montre que le commutateur a une faible sensibilité aux contraintes résiduelles mais reste néanmoins sensible aux gradients de contraintes qui se sont avérés relativement maîtrisables durant la fabrication. Une étude sur les formes des ancrages a montré que nous pouvons réduire 3 fois la contrainte présentée lors de l'actionnement du commutateur (Von Mises stresses) permettant ainsi d'améliorer le fluage mécanique du composant.

Nous avons vu aussi une étude sur le rebond lors de la fermeture du commutateur et qu'on peut éviter ce phénomène en créant un stoppeur plus haut que le dimple de contact. Le procédé de fabrication, les mesures des performances du commutateur tels que la caractérisation RF, le temps d'activation et la mesure de la linéarité ont été présentés dans ce chapitre.

Enfin, l'objectif de ce chapitre était d'étudier la robustesse en optimisant les performances mécaniques, thermiques et électriques du commutateur qui devront faciliter les étapes d'encapsulation et permettront d'avoir un commutateur fiable et qui peut supporter un procédé de fabrication d'une encapsulation basse et haute température.

Publications relative au travail mené dans ce chapitre :

Dépôt d'un brevet intitulé « Study Microelectromechanical Switch, WO/2016/062956 ».

R. Stefanini, **A.H Zahr**, L.Y Zhang, C. Dorion, P. Blondy « An MEMS-RF Switch for Defense and Space Applications » MEMSWAVE 2014.

Chapitre 3 : Étude d'une encapsulation par film mince métallique

3.1 Introduction

Le packaging des MEMS-RF est un sujet de recherche qui a été étudié de manière intensive ces dernières années. En effet, la fiabilité des composants micromécaniques est directement dépendante de l'humidité et des poussières avoisinant la structure. C'est pourquoi la recherche d'un package parfaitement hermétique à faible coût, sans influence sur les performances RF reste d'actualité, même si un grand nombre de publications et de solutions ont été présentées auparavant.

Dans ce chapitre, nous allons étudier une encapsulation par un film mince métallique. Cette méthode vise à garantir un coût de fabrication relativement faible tout en permettant une bonne herméticité et une forte intégration du dispositif.

Tout d'abord, la première partie de ce chapitre présentera le principe de réalisation du capot métallique, son influence sur les performances RF du commutateur. La conception et les dimensions du film métallique sont optimisées afin d'obtenir de faibles parasites RF sur les pertes d'insertion et l'isolation du commutateur. Ensuite, les dimensions du capot sont optimisées pour limiter l'impact de contraintes mécaniques et thermiques rencontrées par le capot. Également, l'impact du scellement par couche mince est abordé.

Enfin, nous présenterons le procédé de fabrication de cette encapsulation, ainsi que la caractérisation RF du composant.

3.2 Principe de l'encapsulation métallique

Un commutateur MEMS-RF est généralement représenté par une capacité C_{MEMS} à l'état haut et une résistance R_{on} à l'état bas. En réalité, le schéma électrique équivalent est rigoureusement plus complexe. La figure ci-dessous représente une vue en coupe et le modèle électrique équivalent du commutateur MEMS-RF ohmique présenté dans le chapitre 2.

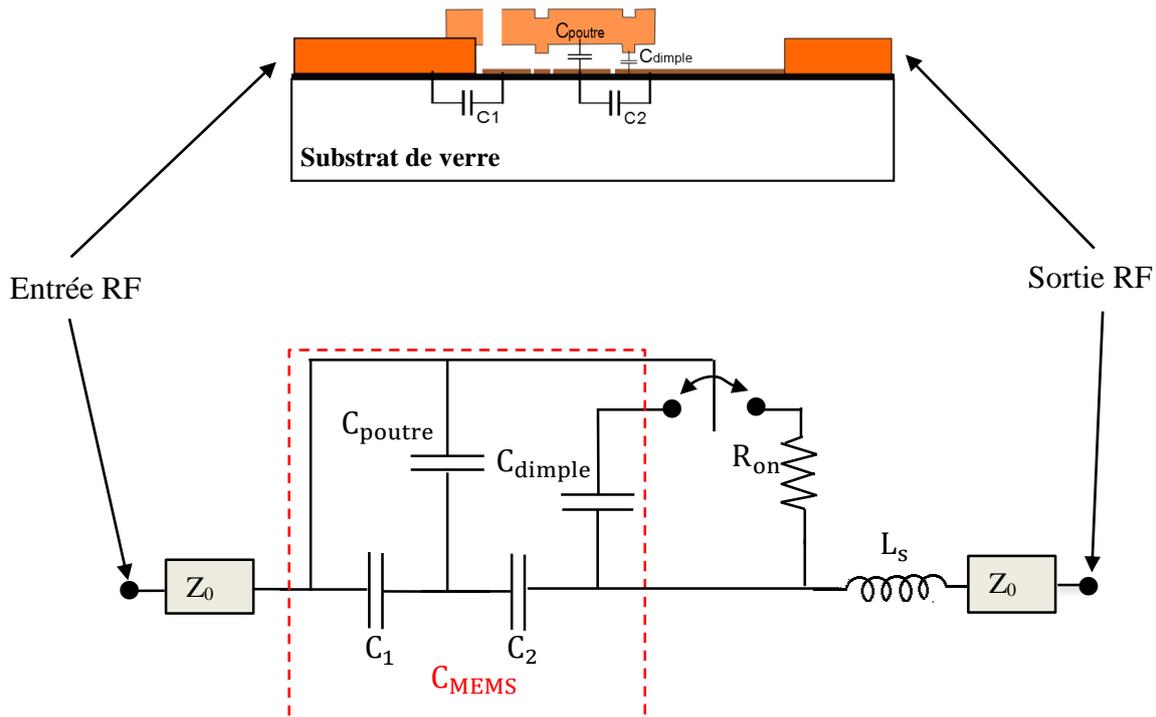


Figure 3-1 : Vue en coupe et schéma électrique équivalent du commutateur MEMS-RF non encapsulé.

La capacité C_{MEMS} représente alors la capacité équivalente des capacités matérialisant les interactions électriques entre la poutre métallique, l'électrode d'activation et la zone de contact. Elle est alors donnée par l'équation suivante,

$$C_{MEMS} = \frac{(C_1 + C_{poutre}) \cdot C_2}{(C_1 + C_{poutre}) + C_2} + C_{dimple} \quad (3-1)$$

Avec « C_{dimple} » la capacité entre le dimple et la ligne RF, « C_{poutre} » la capacité d'actionnement et « C_1, C_2 » les capacités parasites dans le substrat. « C_1 » étant négligeable devant « C_{poutre} », d'après l'équation (3-1), « C_{MEMS} » sera forcément dépendante de « C_2 » et « C_{dimple} ». L'ajout d'un capot métallique servant de structure mécanique à l'encapsulation introduit alors deux capacités sur le commutateur : une capacité « C_{capot} » entre le capot métallique et la poutre mobile et une capacité de transition « $C_{transition}$ » entre le capot et la ligne de sortie RF.

La figure 3-2 représente une vue en coupe du principe de cette encapsulation métallique, ainsi son schéma électrique équivalent.

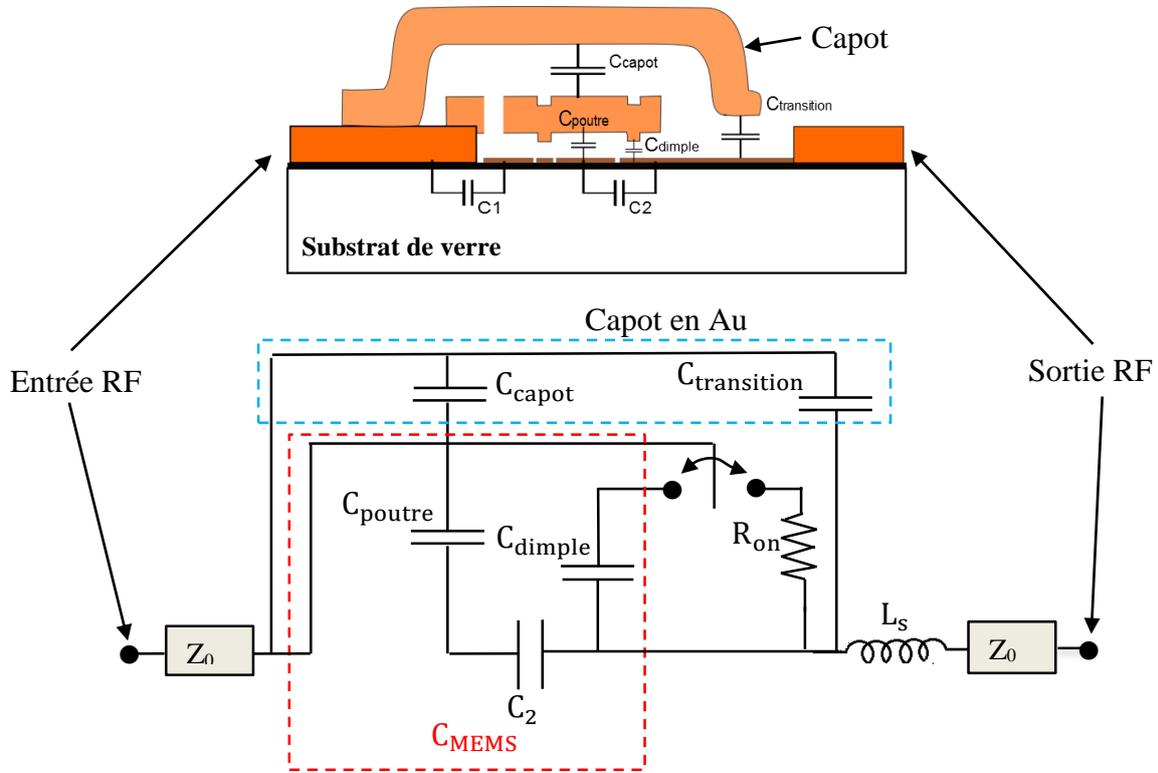


Figure 3-2 : Vue en coupe et schéma équivalent du commutateur encapsulé.

De ce fait, la capacité globale du MEMS s'écrit de la manière suivante,

$$C_{globale} = \frac{C_{mems} \cdot C_{capot}}{C_{mems} + C_{capot}} + C_{transition} \quad (3-2)$$

Or C_{mems} étant très faible devant C_{capot} , la capacité globale peut être approximé par l'équation suivante,

$$C_{globale} = C_{mems} + C_{transition} \quad (3-3)$$

Ainsi, la capacité de transition vient s'ajouter à la capacité du MEMS provoquant une diminution sur l'isolation du commutateur à son état bloqué.

3.3 Présentation du capot à réaliser

Le design du capot métallique développé dans ce travail de thèse est représenté par la figure 3-3. Il possède une épaisseur de $7\ \mu\text{m}$ et est séparé d'une distance de $3\ \mu\text{m}$ avec la poutre mobile. L'épaisseur du capot a volontairement été choisie plus de deux fois le gap de séparation avec la poutre pour permettre un recouvrement optimal des marches créés lors de l'empilement des différentes couches. La structure présente sept points d'ancrage sur le substrat et sept ouvertures pour la libération des couches sacrificielles. Pour limiter la capacité de transition, la hauteur du gap entre la poutre mobile et le capot métallique fait $3\ \mu\text{m}$, dimension facilement réalisable en fabrication. Cette hauteur va jouer un rôle primordial sur les performances du commutateur encapsulé puisque la capacité de transition sera inversement proportionnelle à cette valeur. Les trous de libération seront ensuite scellés à l'aide d'un diélectrique afin de garantir l'herméticité tout en maintenant les performances RF.

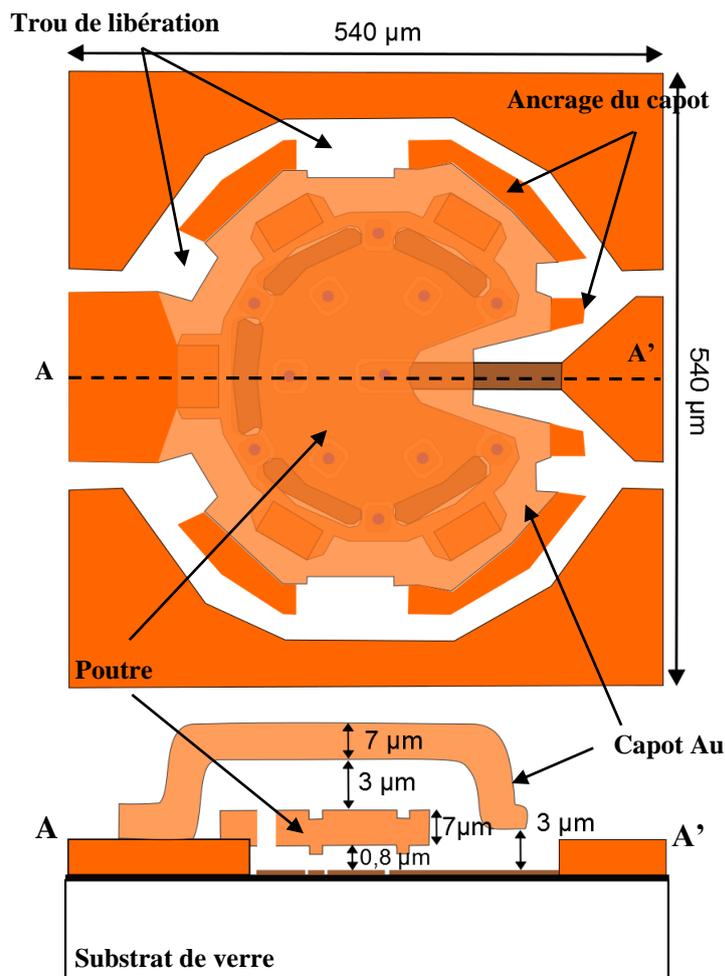


Figure 3-3 : Vue de dessus et en coupe du micro-commutateur MEMS-RF encapsulé.

Les simulations des paramètres S du commutateur encapsulé (avec capot métallique seulement) et non encapsulé à son état bloqué et passant ont été réalisées à l'aide du logiciel ADS-Momentum et sont présentées en figure ci-dessous.

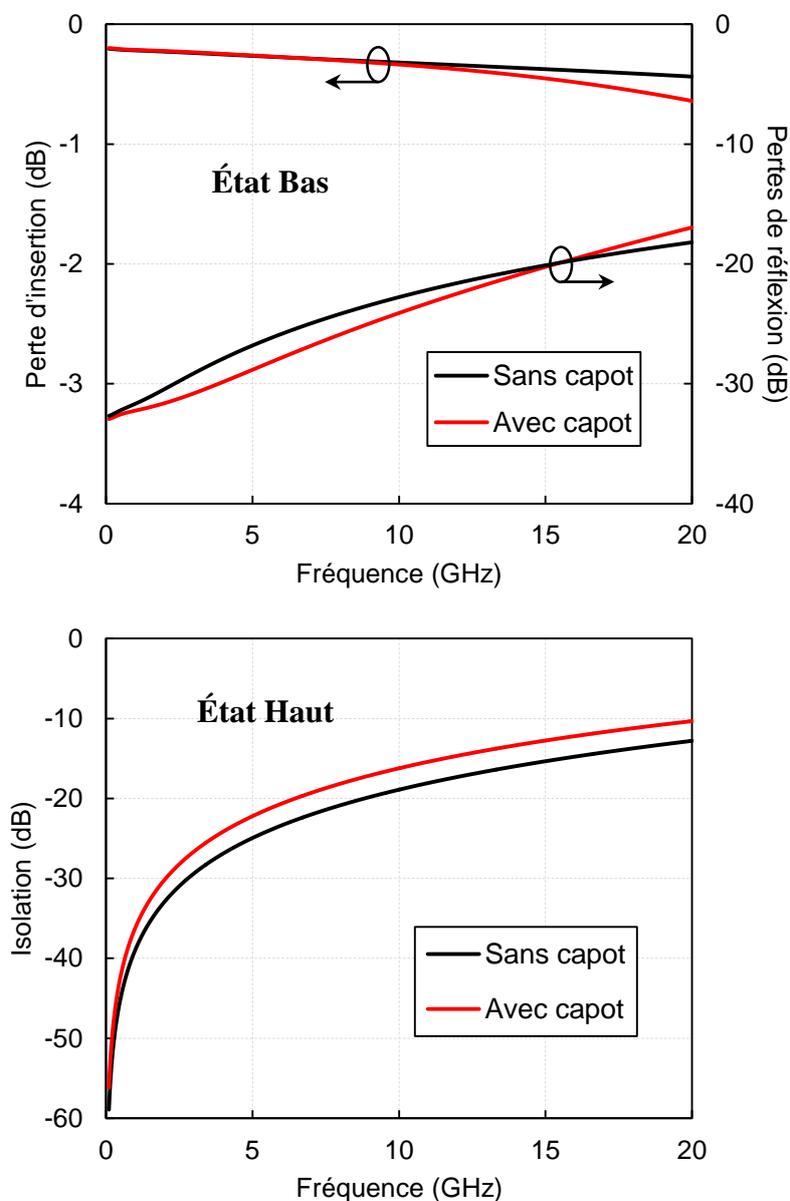


Figure 3-4 : Paramètres [S] simulés à l'état bas et haut du micro-commutateur encapsulé et non encapsulé.

Une comparaison entre les simulations 2,5D Momentum et ADS en éléments localisés ont permis d'extraire les grandeurs du modèle équivalent (tableau 3-1).

Tableau 3-1 : Extraction des paramètres de modèle du commutateur encapsulé.

Paramètres simulés	
$L_{\text{série}}$ (nH)	0,14
R_{on} (Ω)	2
C_1, C_2 (fF)	10 ; 6
C_{dimple} (fF)	10
C_{poutre} (fF)	276
C_{MEMS} (fF)	17
$C_{\text{transition}}$ (fF)	6,7
C_{globale} (fF)	23,7

Les résultats de simulations, permettent de prédire l'impact direct du capot sur les performances du commutateur sur une bande de fréquence allant du DC à 20 GHz. Ils montrent que le capot métallique réduit l'isolation du commutateur à son état bloqué de 2,4 dB à 20 GHz ce qui correspond à une capacité parasite de 6,7 fF.

À l'état passant, l'impact du capot métallique est négligeable. Notons tout de même que les pertes d'insertion sont très légèrement supérieures au-delà de 12 GHz lorsque le composant est encapsulé puisqu'ils atteignent 0,6 dB à 20 GHz contre 0,4 dB dans le cas d'un MEMS non encapsulé.

3.4 Analyse mécanique de l'encapsulation film mince

Nous avons vu dans le chapitre 2, que les contraintes mécaniques et la variation de la température sont importantes et doivent être prise en compte au niveau du design des commutateurs MEMS-RF. Pour concevoir un capot en couche mince, il est primordial d'étudier l'effet de la pression externe, les contraintes et l'effet de la température sur cette couche mince. Pour cela, nous allons présenter, une étude mécanique et thermique du capot scellé et non scellé pour étudier l'impact de la couche de scellement sur le capot. Deux différents matériaux diélectriques seront étudiés pour sceller le capot : le nitrure de silicium et le dioxyde de silicium.

3.4.1 Influence des contraintes sur le capot métallique

Dans cette partie, les effets de contraintes de fabrication sur le capot métallique ont été étudiés. Pour cela, des simulations mécaniques ont été effectuées pour évaluer l'influence de contraintes résiduelles sur la plage ± 300 MPa et des gradients de contraintes à ± 6 MPa/ μm . La figure 3-5 montre le profil de déflexion du capot pour une contrainte résiduelle de 300 MPa en tension. La déflexion maximale est observée au centre de la structure. La contrainte résiduelle du capot est ensuite diminuée jusqu'au -300 MPa. La vue en coupe AA' du capot montre qu'une variation de contraintes résiduelles entre -300 et +300 MPa engendre une déflexion maximale comprise entre ± 1 μm (figure 3-6). Cette valeur est 3 fois inférieure au gap séparant le MEMS du capot.

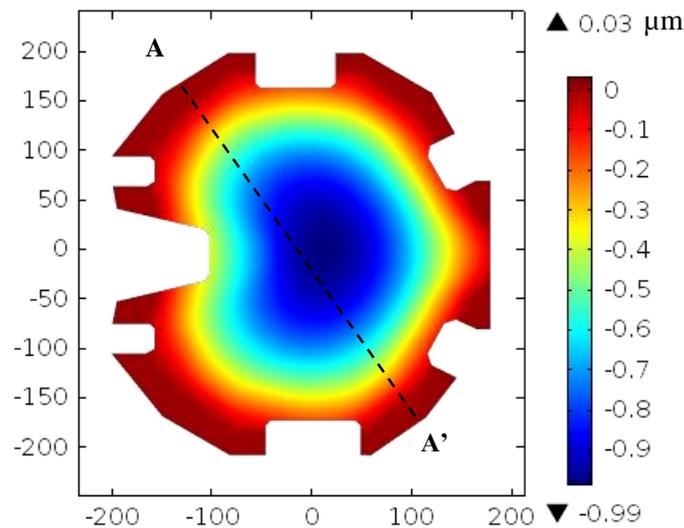


Figure 3-5 : Déflexion (en μm) du capot pour une contrainte résiduelle de 300 MPa en tension.

La figure 3-7 montre une simulation de gradient de contraintes (pour $\sigma_{\text{res}} = 0$ MPa) qui peut être également présente dans les couches lors du dépôt. Il en résulte une déflexion maximale de $\pm 0,15$ μm sur une plage de valeurs de $\Delta\sigma$ de ± 6 MPa/ μm . A noter que ces valeurs de gradient de contraintes sont facilement atteignables pour une épaisseur de 7 μm d'or.

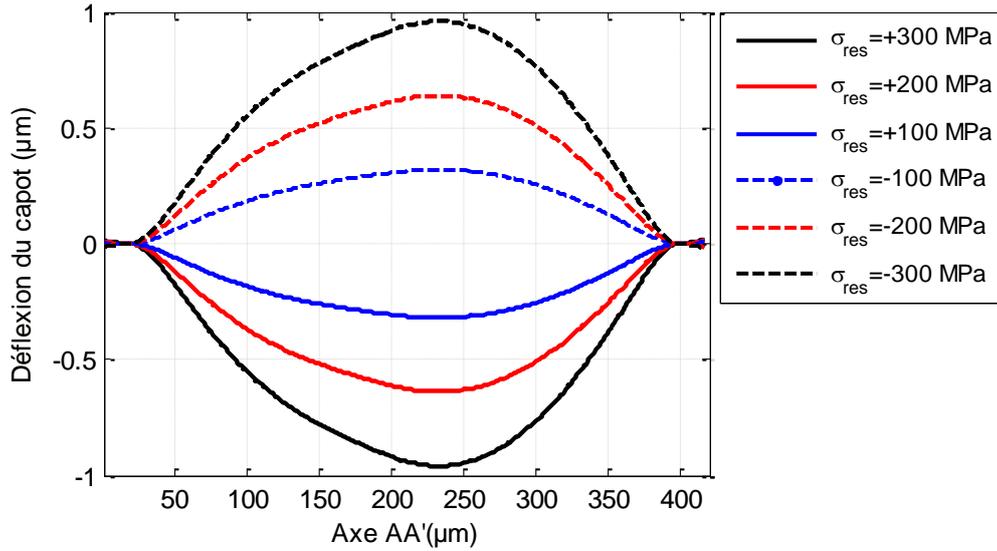


Figure 3-6 : Déflexion du capot en fonction de contraintes résiduelles suivant l'axe AA'.

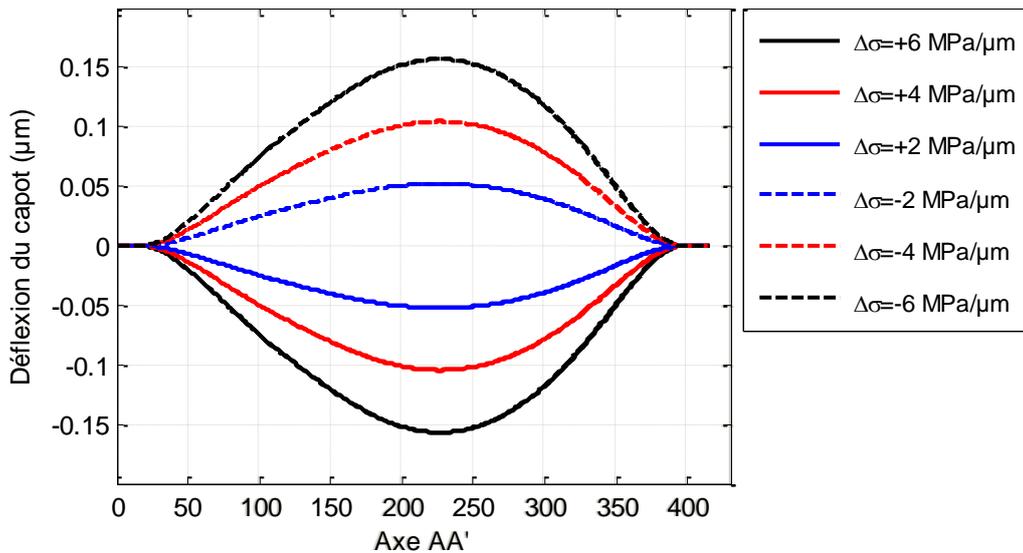


Figure 3-7 : Déflexion du capot en fonction de gradient de contraintes suivant l'axe AA'.

Ainsi, le capot est légèrement plus sensible aux contraintes résiduelles qu'aux gradients de contraintes. Les déflexions observées n'auront pas pour conséquence un contact avec la poutre puisque le gap les séparant est de 3 μm.

3.4.2 Choix du matériau du scellement

Après le dépôt de la couche métallique électrolysée qui forme le capot, il est nécessaire de refermer les trous qui servent à libérer les couches sacrificielles par un diélectrique pour permettre au composant de fonctionner dans une atmosphère dépourvue d'humidité. Le choix s'est orienté vers des matériaux usuels et disponibles au laboratoire XLIM à savoir du nitrure de silicium (SiN), du dioxyde de silicium (SiO₂) et déposés par PECVD (caractéristiques thermomécaniques des matériaux données dans le tableau 3-2). Dans cette partie, les contraintes résiduelles supplémentaires amenée par cette couche de scellement, et la différence de coefficient de dilatation thermique « $\Delta\alpha$ » entre cette couche et le capot sont présentés. La figure 3-8 montre le principe du capot scellé.

Tableau 3-2 : Caractéristiques des diélectriques utilisées dans la simulation pour sceller le capot.

Paramètres	SiN	SiO ₂
Module de Young (GPa)	180	70
Densité (Kg/m ³)	2500	2200
Coefficient de Poisson	0,23	0,17
CTE (1/K)	3 ^e -6	0,5 ^e -6
Conductivité thermique (W/m.K)	3	1,4

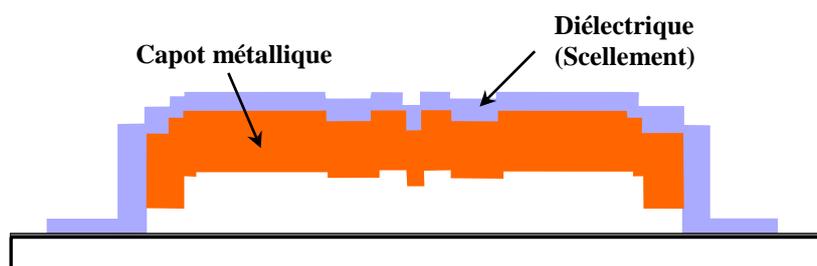


Figure 3-8 : Vue en coupe du principe de scellement du capot.

3.4.2.1 Effet d'une pression externe

Après l'étape du scellement, il est important de voir l'impact d'une pression externe sur la déflexion du capot, car cela nous permet de bien connaître la pression maximale externe et qui

permet d'éviter cette pression afin de ne pas détruire le commutateur en touchant avec son capot. La figure 3-9 montre la déflexion du centre du capot qui a été soumis à différentes pressions externes.

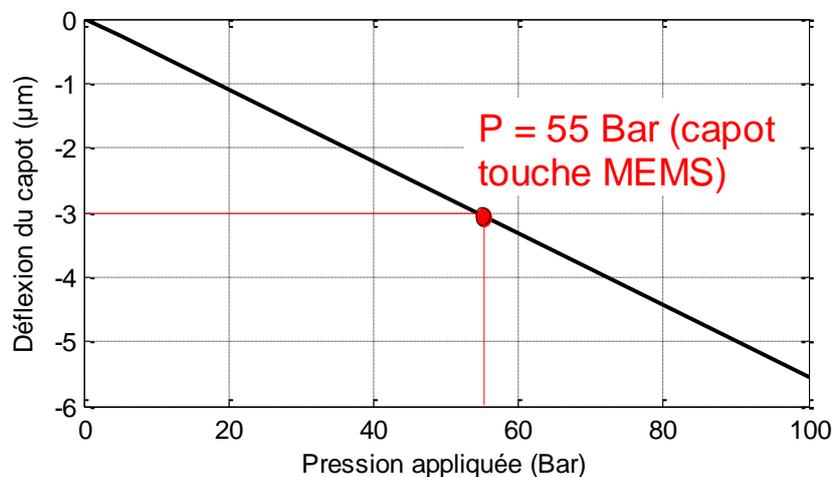


Figure 3-9 : Déflexion du centre du capot en fonction de différentes pressions appliquées par-dessus.

A noter que pour des valeurs de pressions supérieures à 55 Bar, le capot entrera en contact avec le MEMS pour une épaisseur de la couche sacrificielle utilisée est de 3 µm.

3.4.2.2 Influence de contraintes résiduelles du scellement

La déflexion du capot scellé en fonction de contraintes résiduelles a été simulée pour les 2 matériaux disponibles. Pour cela, les paramètres du tableau 3-2 ont été incorporés dans le logiciel, une contrainte résiduelle de -300 MPa (cas défavorable) a été appliquée de manière arbitraire au capot en or et la contrainte résiduelle du diélectrique a été variée entre -500 à +500 MPa. À noter que les paramètres de dépôt des diélectriques sont de base optimisés par le constructeur pour obtenir de contraintes résiduelles nulles sur un substrat de silicium. La couche diélectrique du scellement est de 3 µm, épaisseur minimale nécessaire pour assurer la fermeture des trous de libération. Les résultats de simulations sont présentés par la figure 3-10. Il en résulte une variation de la déflexion maximale comprise entre 0,5 et -0,25 µm pour SiN et 0,8 et -0,4 µm pour SiO₂. Les simulations montrent que le capot une fois scellé devrait être suffisamment espacé de la membrane du composant dans le cas le plus défavorable. À noter qu'un scellement SiN est plus stable mécaniquement.

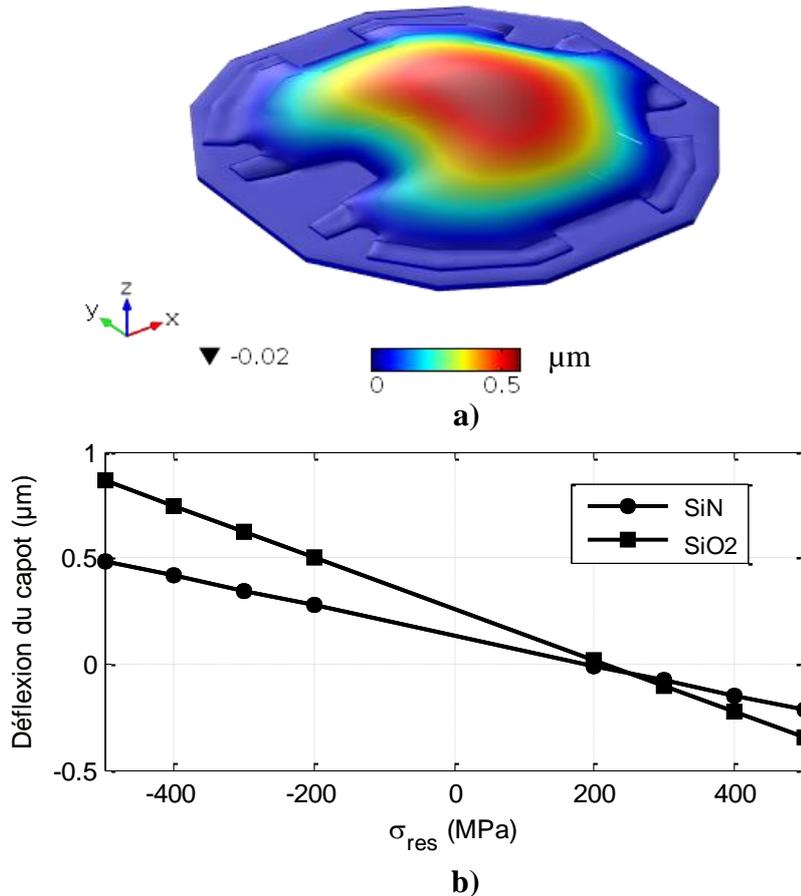


Figure 3-10 : Déflexion pour -300 MPa de contraintes résiduelles dans l'or avec un scellement de 3 µm a) Vue en 3D et b) centre du capot.

3.4.3 Influence de la température

En fonctionnement, le composant pourra être soumis à des températures de la gamme -85°C à +150°C. Durant cette phase, le multicouche métal-diélectrique constituant l'encapsulation devra également assurer une certaine stabilité de manière à ne pas venir en contact avec la membrane. Les figures ci-dessous montrent la déflexion du capot scellé en fonction de la température à -85°C et +150°C. Pour une contrainte résiduelle de -150 MPa dans l'or et de -500 MPa dans le diélectrique. Les simulations montrent que la déflexion maximale du multicouche devrait varier entre 0,25 µm et 0,65 µm dans le cas défavorable et conserve un gap suffisant pour ne pas perturber le comportement mécanique de la membrane MEMS.

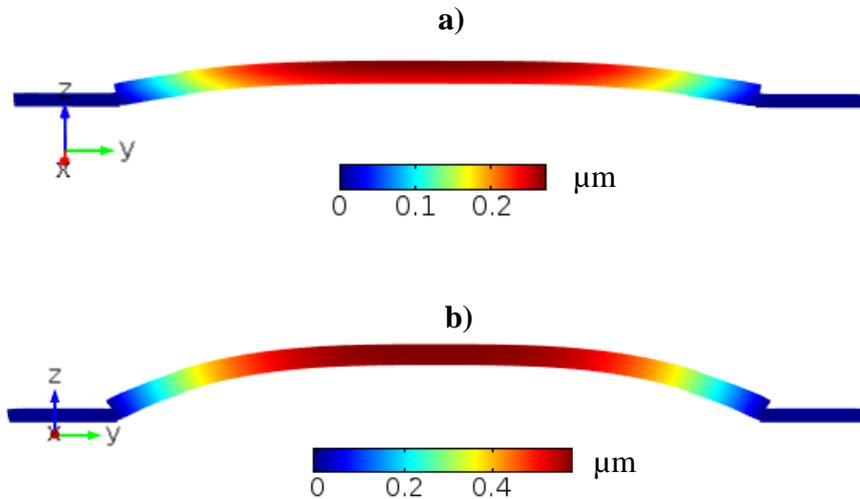


Figure 3-11 : Déflexion du capot scellé par 3 µm en SiN sous une température $T=150^{\circ}\text{C}$ et a) $\sigma_{res}= 0$ MPa, b) $\sigma_{res}= -150$ MPa dans l'Or et $\sigma_{res}= -500$ MPa dans la couche diélectrique.

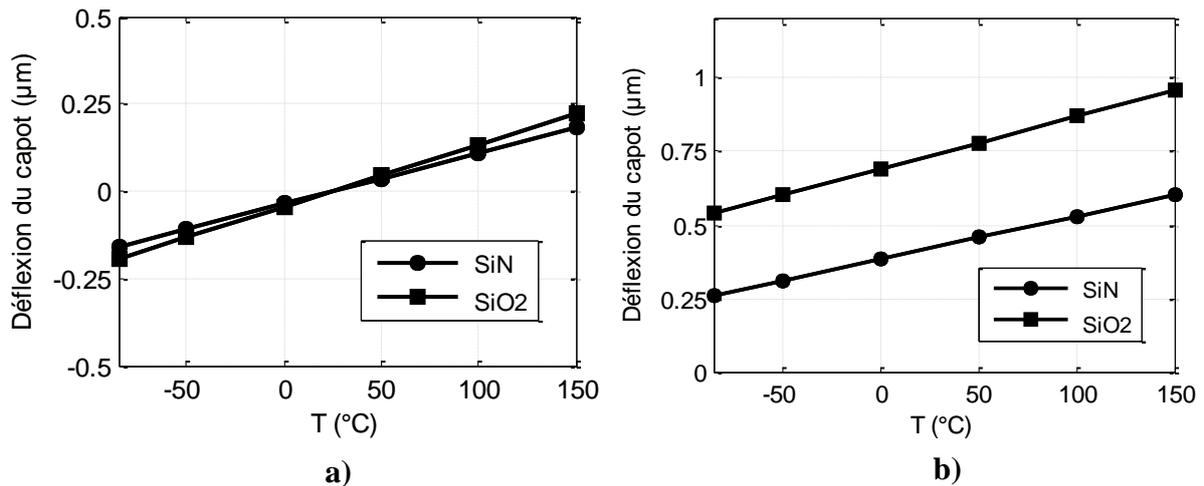


Figure 3-12 : Déflexion au centre du capot scellé en fonction de la température en présence de a) $\sigma_{res}=0$ MPa, b) $\sigma_{res}= -150$ MPa dans l'Or et $\sigma_{res}= -500$ MPa dans la couche diélectrique.

L'étude comparative montre que le SiN semble le meilleur candidat pour sceller le capot. De plus c'est un matériau connu en microélectronique pour sa stabilité aux attaques chimiques [74] et déjà utilisé dans le domaine des MEMS pour la réalisation de scellement hermétique [33], [34]. Le SiN sera donc le choix pour la réalisation du composant comme matériaux de scellement.

3.4.4 Influence du SiN sur les performances RF

Pour étudier l'impact du SiN sur le commutateur encapsulé, des simulations des paramètres S à son état bloqué et passant ont été réalisées à l'aide du logiciel Ansoft HFSS et sont présentées par la figure ci-dessous.

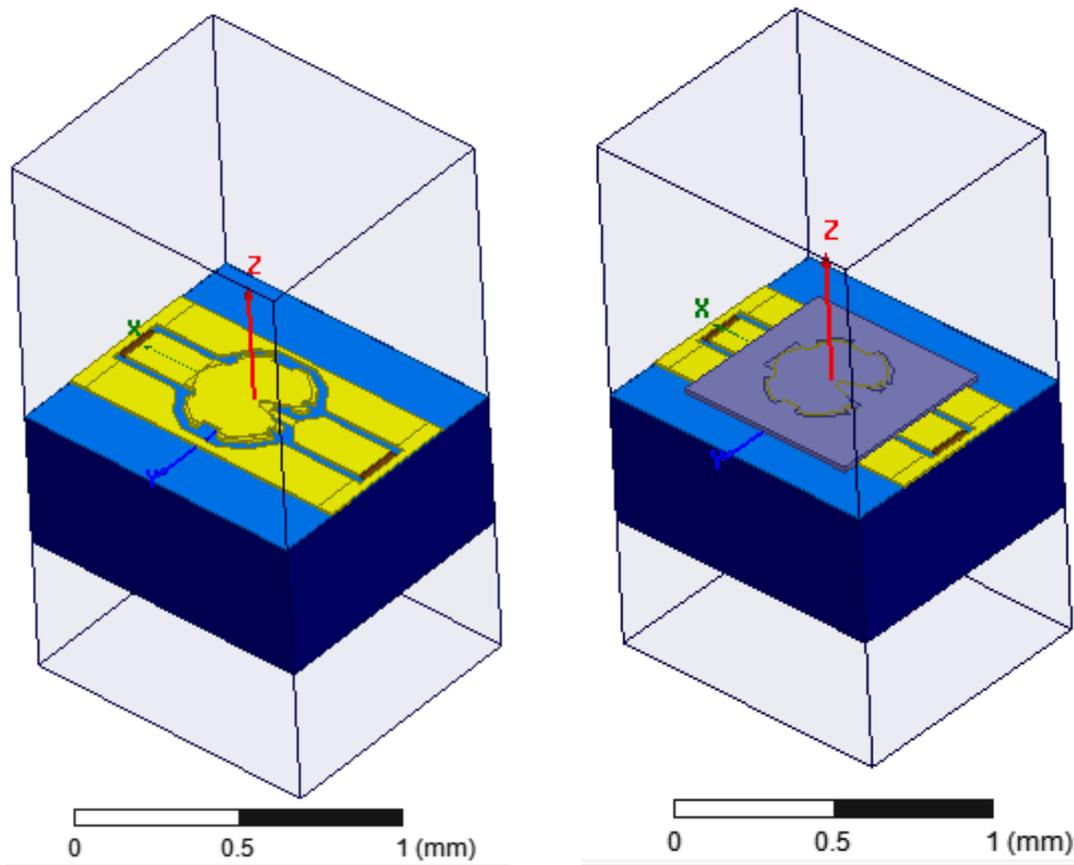


Figure 3-13 : Structure sous HFSS du MEMS encapsulé (à gauche) et scellé par SiN (à droite).

Les simulations sont faites pour une bande de fréquence allant de DC à 20 GHz. Elles montrent que le SiN réduit l'isolation du commutateur à son état bloqué de 1,6 dB à 20 GHz ce qui correspond à une capacité parasite de 6 fF. Les pertes d'insertion sont très légèrement différentes au-delà de 10 GHz puisque le composant scellé atteint 0,5 dB à 20 GHz contre 0,4 dB dans le cas d'un MEMS non scellé. Par contre les pertes de réflexion sont meilleures de 7 dB par rapport à celle sans SiN.

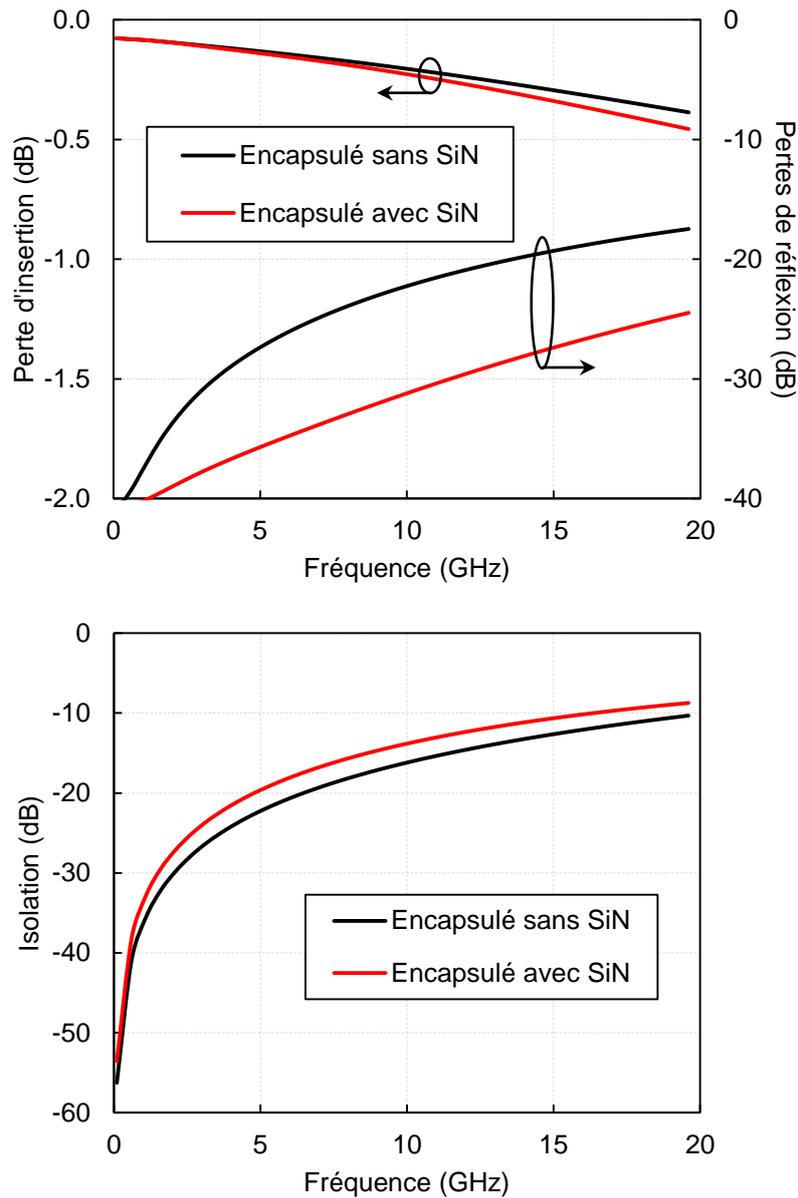


Figure 3-14 : Paramètres [S] simulés à l'état bas et haut du micro-commutateur scellé et non scellé.

3.5 Réalisation et caractérisation RF

Le procédé de fabrication du MEMS-RF reprend le même que le procédé de fabrication présenté dans le chapitre 2 pour la fabrication du composant MEMS. Une fois réalisé, une couche sacrificielle est déposée sur la poutre puis un métal (Or dans ce cas, mais un métal moins cher peut être utilisé) est déposé, électrolysé et gravé pour former le capot métallique. Après, la structure est libéré grâce aux ouvertures latérales et le capot est scellé par le SiN.

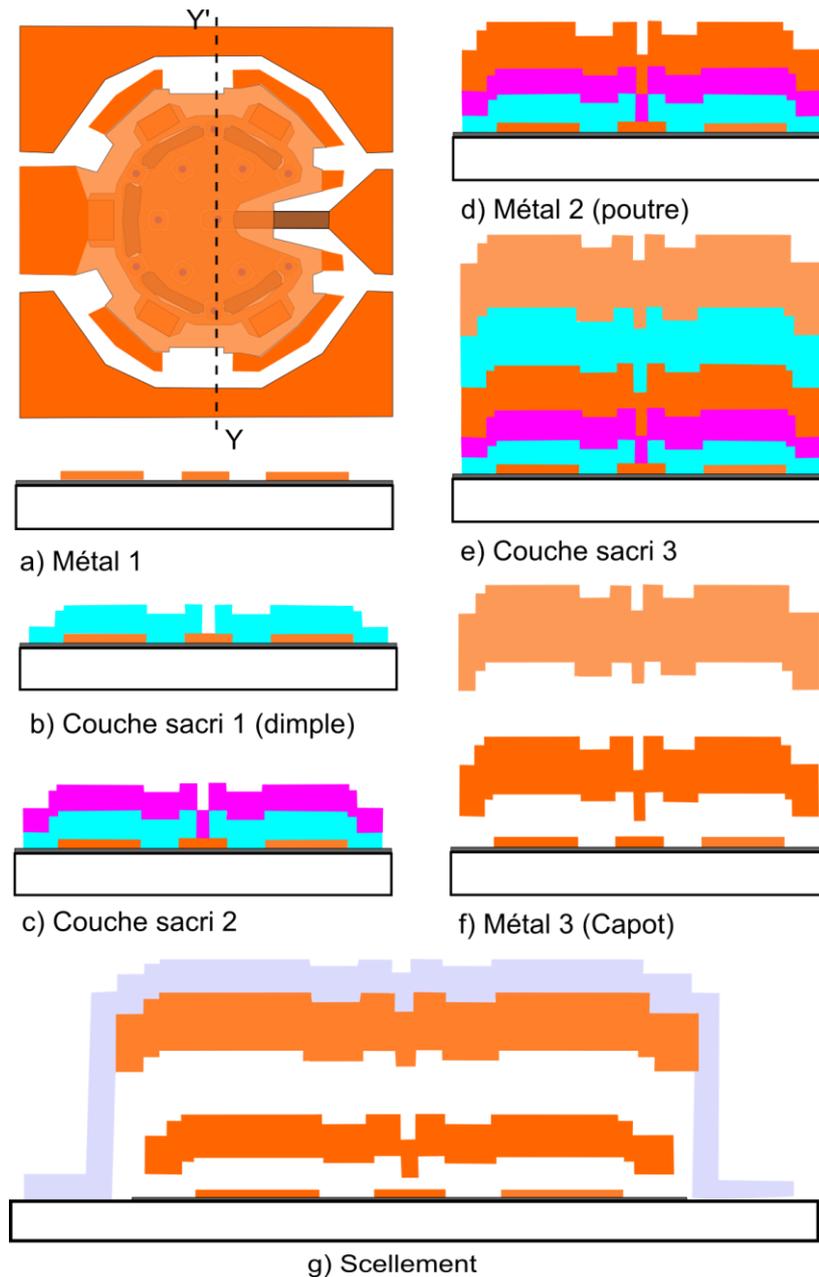


Figure 3-15 : Vue en coupe YY' du procédé de fabrication du commutateur encapsulé.

Le composant a été délibérément fabriqué sur un substrat de verre de manière à réduire les capacités parasites du substrat et extraire plus facilement la capacité de transition entre le capot et le MEMS. Une photo MEB du micro-commutateur non-encapsulé et encapsulé est présentée par les figure 3-16 et 3-17.

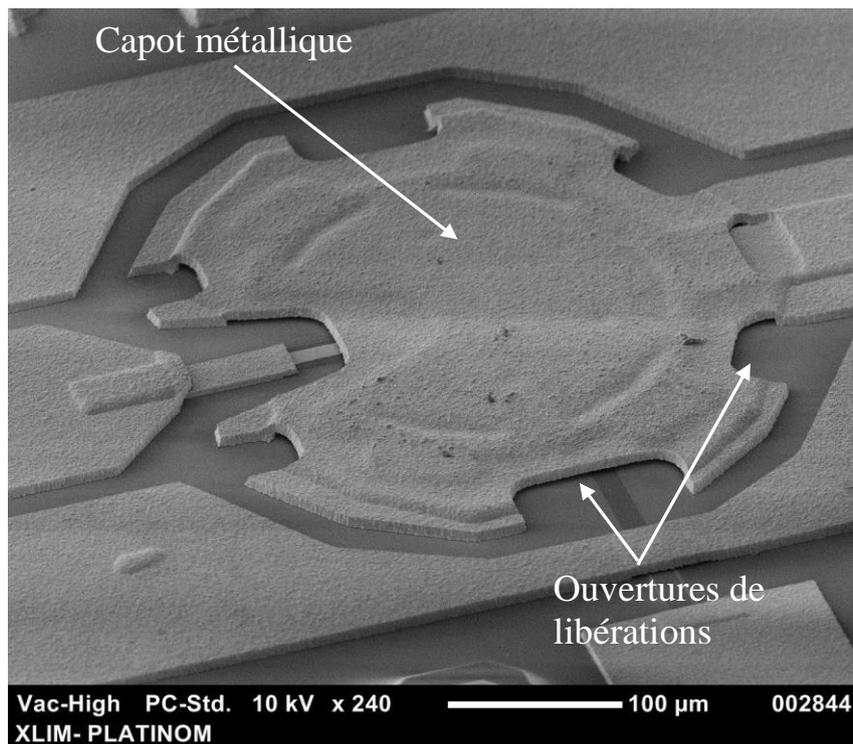
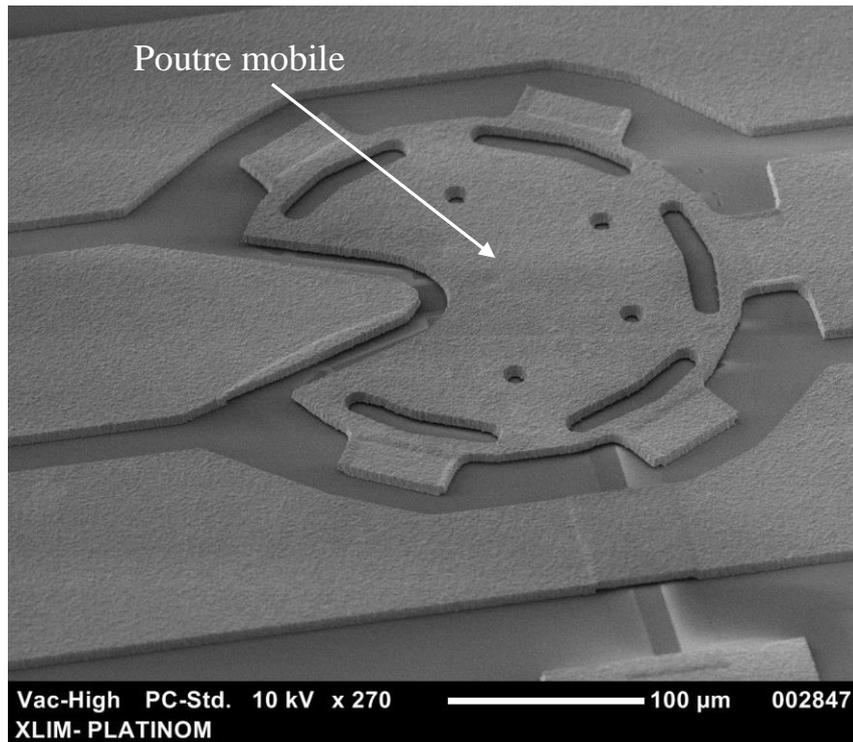


Figure 3-16 : Photo MEB du commutateur sans et avec son capot métallique avant scellement.

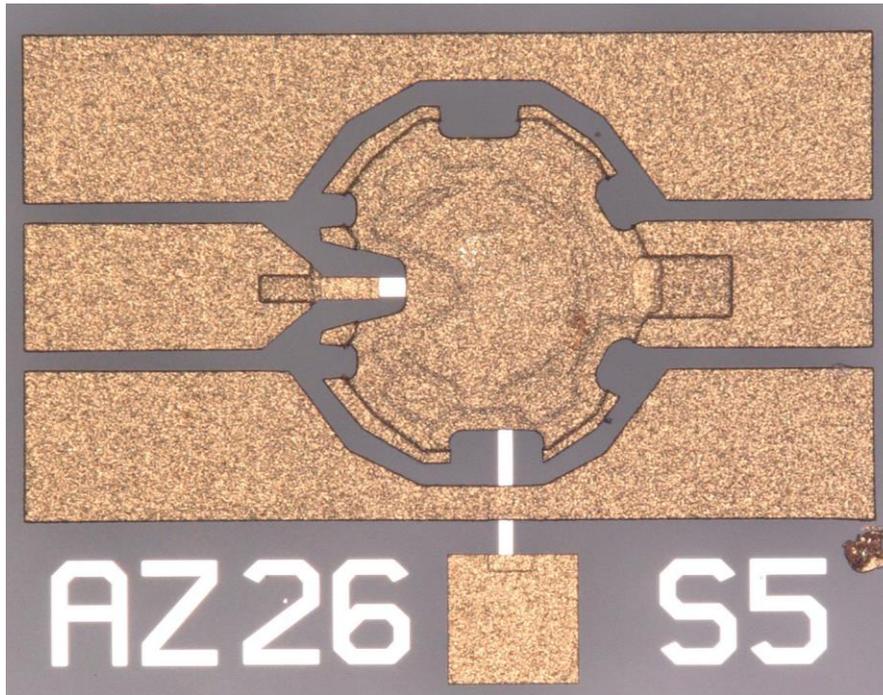
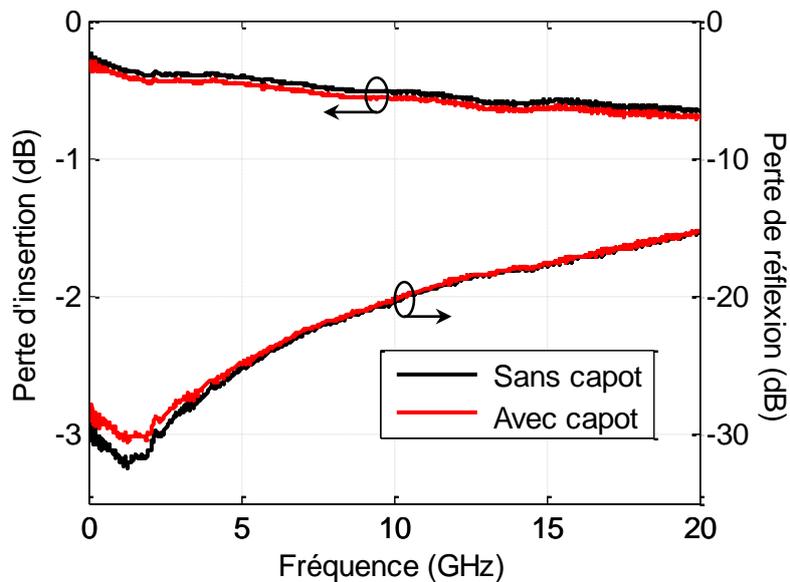


Figure 3-17 : Micro photo du commutateur et de son capot.

Les mesures des paramètres [S] sont réalisées à l'aide d'une station sous pointes et d'un analyseur de réseau vectoriel ZVA Rohde & Schwarz 10 MHz à 24 GHz. Une alimentation de 70V est utilisée pour activer le commutateur. La figure 3-18 montre une comparaison des paramètres [S] mesurés à l'état passant et bloqué du commutateur avec capot et sans capot.



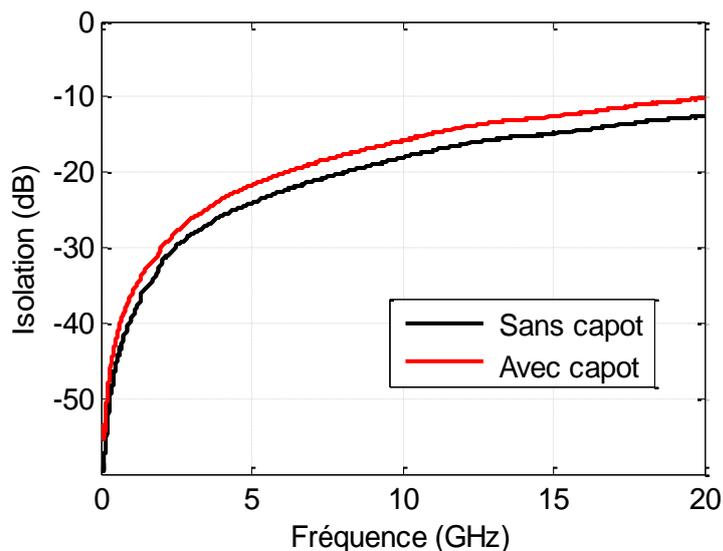


Figure 3-18 : Mesures des paramètres [S] à l'état bas et haut du micro-commutateur encapsulé et non encapsulé.

Il en résulte des pertes d'insertion inférieures à 0,7 dB et une isolation supérieure à 12 dB jusqu'à 20 GHz. Le capot métallique non scellé présente des faibles parasites sur la réponse du commutateur affectant l'isolation de 2,2 dB ce qui représente une capacité parasite de 6 fF et concorde avec les simulations.

Le capot a ensuite été scellé par une couche de SiN de 4 μm (Figure 3-20). Les résultats montrent que cette couche diélectrique présente de faibles parasites sur le commutateur affectant l'isolation de 1,7 dB seulement à 20 GHz. Les résultats concordent avec les simulations présentées précédemment.

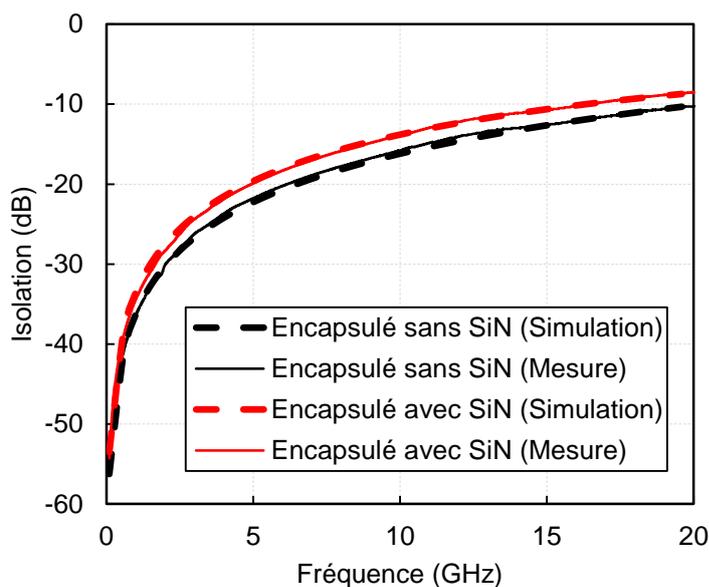


Figure 3-19 : Mesure d'isolation du commutateur encapsulé avant et après scellement.

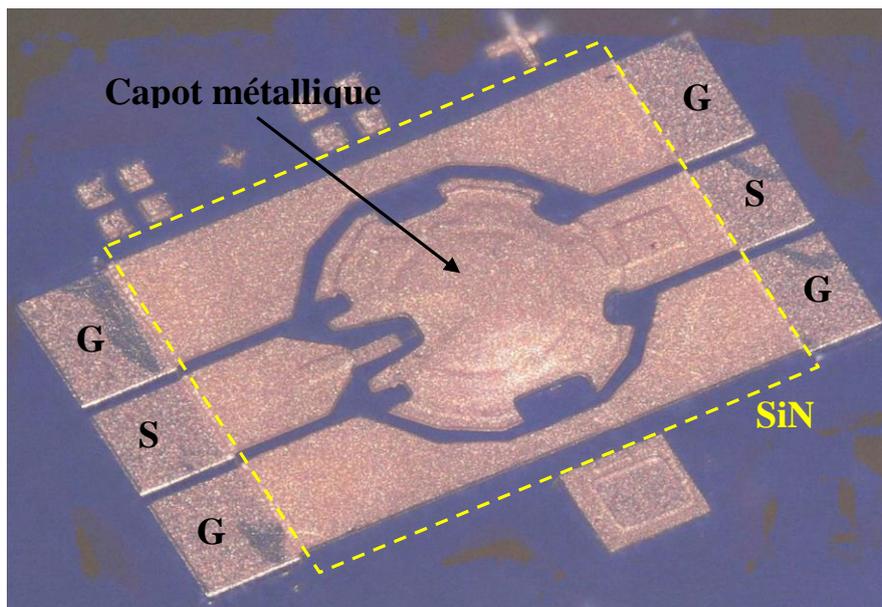


Figure 3-20 : Micro photo du commutateur encapsulé et scellé avec SiN.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception, l'optimisation, la fabrication et la caractérisation de la première solution d'encapsulation étudiée dans cette thèse « encapsulation par film mince ». Nous avons montré qu'une encapsulation par un film mince métallique peut être une solution intéressante pour protéger les MEMS-RF de manière hermétique. Cette encapsulation est simple de réalisation puisqu'elle fait partie intégrante du procédé de fabrication. De plus, elle est très compacte (puce du MEMS encapsulé de $0.9 \times 0.55 \text{ mm}^2$) ce qui offre une augmentation substantielle du nombre de composants par substrat et par conséquent une réduction importante des coûts de fabrication.

Nous avons montré en se basant sur des simulations mécaniques et thermiques qu'un capot de $7 \mu\text{m}$ d'épaisseur en Or associé à une couche de SiN de $4 \mu\text{m}$ d'épaisseur est très peu sensible aux contraintes internes et présente une très bonne tenue en température, ce qui facilite l'intégration du composant vers de multiples applications.

Enfin, une caractérisation RF a permis de montrer une faible influence du capot (2,2 dB) sur l'isolation du commutateur MEMS et concorde avec les résultats de simulations.

Publications relative au travail mené dans ce chapitre :

Abedel Halim Zahr, Ling Yan Zhang, Clément Dorion, Romain Stefanini, Pierre Blondy « A Low Parasitics Metal Thin Film Package for RF MEMS switches » MEMSWAVE-2014.

A.H Zahr, L.Y Zhang, C. Dorion, R. Stefanini, P. Blondy « Design, Simulation et Réalisation d'une encapsulation film-mince métallique pour MEMS-RF » JNM 2015.

Chapitre 4 : Étude d'une encapsulation par collage de tranche

4.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude d'encapsulation par collage de tranche dont le principe est présenté dans le chapitre 1. Cette technique permet d'obtenir des packages hermétiques, robustes et protège les commutateurs lors de la découpe des puces sur le substrat.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au verre fritté (glass frit) qui sera utilisé par la suite pour sceller nos capots. Le substrat micro-usiné qui forme les capots est en silicium, et sera ensuite reporté sur un substrat de verre ou de silicium contenant les MEMS-RF.

D'abord, nous allons étudier par des simulations électromagnétiques, l'influence du package sur les performances RF d'une ligne coplanaire adaptée 50Ω en optimisant ses dimensions. Après l'optimisation du package, nous présenterons son influence sur les performances du commutateur ohmique. Ensuite, des mesures de performances tels qu'un test de l'herméticité, la caractérisation RF et un test de fiabilité du commutateur encapsulé seront réalisés.

Une partie de ce chapitre est consacrée à présenter une conception et réalisation d'un commutateur encapsulé large bande (DC-30GHz) de type SPDT (Single Pole Double Throw) à MEMS-RF avec de très bonnes performances RF.

Enfin, une conception et réalisation d'une transition flip-chip sera étudiée. Cette réalisation a pour but de monter en fréquence (DC-40 GHz) tout en conservant les performances du commutateur et faciliter l'intégration du composant. Des simulations et des mesures en paramètres S seront réalisées et présentées.

4.2 Influence du capot en Silicium sur la réponse RF d'une ligne coplanaire

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence du package à réaliser sur une ligne coplanaire adaptée 50Ω . Des packages en silicium de haute résistivité ($\rho=3K\Omega.cm$) seront réalisés et reportés sur un substrat de mêmes propriétés contenant les lignes coplanaires. Le scellement considéré dans ce chapitre est le verre fritté (glass frit) qui a une permittivité relative ($\epsilon_r=4,6$). D'abord, une première étude sur la hauteur « h » (Cf. figure 4-1) de la cavité sera étudiée pour voir comment le champ électromagnétique va se propager dans la ligne en présence de ce package. À noter que les parois du silicium respecteront un angle d'attaque de $54,7^\circ$ lié à la gravure chimique. Ensuite, nous étudierons l'influence de la position du package sur la ligne qui peut être décalée de quelques dizaines de micromètres suivant l'axe X ou Y pendant la fabrication.

4.2.1 Influence de la hauteur de la cavité

Le capot et son scellement provoquent une influence non négligeable sur les champs électromagnétiques avoisinant puisqu'il modifie les propriétés du milieu. En effet, le scellement diélectrique en contact avec les lignes du MEMS peut modifier légèrement la permittivité effective de la ligne de propagation et provoquer un saut d'impédance qui modifiera localement l'adaptation. Ce phénomène est notamment observable sur le rébouclage des lignes de champs électrique d'une ligne coplanaire traversant le substrat. La figure 4-1 montre les contraintes RF qui peuvent être provoqués lors de cette encapsulation d'une ligne coplanaire.

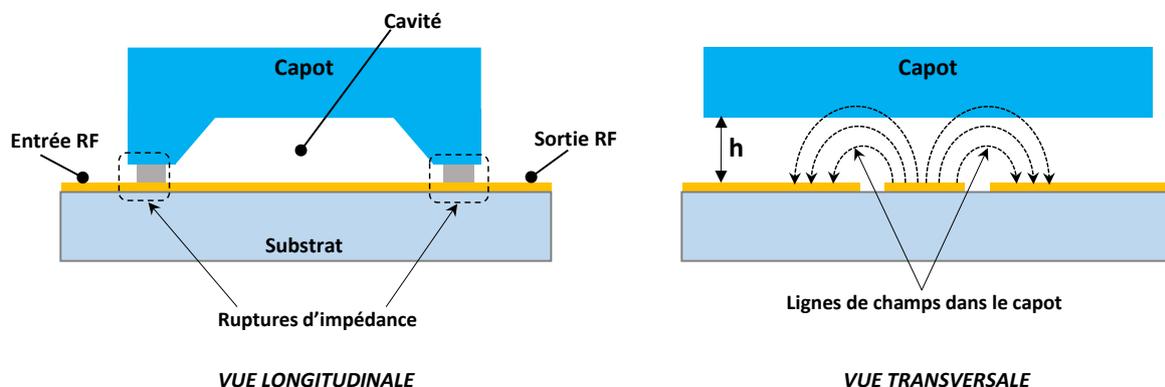


Figure 4-1 : Influence RF dans le dimensionnement du package d'une ligne coplanaire.

Pour analyser ces contraintes RF, nous avons utilisé le simulateur électromagnétique ANSOFT-HFSS. La première étape est consacrée à simuler la ligne coplanaire avec et sans encapsulation pour différentes hauteurs « h » du capot. Le substrat et le capot qui sont utilisés dans ces simulations sont en silicium haute résistivité ($\rho = 3 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$) avec une permittivité diélectrique $\epsilon_r = 11,9$. La figure 4-2 représente la structure sous HFSS d'une ligne coplanaire classique adaptée 50Ω encapsulée par un capot de $350 \mu\text{m}$ et un scellement en verre fritté de $15 \mu\text{m}$ d'épaisseur.

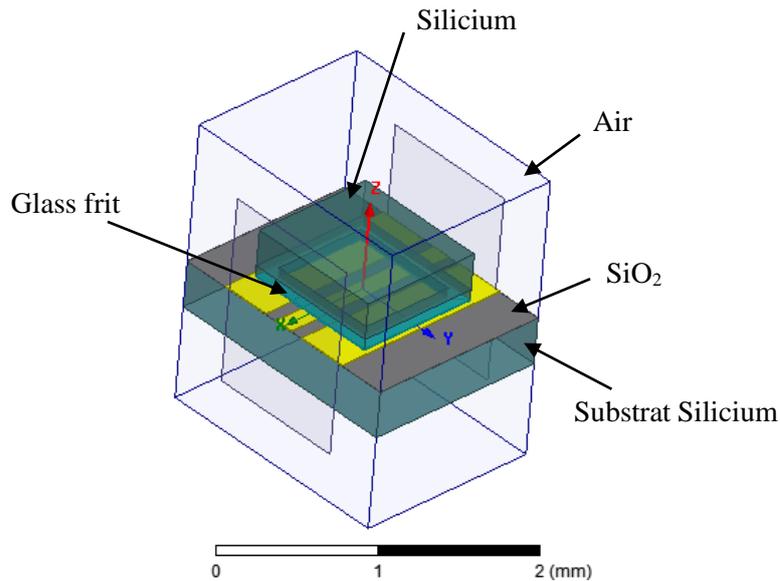
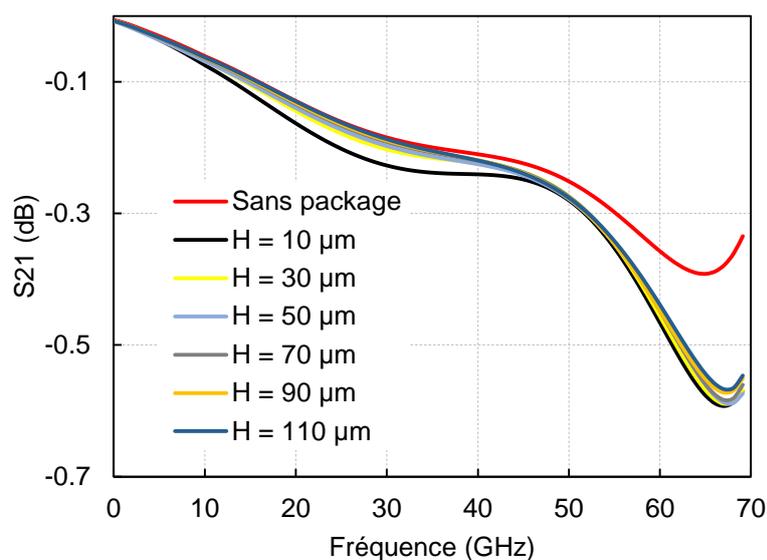


Figure 4-2 : Structure sous HFSS d'une ligne coplanaire en Or encapsulée par un capot en silicium.



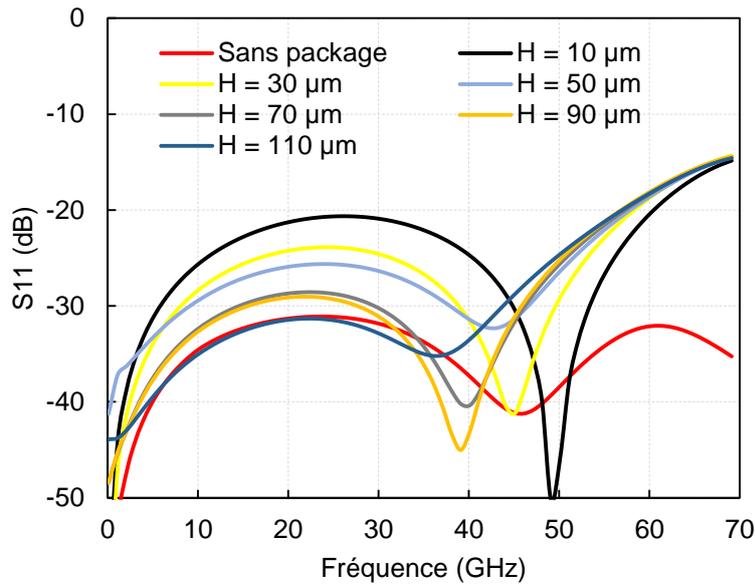


Figure 4-3 : Influence de la hauteur H de la cavité sur la réponse RF d'une ligne coplanaire adaptée 50Ω .

Les résultats montrent de très faibles influences sur le coefficient de transmission S_{21} , par contre une influence importante sur le coefficient de réflexion S_{11} qui varie entre -32 dB et -20 dB à 20 GHz. Néanmoins, ces résultats restent tout à fait acceptables.

4.2.2 Influence du positionnement du package

L'alignement du substrat où sont fabriqués les MEMS-RF avec celui des capots micro-usinés avant leur assemblage engendre parfois quelques décalages de quelques dizaines de micromètres en x ou y . Il est également important d'anticiper sur l'impact de ce décalage sur les performances. La figure 4-4 montre la vue de dessus de la ligne coplanaire, encapsulée par un capot en silicium décalé suivant l'axe X et Y .

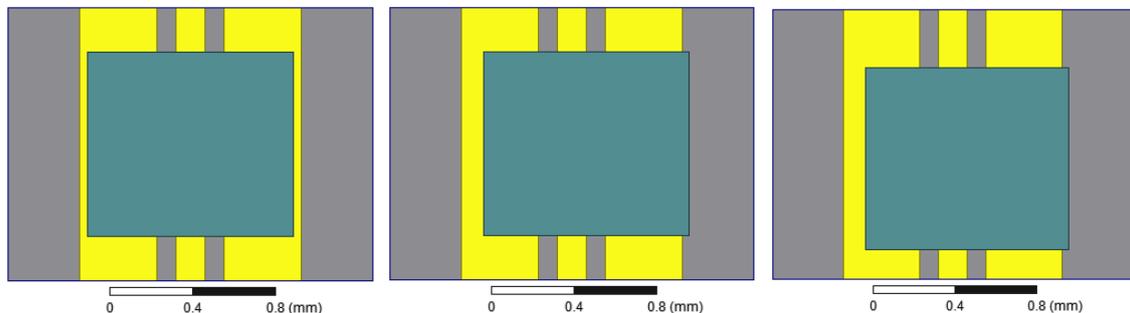


Figure 4-4 : Vue de dessus de la ligne coplanaire encapsulée avec un capot en silicium a) centré, b) $X+50 \mu\text{m}$ et c) $X+50 \mu\text{m}$; $Y+50 \mu\text{m}$.

Les résultats de simulations des paramètres S pour un décalage de la cavité de X+50 μm et Y+50 μm par rapport à la position initiale (centrée) sont représentés par la figure 4-5. Le coefficient de transmission S_{21} n'est pas influencé par ce mauvais alignement du package, par contre de faibles influences sur les pertes de réflexions S_{11} sont obtenues qui sont peu différentes dans le cas où le package est centré sur la ligne coplanaire. Là aussi des couplages plus importants avec le capot sont observables sur le coefficient de réflexion des lignes.

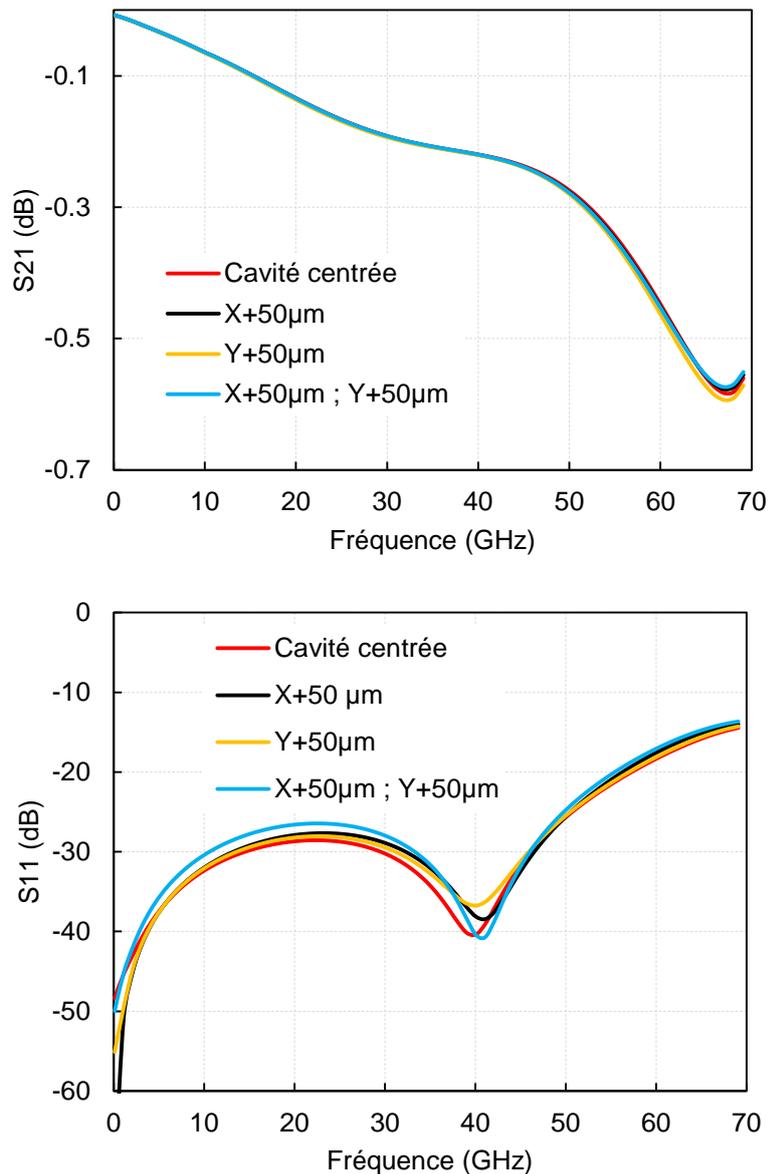


Figure 4-5 : Décalage du capot suivant l'axe X ou Y, a) perte d'insertion, b) perte de réflexion.

4.3 Influence du capot sur les performances du commutateur

L'influence du package sur le commutateur ohmique a été étudiée. Les performances RF du commutateur sont simulées sur un substrat de silicium à haute résistivité puis encapsulés de la même manière que précédemment (figure 4-6). Les simulations montrent globalement un impact négligeable du package sur les performances du composants puisque les pertes d'insertion ne sont impactées que de 0,03 dB et l'isolation de 0,4 dB à 20 GHz.

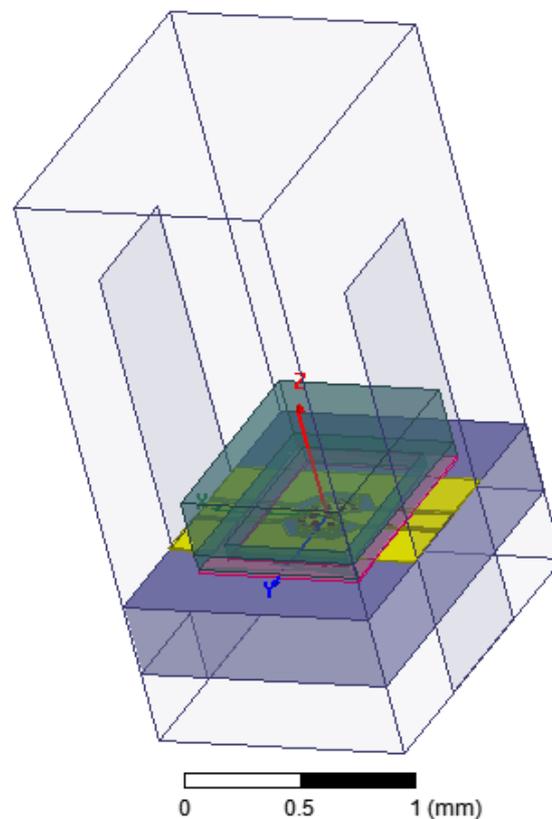


Figure 4-6 : Modèle sous HFSS du commutateur encapsulé.

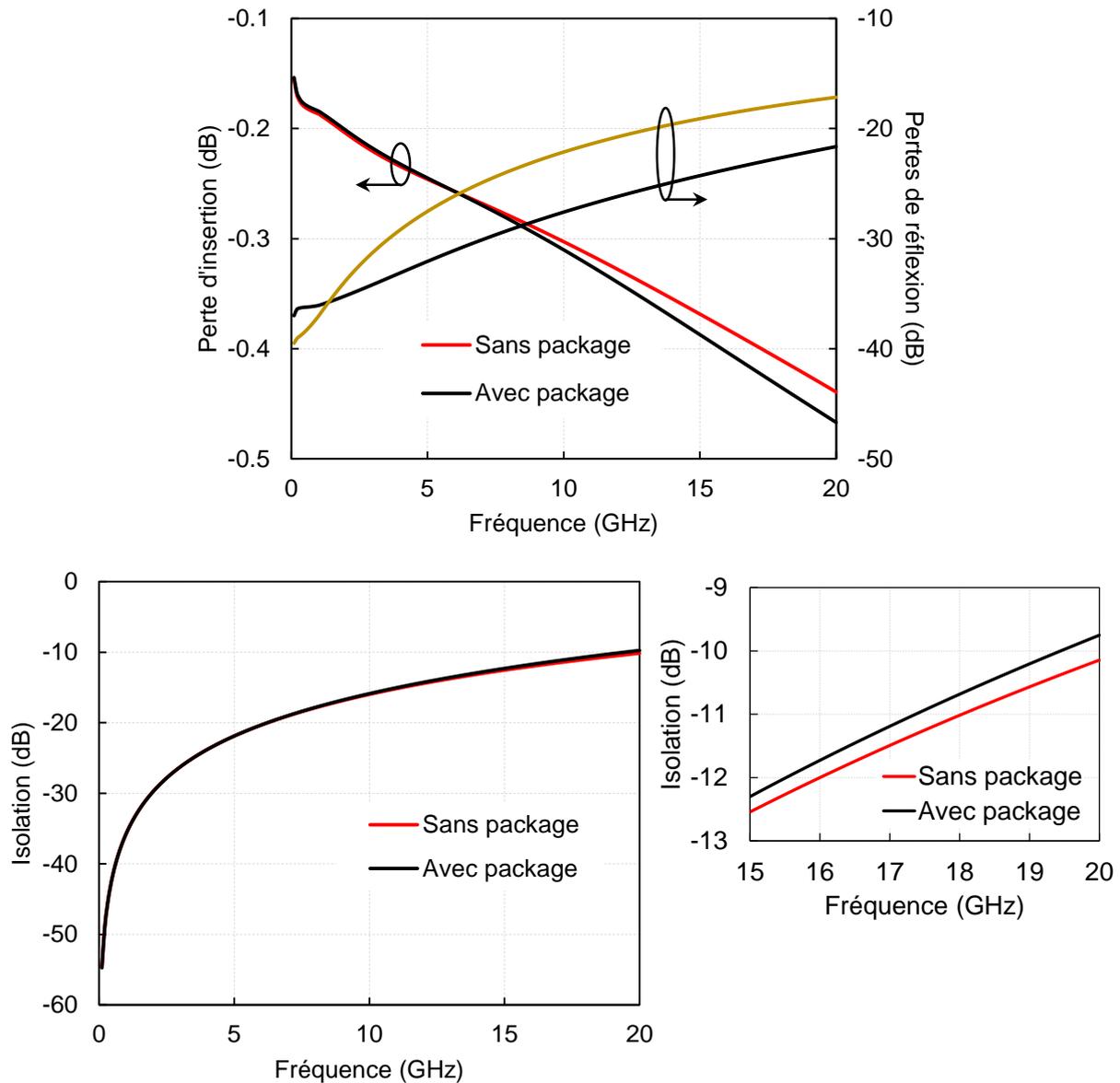


Figure 4-7 : Paramètres S simulés du commutateur avant et après l'encapsulation.

4.4 Fabrication du capot

Les étapes de fabrication des capots micro-usinés qui protègent les MEMS sont présentés par la figure 4-8. Un substrat de silicium à haute résistivité est utilisé et qui avait une couche de dioxyde de silicium de part et d'autres de la plaque (a). D'abord, des résines positives et négatives sont respectivement déposées sur la face d'avant et sur la face arrière de la plaque (b). Ensuite, nous faisons une lithographie et un développement de la résine négative pour créer les motifs des capots (c). Puis, une gravure à l'aide d'HF (acide fluorhydrique) est nécessaire

pour enlever la couche de SiO₂ (d). Enfin, une gravure profonde du silicium est faite pour réaliser nos capots en utilisant la solution TMAH (Tetramethylammonium hydroxide) (f).

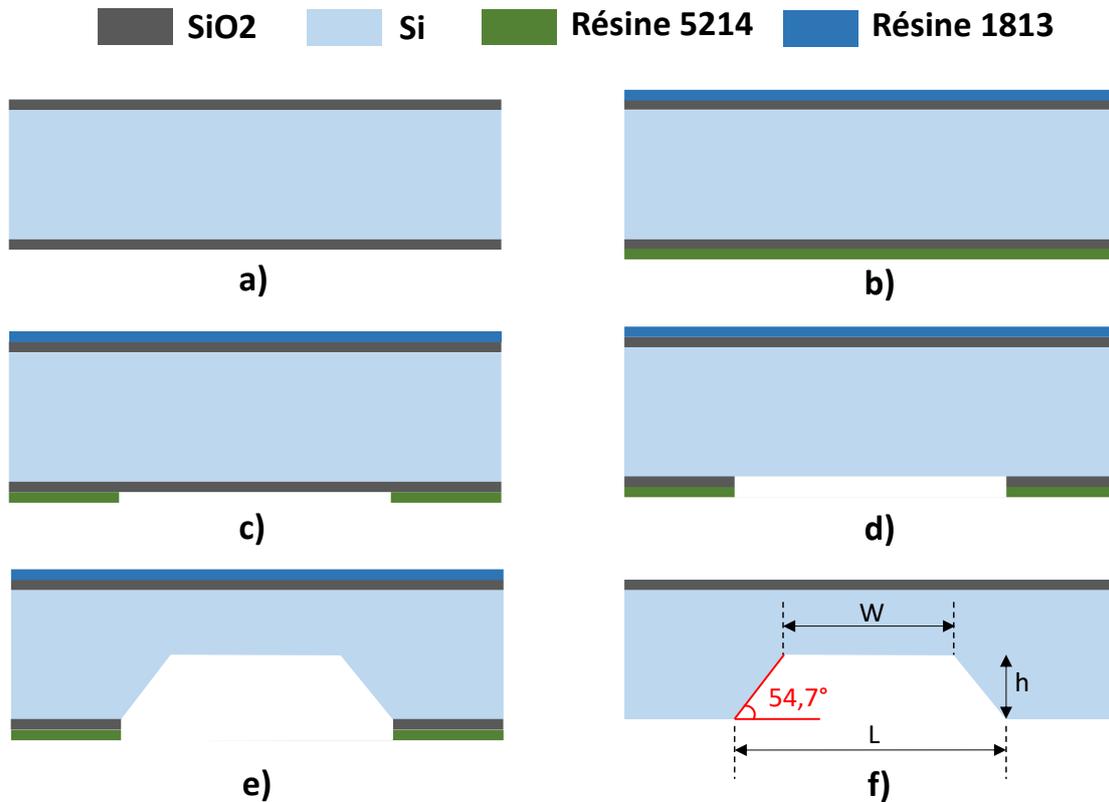


Figure 4-8 : Gravure d'un substrat de Silicium qui forme les capots.

Cette solution est utilisée à une température d'environ 85°C qui permet d'atteindre une vitesse de gravure de l'ordre de 0,8 µm/min. Notons qu'il existe un angle d'attaque lors de cette gravure de 54,7° (f). Les dimensions de l'ouverture à réaliser sont données par l'équation présentée ci-dessous.

$$L = \frac{2 h}{\tan (54,7^{\circ})} + W \quad (4-1)$$

La figure ci-dessous montre une photo MEB d'un package en silicium sans glass frit (à droite) et avec un étalement de glass frit (à gauche), gravé en utilisant la technique présentée précédemment.

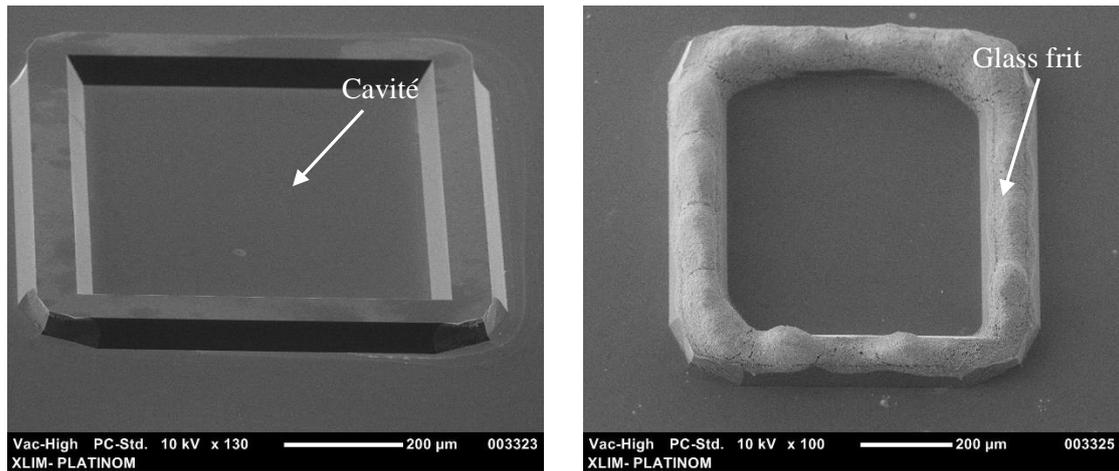


Figure 4-9 : Photo MEB du package sans et avec le glass frit.

4.5 Mesures de performances

4.5.1 Mesure de l'influence du package sur un substrat de verre

Les mesures des paramètres S du commutateur encapsulé sont effectuées sous pointes avec un analyseur de réseau vectoriel ZVA Rohde & Schwarz 10 MHz à 24 GHz et une calibration SOLT (Short Open Load Thru) dans les conditions normales de température et de pression. La figure 4-10 présente une comparaison des mesures des paramètres S du commutateur encapsulé et non encapsulé à son état passant et bloqué. À noter que les composants MEMS ont été délibérément fabriqués avec une épaisseur de métallisation modérée pour démontrer le concept d'encapsulation et sont réalisés sur un substrat de verre pour évaluer plus précisément l'impact du package sans rajouter des capacités parasites via le substrat (cas d'un substrat en silicium).

Pour le commutateur non encapsulé, à son état bloqué, une capacité C_{MEMS} de 17 fF est extraite qui isole la sortie et l'entrée RF du commutateur avec 32 dB à 2 GHz. ses pertes d'insertion se situent autour de 1 dB à 2 GHz et 2 dB à 20 GHz. Ces mesures sont refaites en utilisant le même banc de mesure sur un commutateur encapsulé. Les résultats montrent des influences presque négligeables sur les pertes d'insertion et l'isolation, par contre les pertes d'adaptions sont meilleurs de 4 dB à celle sans package.

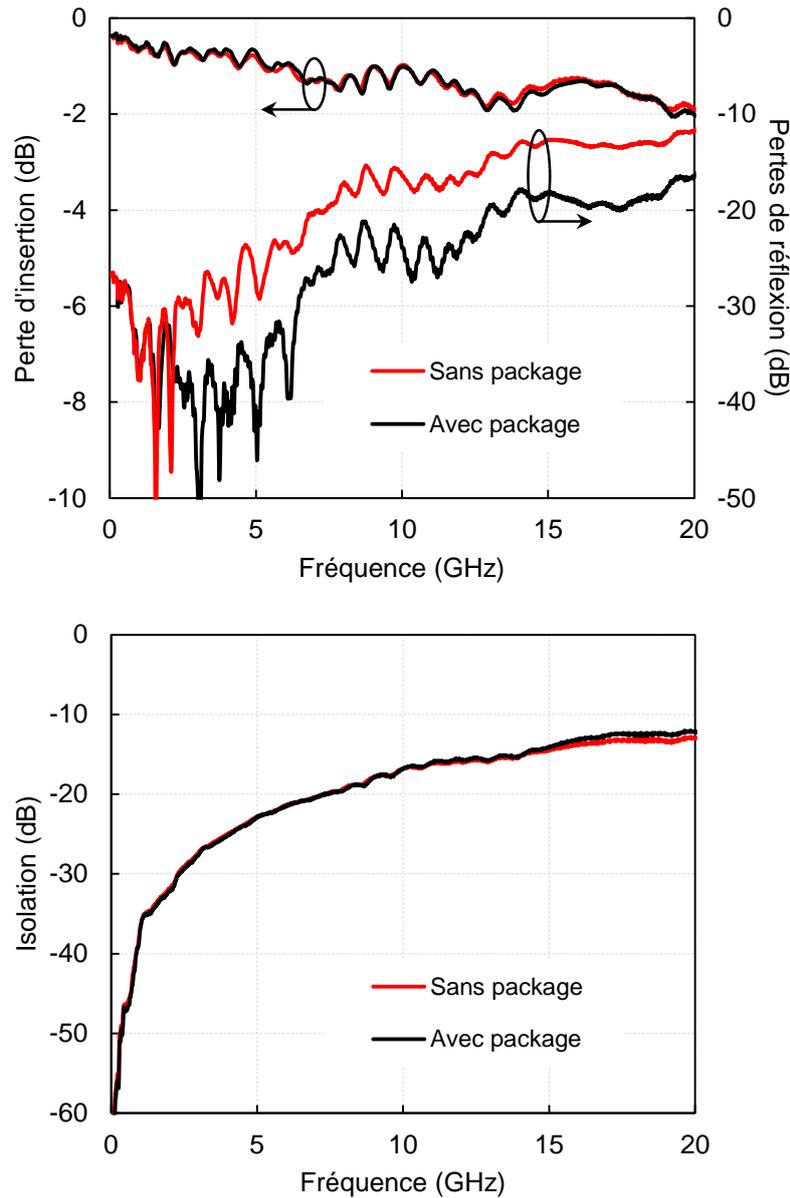


Figure 4-10 : Une comparaison des paramètres S mesurés du commutateur encapsulé et non encapsulé sur un substrat de verre a) à son état passant, et b) son état bloqué.

4.5.2 Performances d'un MEMS optimisé et encapsulé sur Silicium

La figure 4-11 montre une photo MEB du commutateur encapsulé sur un substrat HRSi scellé par le glass frit. Des mesures sur la tension V_p sont faites après encapsulation et résultent en une tension d'activation moyenne de 46V au lieu de 40V dans le cas du commutateur non encapsulé (tableau 4-1). Cette variation est attribuable à une relaxation de contraintes de la

poutre puisque la valeur moyenne de tension de rapproche de la valeur théorique (50V) et que l'écart-type est plus faible.

Tableau 4-1 : Mesure de la tension V_p du commutateur encapsulé.

MEMS	V_p (avant package)	V_p (après package)
A1	38	41
A2	43	49
A5	43	45
A6	44	48
A8	38	42
A9	32	44
B5	46	42
B7	46	46
C2	41	46
C5	37	48
C6	44	42
D4	38	50
D8	37	49
E2	35	40
E6	33	51
F3	34	44
F7	43	49
Moyenne V_p (Volts)	40	46
Écart type (Volts)	5	3

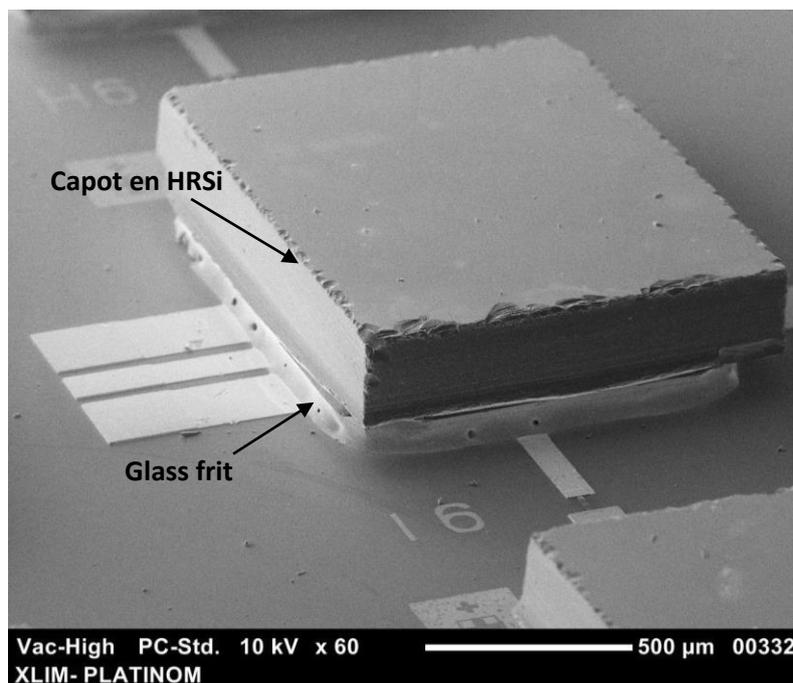


Figure 4-11 : Photo MEB du commutateur encapsulé réalisé sur Silicium.

Les mesures RF des commutateurs MEMS-RF optimisés sur substrat de silicium ont été réalisées sur le même banc de mesure que précédemment. Les résultats sont présentés par la figure 4-12. À l'état bloqué, le composant présente une capacité C_{MEMS} de 30 fF qui démontre une isolation supérieure à 15 dB à 10 GHz. Du fait de l'optimisation du procédé effectuée, les pertes d'insertion sont maintenant situées autour de 0,17 dB à 2 GHz et 0,25 dB à 10 GHz.

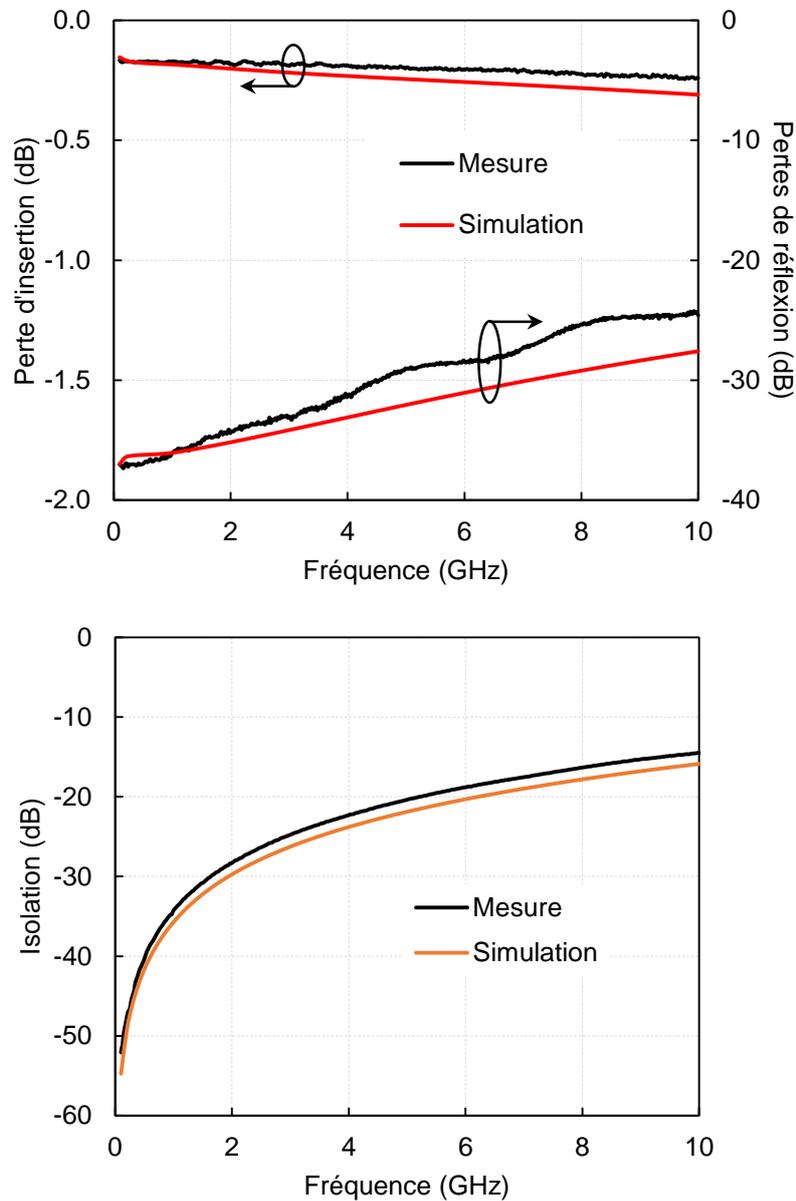


Figure 4-12 : Mesure paramètres S du commutateur encapsulé sur Silicium a) à son état passant, et b) son état bloqué.

4.5.3 Test de l'herméticité

Les mesures de l'herméticité du package ont été effectuées par le Centre National des Études Spatiales (CNES) dans le cadre d'une R&T, le test de fuite par Kr^{85} réalisé et dont le principe est présenté dans le chapitre 1, est une technique très sensible utilisée pour mesurer des taux de fuite fine dans les dispositifs de haute fiabilité. Le taux de fuite du package a été mesurée à $8,8^e-12 \text{ atm.cc.s}^{-1}$ et représente la limite basse du détecteur.

De plus, la réponse dynamique du commutateur encapsulé a été mesurée sous air et sous vide afin de détecter des variations susceptibles d'intervenir dans le cas de fuites importantes.

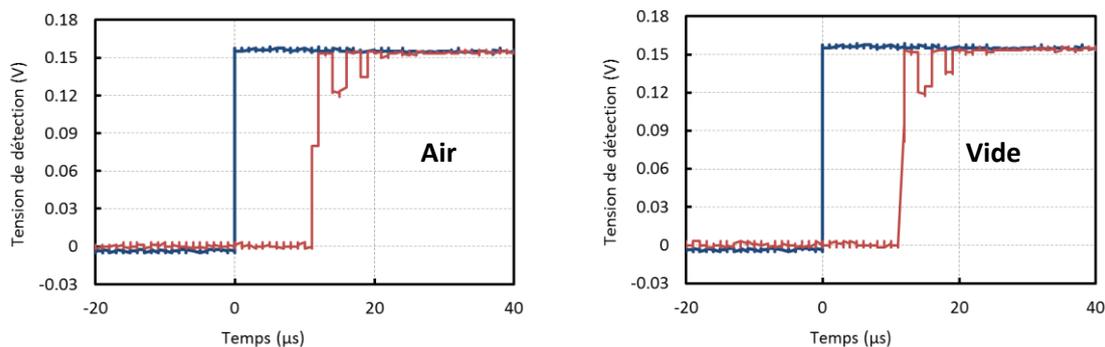


Figure 4-13 : Réponse dynamique du commutateur encapsulé dans deux milieux différents : en air et sous vide.

Les résultats montrent que le temps de commutation et que le nombre de rebonds sont constant dans les deux cas. Il peut en être déduit que la cavité qui protège le MEMS garantit une bonne herméticité.

4.5.4 Tests de fiabilité

Les mesures de la durée de vie du commutateur ont été effectuées en utilisant un banc de mesure développé par AirMems. Il a été conçu pour caractériser la durée de vie des composants MEMS-RF à contact ohmique. Il est entièrement piloté par ordinateur et permet d'enregistrer automatiquement et de manière précise (méthode 4 fils) les données électromécaniques de 8 MEMS-RF en même temps. Pour mesurer le nombre de cycles effectués par le commutateur, ce dernier doit être activé puis désactivé à une fréquence définie par l'utilisateur pendant toute la durée du test. Ce banc de fiabilité comprend un générateur de tension permettant la sollicitation des composants MEMS-RF, un SMU permettant la mesure de la résistance de contact des MEMS-RF mais aussi l'envoi de contraintes aux entrées et sorties

du composant et une matrice de commutation permettant la sélection des MEMS-RF mesurés ou testés.



Figure 4-14 : Synoptique général du banc de fiabilité DC.

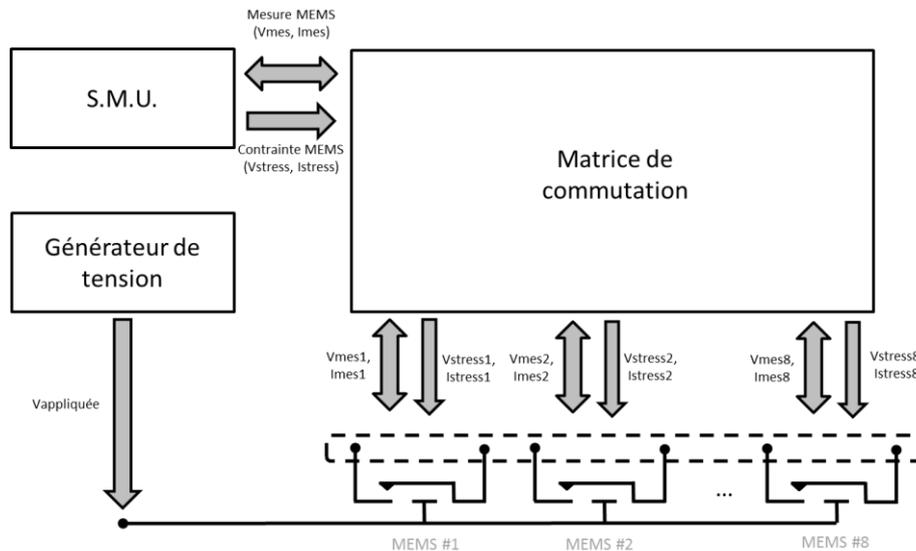


Figure 4-15 : Schéma du banc de mesure DC 8 voies.

Les appareils sont directement commandés par ordinateur. Les figures ci-dessous représentent un simple synoptique du banc de fiabilité DC utilisé dans cette partie et le schéma hardware du banc. Les résultats de mesures sont effectués en température ambiante, sans aucune contrainte électrique appliquée entre l'entrée et la sortie du commutateur (courant DC nul pendant le cyclage et très faible (1mA) durant le relevé de mesures). Nous avons appliqué au commutateur un signal d'activation de type carré bipolaire, de fréquence 4 KHz et d'amplitude 70V. À noter que, les mesures de la résistance de contact et des tensions d'actionnement et de relâchement sont réalisées tous les 1 million de cycles. La figure 4-16 montre l'évolution de la résistance de contact et les tensions d'actionnement et relâchement du MEMS en fonctions du nombre de cycles. Les résultats ont montré que la résistance est constante jusqu'à 1 milliard de cycles prouvant que le package protège correctement le contact électrique du composant de l'environnement extérieur.

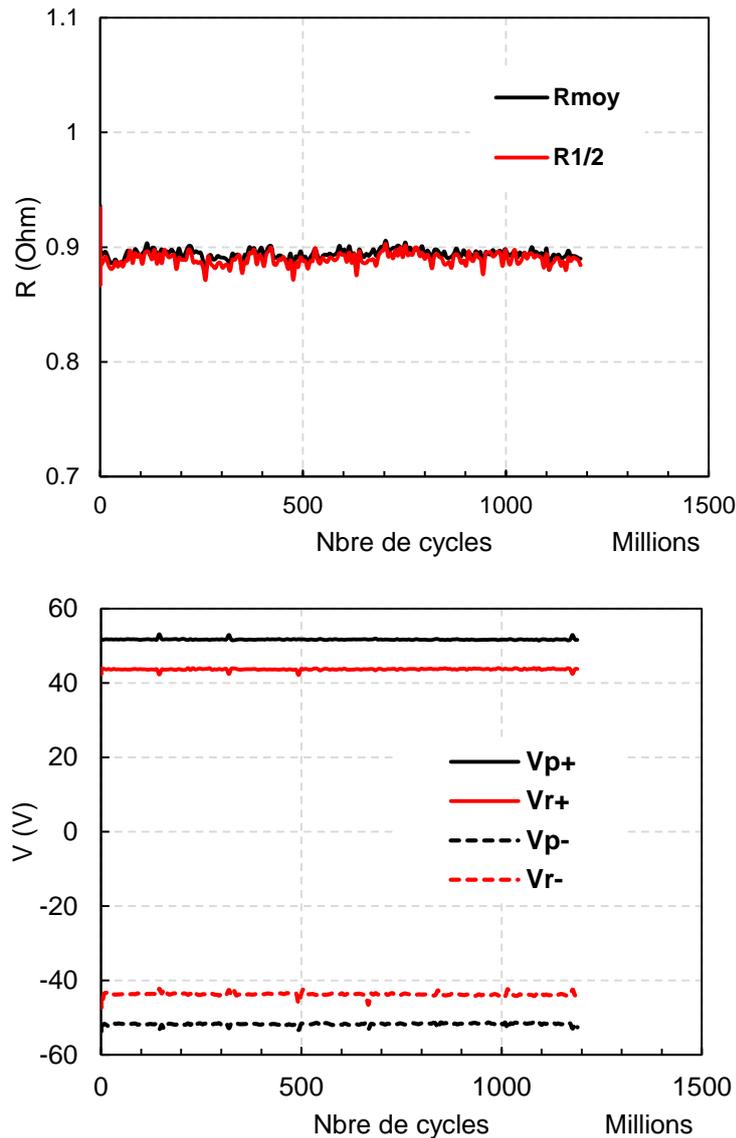


Figure 4-16 : Évolution de la résistance de contact et des tensions en fonction du nombre de cycles.

4.6 Conception d'un SPST et SPDT tout encapsulé à base de MEMS-RF

Les commutateurs sont des dispositifs essentiels dans les chaînes d'émission et de réception des systèmes de télécommunication. Au-delà de leur simple rôle de routeur, ils jouent un rôle prépondérant en intégrant des déphaseurs, des filtres, des adaptateurs d'impédance, ou des antennes en leur procurant de l'agilité [72].

Dans cette partie, nous allons présenter un SPST (Single Pole Single Throw) et un SPDT (Single Pole Double Throw) à base de commutateurs MEMS-RF ohmiques en configuration série-shunt

capable d'adresser des applications allant du DC à 30 GHz. Ces composants sont ensuite encapsulés en utilisant la technique par collage de tranche développée précédemment.

4.6.1 Conception d'un SPST à MEMS-RF encapsulé

Le commutateur SPST (Single Pole Single Throw) MEMS-RF est conçu en configuration série-shunt afin d'augmenter le niveau d'isolation. À l'état passant, le signal RF traverse le commutateur série qui présente une résistance série R_{on} (figure 4-17-a). Dans ce cas, le commutateur Shunt présente une faible capacité connectée à la masse qui a une influence négligeable sur le paramètre S_{21} . À l'état bloqué, il suffit d'activer le commutateur shunt qui conduit le signal RF vers la masse et accentue l'isolation du commutateur en série (figure 4-17-b). Le SPST est optimisé et simulé en utilisant le simulateur Agilent-Momentum afin de garantir la meilleure isolation possible jusqu'à 40 GHz.

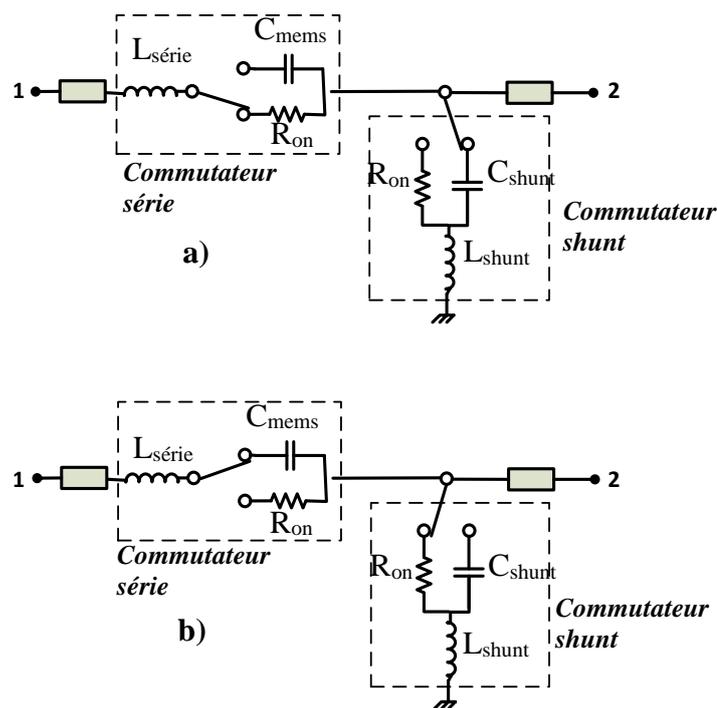


Figure 4-17 : Schéma équivalent d'un SPST MEMS-RF en configuration Série/Shunt a) à l'état passant, b) à l'état bloqué.

Le SPST est fabriqué sur un substrat de verre avec le procédé de fabrication d'AirMems et mesuré dans la bande de fréquence de 0,1 à 40 GHz en utilisant un analyseur de réseau vectoriel. Le commutateur SPST a été fabriqué sur un substrat de verre et a été encapsulé avec un capot

de silicium de haute résistivité puis scellé à l'aide la pâte de verre frittée (figure 4-18). La figure 3 montre la vue en coupe du SPST série/shunt avec son capot de silicium scellé par une couche de glass frit.

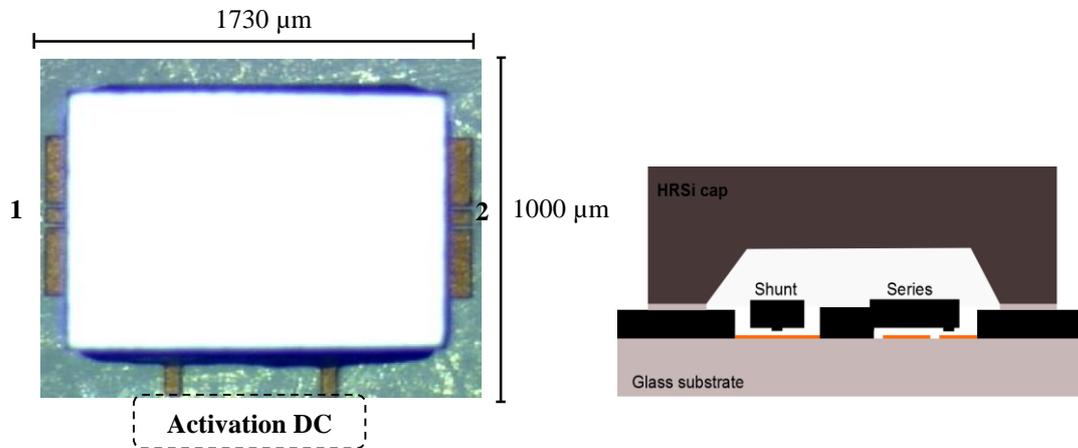
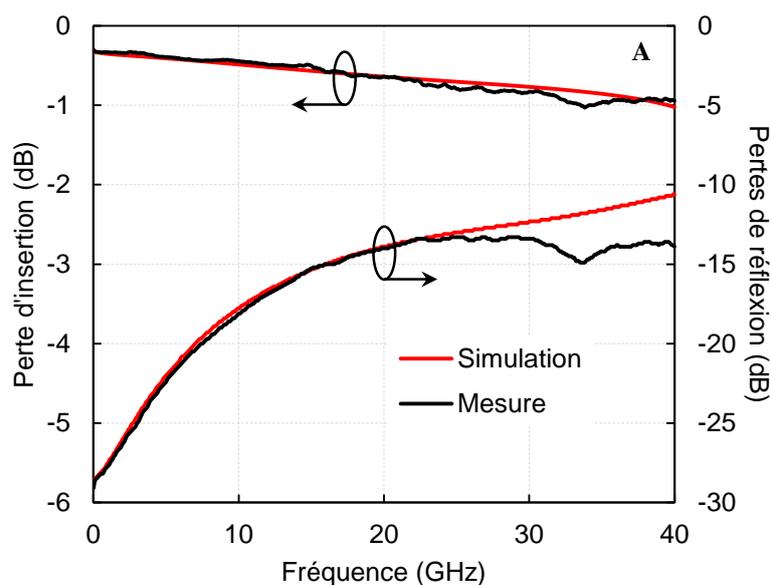


Figure 4-18 : Photo du commutateur SPST MEMS-RF encapsulé en configuration série/shunt avec une coupe transversale.

Une comparaison des paramètres S mesurés avec les simulations effectuées à l'aide du simulateur Agilent Momentum sont présentés par la figure 4-19. Les résultats montrent des pertes d'insertion inférieures à 1 dB jusqu'à 40 GHz à l'état passant et des pertes par réflexions montrent une adaptation supérieure à 14 dB sur toute la bande de fréquence (figure 4-19-A). À l'état bloqué, les mesures montrent une isolation supérieure à 35 dB jusqu'à 40 GHz (figure 4-19-B).



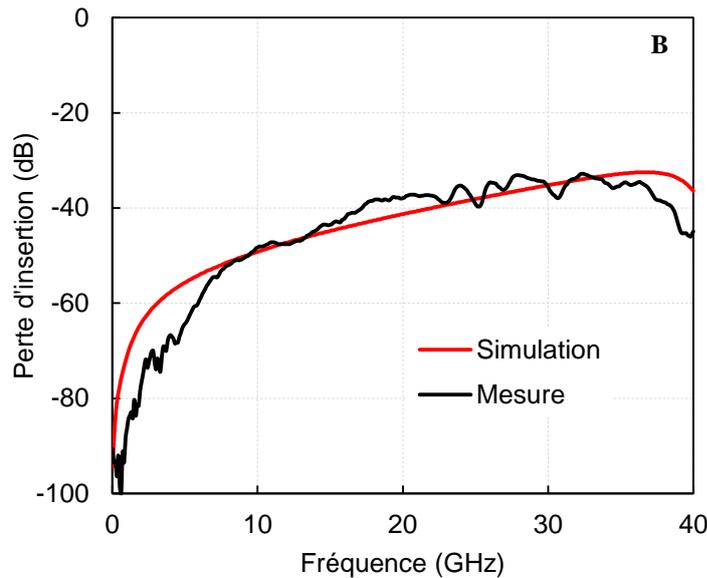


Figure 4-19 : Simulations et mesures des paramètres S du SPST MEMS-RF, A) Pertes d'insertion et réflexion, B) isolation.

4.6.2 Conception d'un SPDT à MEMS-RF encapsulé

Le commutateur SPDT est basé sur deux commutateurs SPST MEMS-RF connectés par une jonction en T de ligne coplanaire (figure 4-20). Lorsque le signal traverse une branche (S1 fermé et S3 ouvert par exemple), l'autre branche doit être parfaitement isolée (S2 ouvert et S4 fermé). Lors de la conception, la longueur de ligne « ds » qui équivaut à une capacité parasite a été compensée par une inductance série d'impédance Z_L positionnée au niveau de la jonction T.

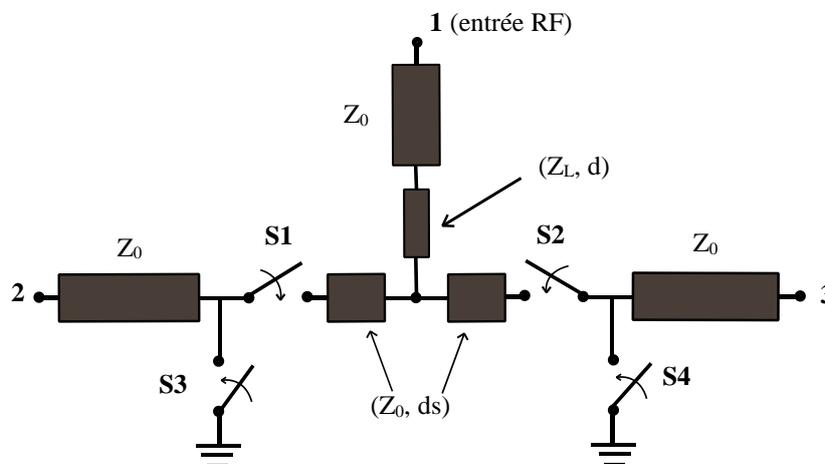
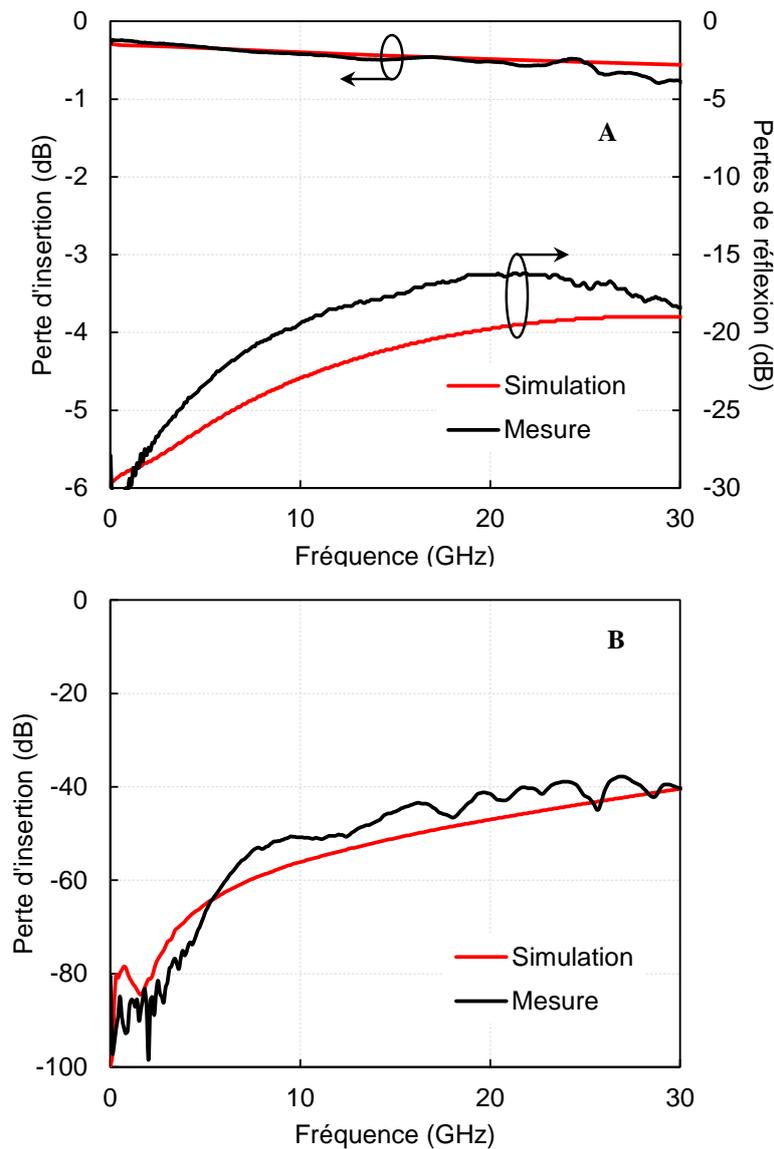


Figure 4-20 : Schéma équivalent du SPDT MEMS-RF basé sur deux SPSTs étudiés dans la partie précédente.

Dans certains cas, « ds » est une ligne quart d'onde permettant de garantir une isolation importante au niveau de la jonction en T. Néanmoins cette technique occupe une surface conséquente et reste bande étroite.

La figure 4-21 présente les paramètres S mesurés et simulés (Agilent ADS Momentum). Les résultats montrent des pertes d'insertion inférieures à 0,8 dB jusqu'à 30 GHz à l'état passant et des pertes par réflexions supérieures à 15 dB sur toute la bande (figure 4-21-A). À l'état bloqué, il a été mesuré une isolation supérieure à 40 dB jusqu'à 30 GHz (figure 4-21-B) et une isolation de 40 dB entre les sorties RF du SPDT (figure 4-21-C).



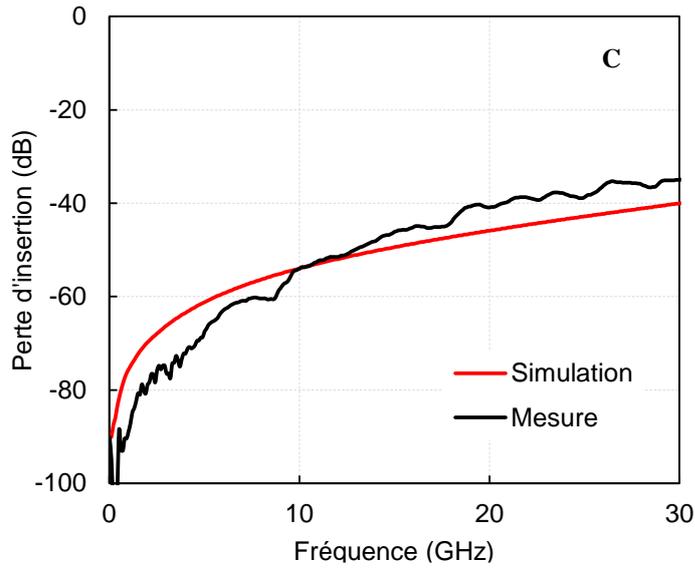


Figure 4-21 : Simulations et mesures des paramètres S du SPDT MEMS-RF, A) transmission et Réflexion en entrée, B) Isolation P1-P2, C) Isolation P2-P3.

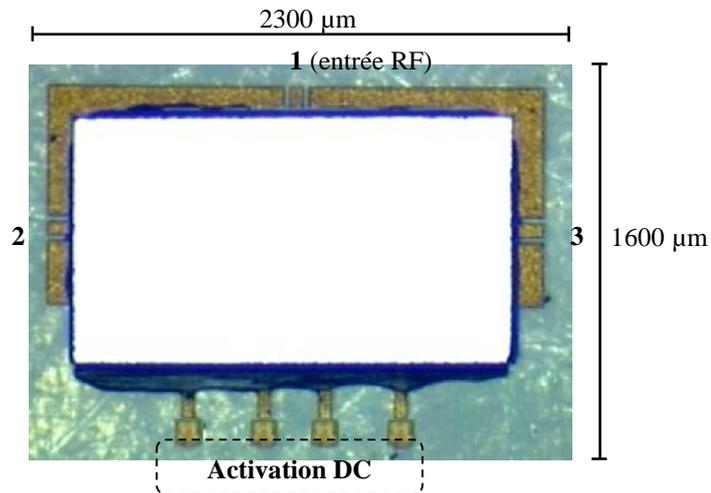


Figure 4-22 : Photo du commutateur SPDT MEMS-RF encapsulé.

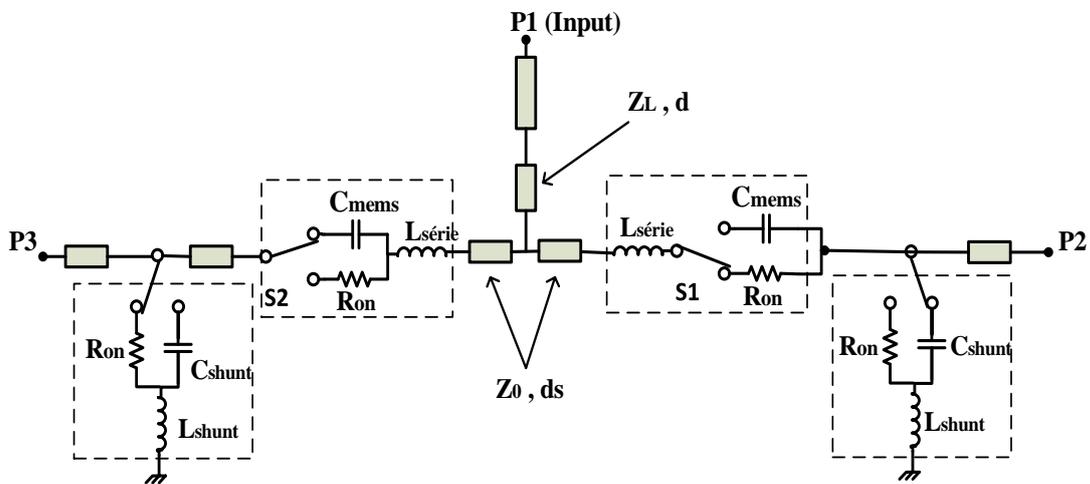


Figure 4-23 : Schéma électrique du commutateur SPDT MEMS-RF.

Tableau 4-2 : Paramètres du SPST simulés

Paramètres	Valeurs
$L_{\text{série}}$ (pH)	100
C_{mems} (fF)	17
R_{on} (Ω)	2,3
C_{shunt} (fF)	16
L_{shunt} (pH)	10

Le tableau 4-3 compare les performances RF du SPDT réalisé dans ce chapitre avec des SPDT commerciaux et publiés constituant l'état de l'art en termes de performances RF. Ce résumé montre que le composant développé rassemble le meilleur de la technologie SOS et diodes PIN et permet de s'affranchir du compromis entre l'isolation et les pertes d'insertion.

Tableau 4-3 : Tableau comparatif avec des commutateurs SPDT commerciaux et publiés.

Référence	Technologie	Pertes d'insertion [dB] @				Isolation [dB] @				Taille [mm ²]	Package
		DC – 5 GHz	5 – 10 GHz	10 – 20 GHz	20 – 30 GHz	DC – 5 GHz	5 – 10 GHz	10 – 20 GHz	20 – 30 GHz		
[75]	MEMS	0,3	0,5	1	0,7	45	40	38	25	-	Non
[76]	MEMS	0,29	0,36	0,4	0,65	34	26	18	16	1,45x1,4	Oui
[13]	GaN	0,8	1	2,3	-	45	37	21	-	4 x 4	Oui
[77]	MEMS	0,3	0,4	0,8	-	32	26	23	-	1,64x1,3	Non
[78]	PIN diode	0,4	0,45	0,68	-	65	55	42	-	-	Oui
[79]	GaAs pHEMT	0,7	-	-	-	43	-	-	-	3 x 3	Oui
[12]	SOS	0,8	1	1,5	2,2	70	58	50	48	-	Oui
Ce travail	MEMS	0,35	0,45	0,5	0,8	65	50	40	40	2,3x1,6	Oui

4.7 Étude d'une transition Flip-Chip

Dans la littérature sur le packaging des MEMS-RF, la plupart des sujets de recherche sont concentrés sur l'encapsulation niveau 0 des MEMS-RF alors que très peu d'études se focalisent sur la technique d'intégration de ces commutateurs encapsulés dans un package niveau 1 ou sur une carte électronique.

Il existe donc deux types d'interconnexions compatibles avec la solution d'encapsulation développée dans ce chapitre : l'interconnexion par des wires bonding et la transition flip-chip par billes de soudures (en anglais solder balls). La connexion par des wires bonding est largement utilisée notamment dans les domaines de la défense et du spatial, mais elle peut présenter des effets inductifs importants qui limitent leur utilisation au-delà de 40 GHz [80].

La transition flip-chip par billes de soudures est une technologie d'interconnexion très prometteuse très répandue notamment pour des applications supérieures à 40 GHz [81], [82].

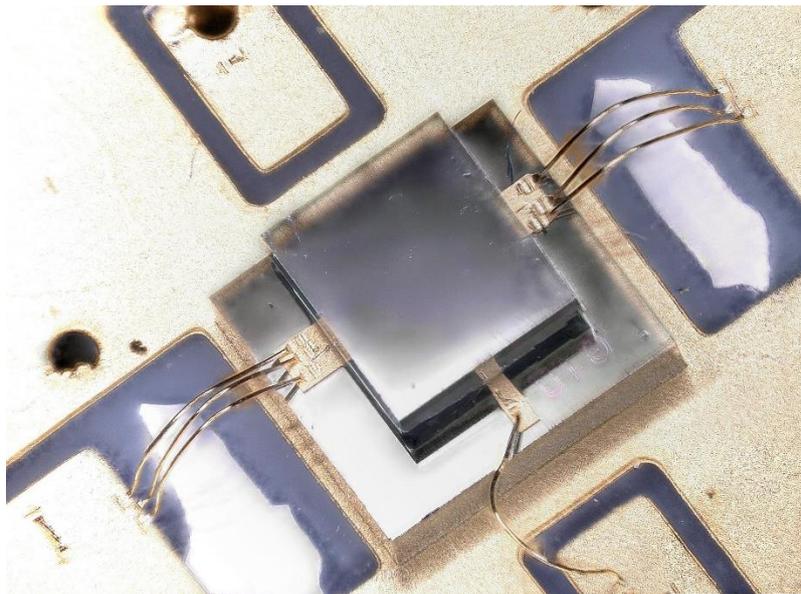


Figure 4-24 : Interconnexion par wire bonding entre une plaque de fiabilité et un commutateur encapsulé.

Par la suite, nous allons présenter l'étude d'une transition flip-chip pouvant adresser de hautes fréquences avec de faibles parasites jusqu'au 40 GHz.

4.7.1 Principe

Le principe de la transition flip-chip est d'intégrer des billes de soudure à la surface d'une puce électronique pour permettre sa connexion avec un circuit une fois le composant retourné. La qualité de la connexion est garantie par un alliage eutectique (très souvent un alliage d'étain ou de cuivre) constituant la bille. Dans notre cas, l'idée est d'utiliser une hauteur de bille suffisante pour compenser la hauteur introduite par le capot. Pour ce faire, des billes industrielles de diamètre $250\ \mu\text{m}$ seront reportées sur une puce encapsulé. La hauteur du capot en silicium sera néanmoins réduite de $150\ \mu\text{m}$ comme le montre la figure 4-25-a.

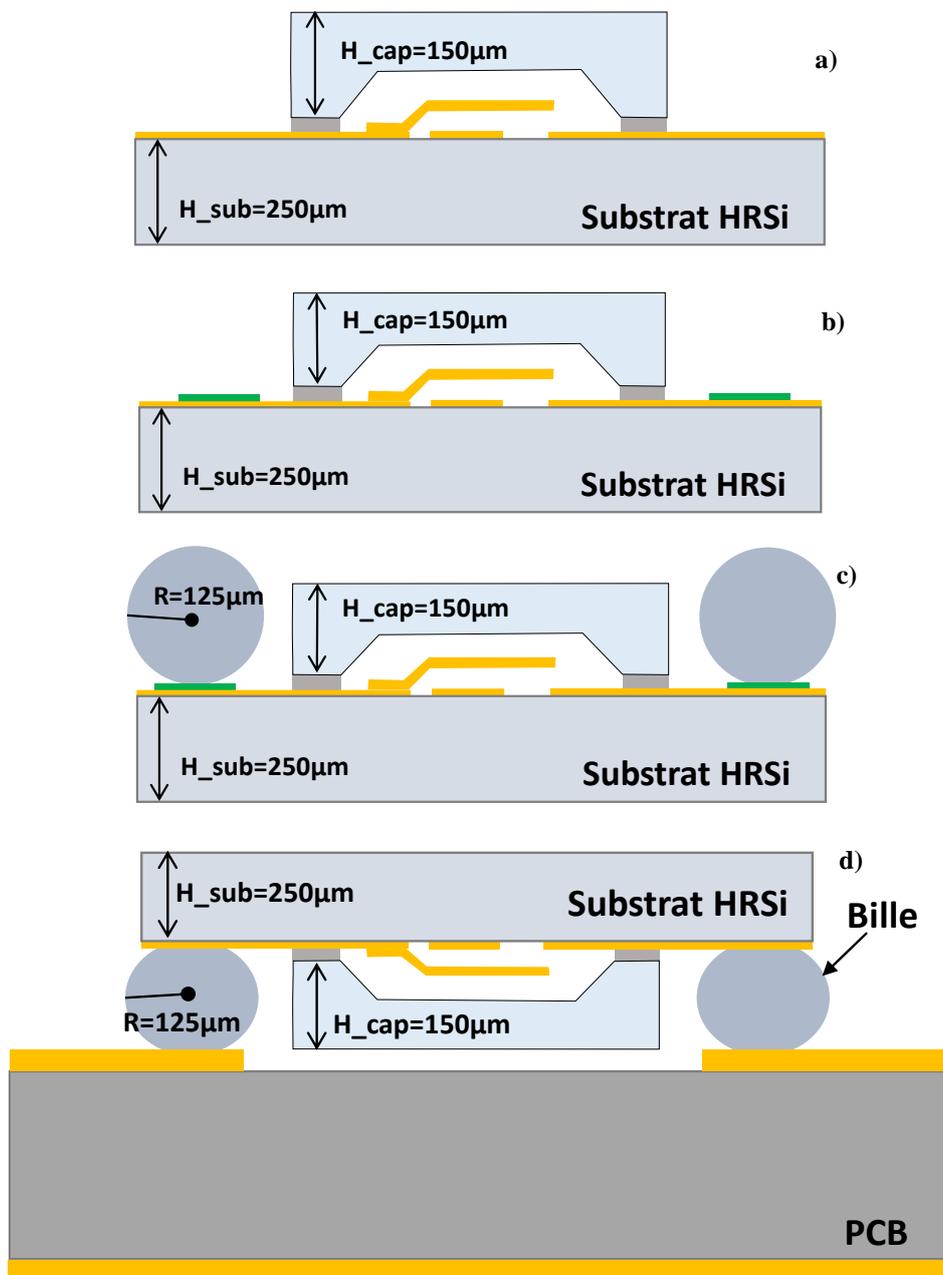


Figure 4-25 : Étapes de conception de la transition flip-chip étudiée.

4.7.2 Conception et optimisation de la structure

4.7.2.1 Conception d'une ligne coplanaire encapsulée

La conception et l'optimisation de la structure ont été effectuées en utilisant l'outil de simulation Ansoft HFSS. Pour étudier l'effet RF des billes sur le commutateur qui sera ensuite reporté sur un PCB, nous avons tout d'abord conçu une ligne coplanaire adaptée 50Ω comportant des transitions permettant d'accueillir les billes (figure 4-26). La ligne est conçue sur un substrat de silicium de $250\ \mu\text{m}$ d'épaisseur et recouverte par un capot de $150\ \mu\text{m}$ de hauteur en silicium également de haute résistivité. La figure 4-27 représente les paramètres S de la ligne encapsulée sous HFSS sur la bande DC-40 GHz.

Les résultats de simulations de cette ligne encapsulée simulée sur un substrat de silicium à haute résistivité montrent des pertes d'insertion inférieures à $0,3\ \text{dB}$ et une adaptation supérieure à $18\ \text{dB}$ jusqu'à $40\ \text{GHz}$.

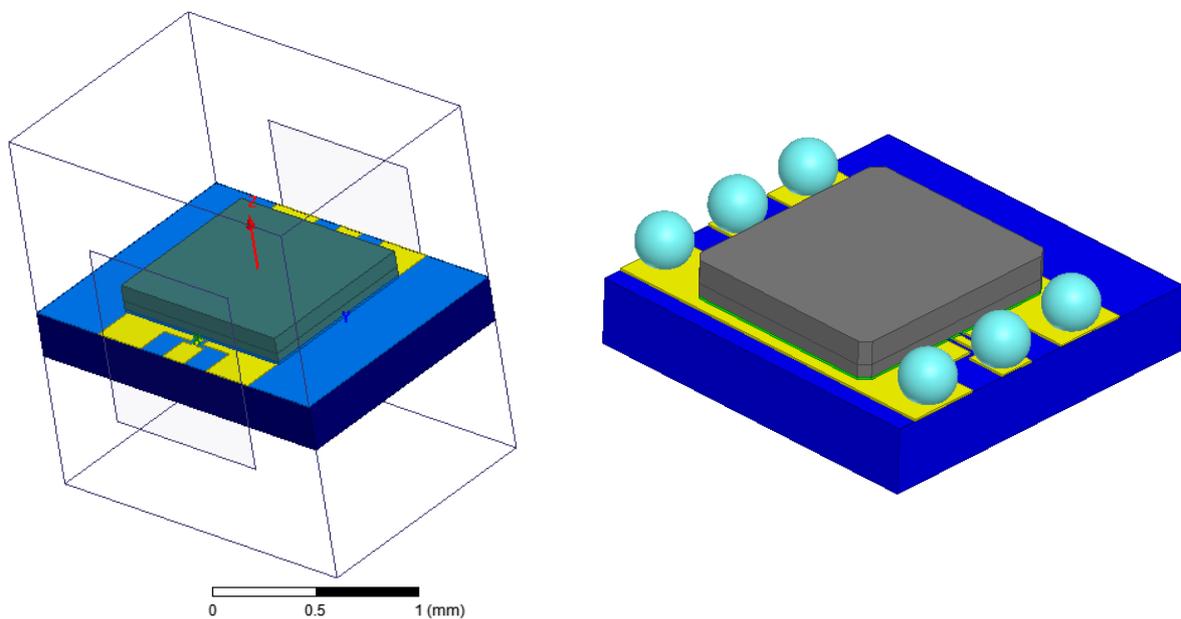


Figure 4-26 : Structure de la ligne encapsulée sur HFSS.

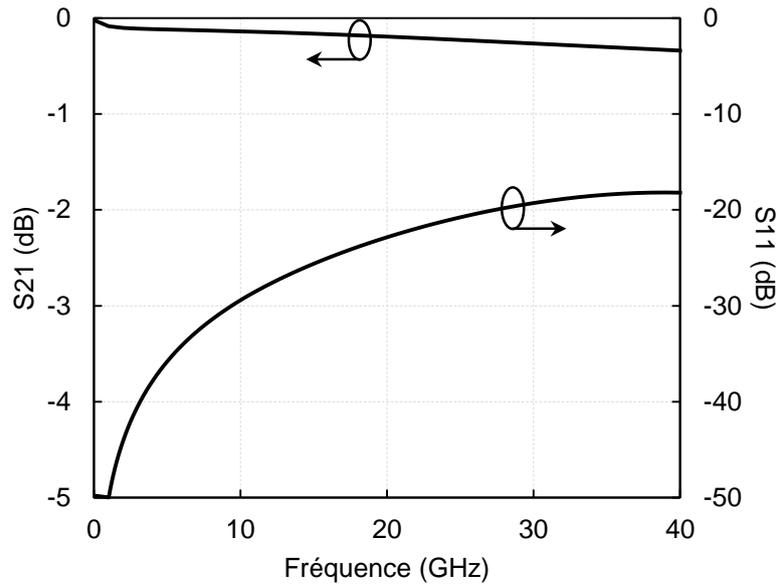


Figure 4-27 : Paramètres S simulés de la ligne encapsulée.

4.7.2.2 Conception de la transition flip-chip

La transition flip-chip a été conçue sur un substrat commercial RT/Duroid 5880 de 1,57 mm d'épaisseur, de $\tan \delta = 9.10^{-3}$ et une permittivité diélectrique $\epsilon_r=2,2$ permettant la montée en fréquence. Les lignes d'accès RF sur le substrat sont optimisées pour avoir une meilleure adaptation. La figure ci-dessous montre la structure finale de la ligne encapsulée et reportée sur le substrat Duroid.

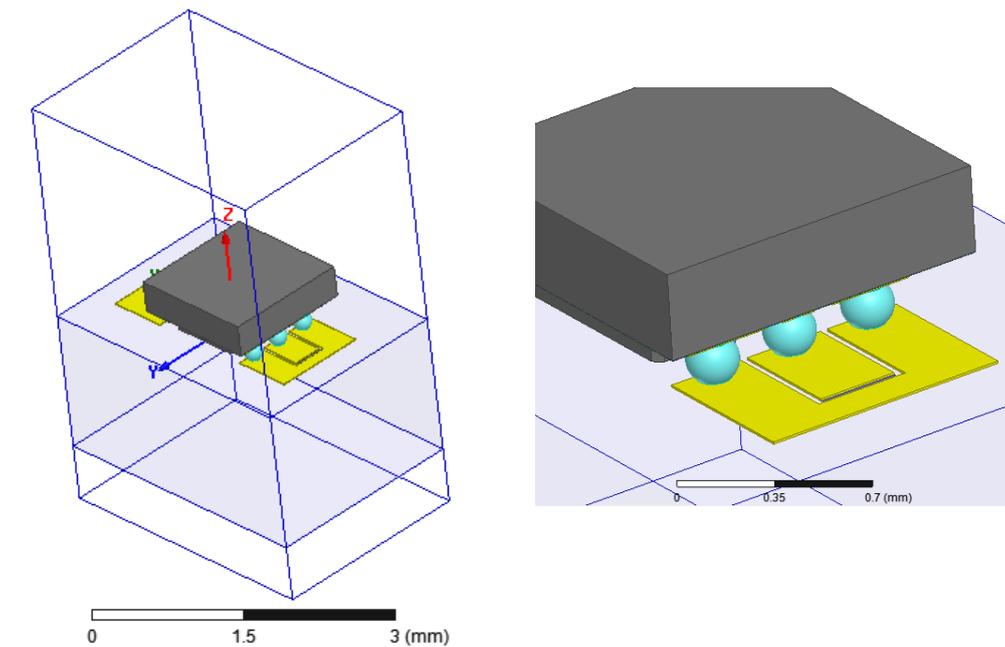


Figure 4-28 : Structure HFSS de la transition flip-chip conçue sur un substrat RT/Duroid 5880 avec des accès adaptés 50Ω .

Les résultats de simulations de la ligne encapsulée et reportée sur le Duroid 5880 sont présentés par la figure 4-29. Ces résultats montrent des pertes d'insertion inférieures à 0,43 dB et une adaptation meilleurs que 20 dB jusqu'à 40 GHz.

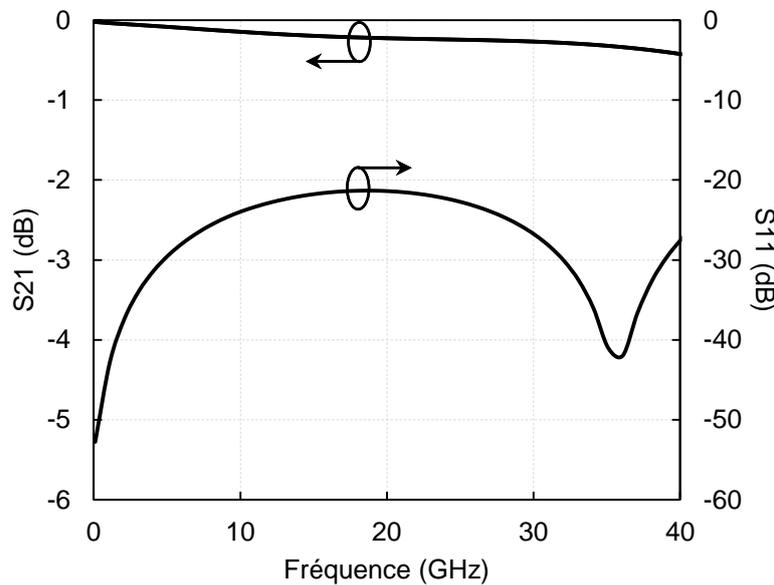


Figure 4-29 : Paramètres S simulés de la ligne encapsulée et reportée sur Duroid (RO5880).

4.7.3 Fabrication et mesure

Tout d'abord, il est nécessaire d'appliquer un flux de brasage aux endroits où seront connectées les billes pour assurer un bon mouillage de l'alliage sur les pads métalliques du PCB. Ensuite, la puce est reportée sur le substrat RT/Duroid 5880 et l'ensemble est amené à une température de 180°C. La valeur de la température et les temps de montée ont été optimisés pour assurer un mouillage optimal.

Les mesures RF de cette transition flip-chip sont effectuées sous pointes avec un analyseur de réseau vectoriel ZVA Rohde & Schwarz 10 MHz à 67 GHz avec une calibration SOLT (Short Open Load Thru). La figure 4-32 présente une comparaison des mesures entre la ligne encapsulée avant et après le report sur Duroid. Il en résulte des pertes d'insertion inférieures à 0,65 dB avec une adaptation meilleures que 20 dB sur toute la bande de fréquence. Ces résultats montrent aussi les faibles parasites en transmission (0,24 dB) générés par les billes. Les résultats sont conformes aux simulations.

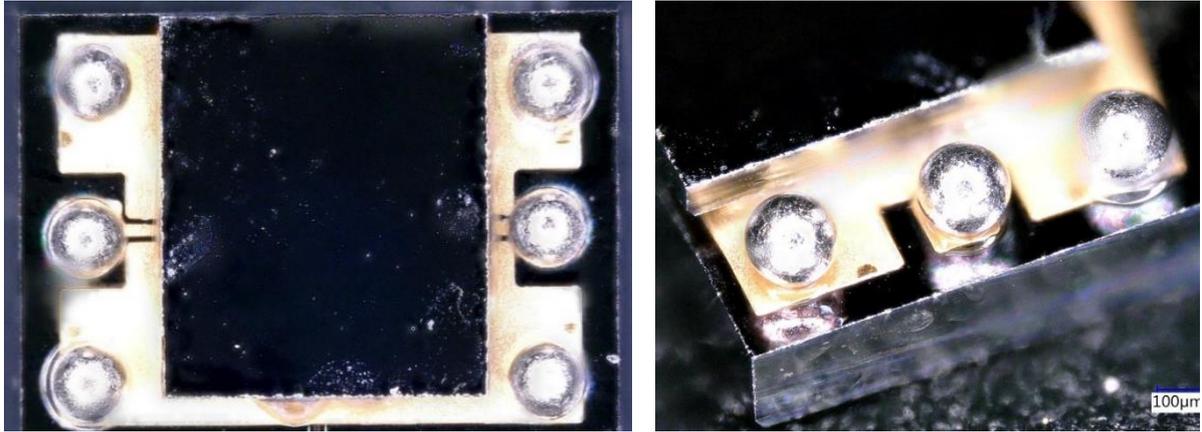


Figure 4-30 : Photo d'une ligne coplanaire encapsulée avec les billes de transition.

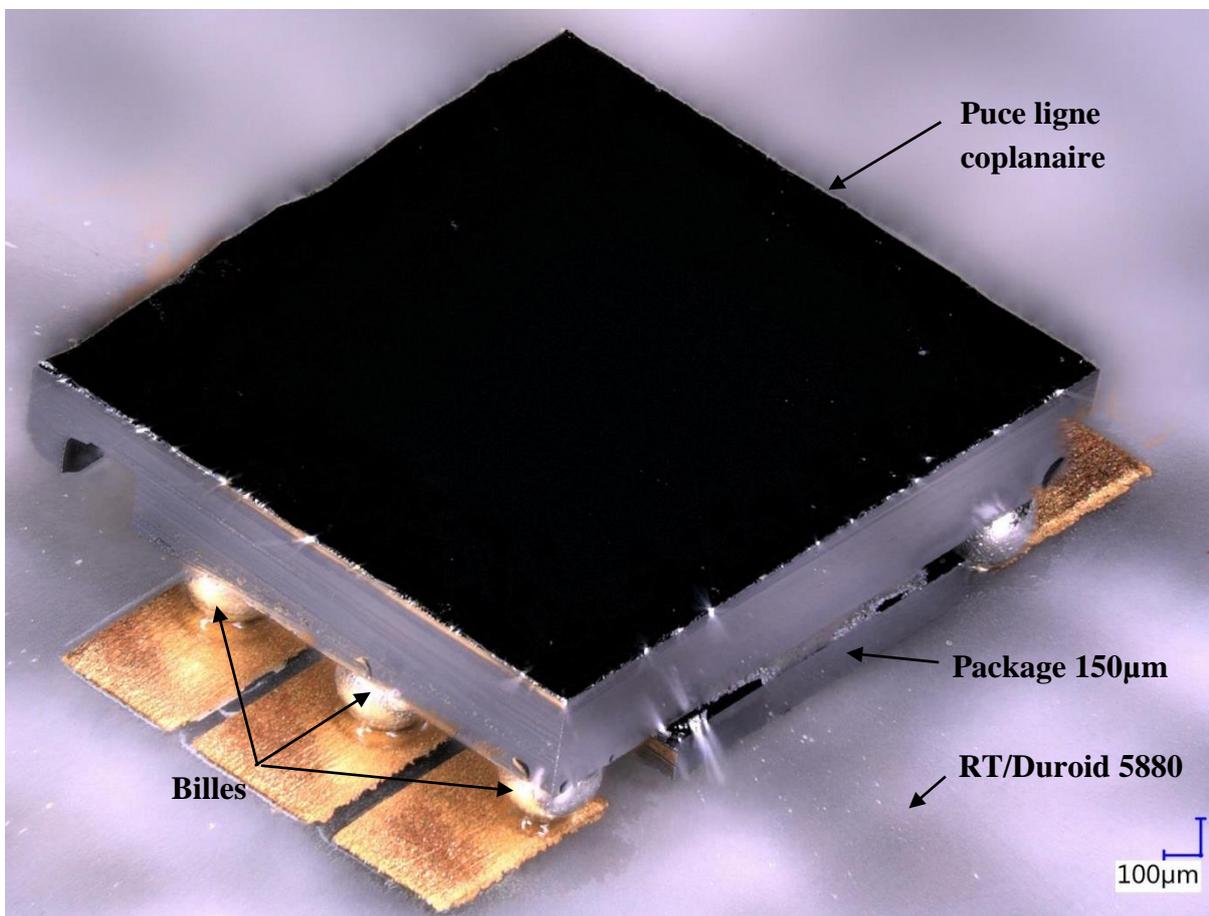


Figure 4-31 : Photo de la ligne coplanaire encapsulée et reportée sur un substrat RT/Duroid 5880.

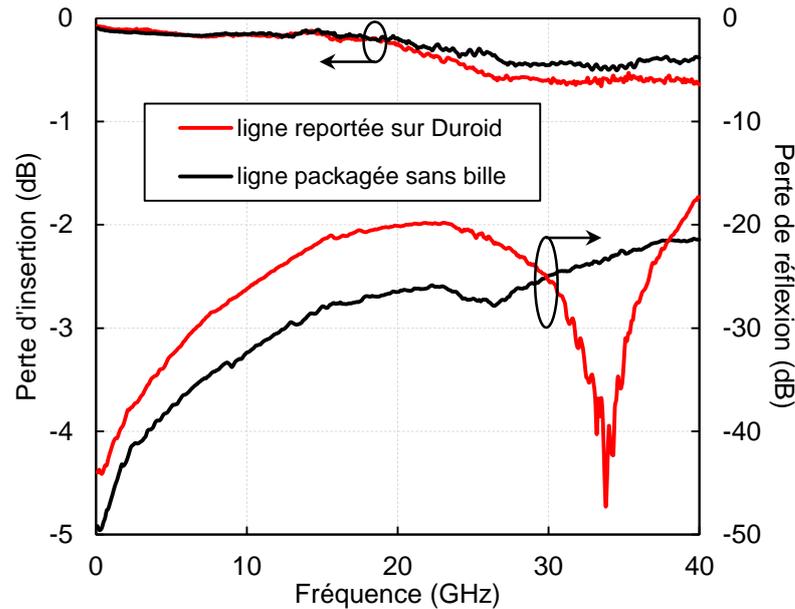


Figure 4-32 : Paramètres S mesurés de la ligne encapsulée avant et après report sur le substrat Duroid.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu la conception, l'optimisation et la réalisation d'une encapsulation par collage de tranche en utilisant un capot en silicium et un scellement par verre fritté. Des simulations à élément finis utilisant le logiciel Ansoft HFSS sont faites pour optimiser l'influence du package sur les performances RF du commutateur. Le procédé de fabrication du package a été présenté ainsi la caractérisation RF du commutateur encapsulé. Une mesure d'herméticité utilisant le test de fuite par Krypton 85 a été effectuée avec un taux de fuite de $8,8^{\circ}-12 \text{ atm.cc.s}^{-1}$. La fiabilité du commutateur a été encore étudié en utilisant un banc de mesure développé au sein de la société AirMems et montre 1 milliard de cycles avant d'arrêter le test.

La deuxième partie de ce chapitre a présenté une conception et réalisation d'un commutateur de type SPDT encapsulé par la technique de collage de tranche pour des applications de commutation large bande. Ce SPDT a montré une excellente isolation environ 40 dB et de faibles pertes d'insertion ($<0,8 \text{ dB}$) jusqu'à 30 GHz. Les mesures ont montré une bonne correspondance avec les simulations et sont révélant une vraie solution performante en compétition avec l'état de l'art des commutateurs (tableau 4-3). La dernière partie de ce chapitre a été consacrée de réaliser une transition flip-chip avec des faibles influences sur les

performances du commutateur allant jusqu'à 40 GHz. Cette transition a pour but de faciliter aux clients d'intégrer le composant facilement dans leurs cartes électroniques.

Publications relative au travail mené dans ce chapitre :

A.H Zahr, L.Y Zhang, C. Dorion, R. Stefanini, P. Blondy « A DC – 30 GHz Packaged RF MEMS SPDT switch» MEMSWAVE 2015.

Zahr, A.H.; Blondy, P.; Zhang, L.Y.; Dorion, C.; Stefanini, R.; Courtade, F.; Pressecq, F., "A DC-30 GHz high performance packaged RF MEMS SPDT switch," in Microwave Conference (EuMC), 2015 European, vol., no., pp.1015-1017, 7-10 Sept. 2015.

Conclusion générale

Les travaux de recherche réalisés dans ce manuscrit présentent la conception, l'optimisation, la fabrication et la caractérisation d'un commutateur MEMS-RF ohmique allant jusqu'à l'encapsulation niveau zéro du composant.

Le premier chapitre présente le principe de fonctionnement des commutateurs MEMS-RF, leurs performances et les avantages qui permettent à ces composants d'avoir un grand intérêt dans le domaine hyperfréquence. Les différents types d'encapsulation niveau zéro et leurs techniques de scellement les plus communément appliquées aux MEMS-RF ont été présentés. Il en existe deux types d'encapsulation : une encapsulation par des couches minces (WLTFP) qui existe sous plusieurs formes et qui fait partie du procédé de fabrication du composant. La deuxième encapsulation est par collage de tranche (WLP) et qui utilise un second substrat pour fabriquer les packages. Ainsi, nous avons présenté les différents tests de l'herméticité trouvés dans la littérature qui permettent à mesurer le taux de fuite de ces petits packages. Un état de l'art sur les différents composants MEMS-RF encapsulés a été présenté. À la fin de ce chapitre, un tableau de synthèse qui résume les techniques de scellement a été ajouté.

Le second chapitre a présenté une introduction générale sur le principe fondamental d'un actionnement électrostatique appliqué aux commutateurs MEMS-RF. Ensuite, une optimisation mécanique, thermique et électrique du commutateur d'AirMems a été effectuée pour avoir un commutateur robuste tout en obtenant une force de contact et une force de rappel élevées qui garantissent aussi une robustesse du contact électrique lors d'activations répétées du commutateur. Cette optimisation a permis d'obtenir une force de contact de 1,34 mN pour une tension d'activation de 70V, qui garantit de faibles pertes d'insertion grâce à une meilleure résistance de contact (de l'ordre de 1,5 Ω) et une force de rappel de 0,75 mN qui permet au commutateur d'éviter le phénomène de collage. De plus, les performances optimisées du commutateur en fonction de la température, de contraintes résiduelles, du gradient de contraintes ont été montrés. Le procédé de fabrication du MEMS, la caractérisation RF, la mesure de la linéarité, la mesure du temps de commutation et de relâchement ont été présentés.

Le troisième chapitre a présenté une solution d'encapsulation (WLTFP) en utilisant une couche mince métallique en or électrolysé pour former le capot qui protège le MEMS. Ensuite, une couche de nitrure de silicium a été déposée par PECVD pour sceller le capot. La première partie de ce chapitre a été consacrée à l'influence de ce capot métallique sur les performances

RF du commutateur. Dans la deuxième partie, une étude mécanique et thermique a été faite du capot pour évaluer la sensibilité de ce dernier aux contraintes mécaniques et de la température lors de la fabrication. Ensuite, nous avons étudié l'effet mécanique de deux diélectriques (SiN et SiO₂) qui peuvent être utilisés pour fermer les trous latéraux du capot. Enfin, une réalisation de cette encapsulation a été effectuée et les mesures des paramètres [S] ont montré que ce capot métallique a présenté de faibles effets parasites sur les performances du commutateur.

Le quatrième chapitre a présenté la deuxième solution d'encapsulation (WLP) en utilisant un deuxième substrat pour réaliser les capots qui protègent les composants MEMS-RF. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons montré l'influence du package sur une ligne coplanaire adaptée 50Ω pour valider les dimensions du package. Ensuite nous avons vu l'impact du package sur le commutateur optimisé. La deuxième partie de ce chapitre a présenté l'étape de fabrication, puis de mesures de performances du commutateur. Une caractérisation RF des paramètres [S] a été faite qui montre que le package n'a que très peu d'influence sur les performances du commutateur. Une mesure de taux de fuite en utilisant le test de fuite par Krypton 85 de la méthode 1014 de la norme américaine STD-830 a été effectuée avec un taux de fuite de 8,8°-12 atm.cc.s⁻¹. De plus, un test de fiabilité du commutateur encapsulé a pu être conduit à température ambiante et une commutation froide jusqu'à être arrêter sans défaillances.

Ce chapitre a présenté ensuite la conception et la réalisation d'un commutateur de type SPDT encapsulé par la technique de collage de tranche pour des applications de commutation large bande. Ce SPDT a montré une excellente isolation d'environ 40 dB et de faibles pertes d'insertion (< 0,8 dB) jusqu'à 30 GHz. Les mesures ont présenté une bonne correspondance avec les simulations et présentent une vraie solution performante par rapport à l'état de l'art des commutateurs RF.

Enfin, nous avons réalisé une transition flip-chip avec une faible influence sur les performances du commutateur jusqu'à 40 GHz. Cette transition a pour but de faciliter l'intégration du composant dans une carte électronique.

Références bibliographiques

- [1] S. Mao, S. Jones, and G. D. Vendelin, “Millimeter-Wave Integrated Circuits” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 3, no. 2, pp. 117–123, Jun. 1968.
- [2] K. H. Loh, D. L. Hiser, W. J. Adams, and R. L. Geiger “A robust digitally programmable and reconfigurable monolithic filter structure” in , IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1989, 1989, pp. 110–113 vol.1.
- [3] M. N. S. Swamy and K. S. Rao, “A tunable filter using amplifier pole” Proc. IEEE, vol. 63, no. 1, pp. 197–199, Jan. 1975.
- [4] C. Toumazou and D. G. Haigh, “Integrated microwave continuous-time active filters using fully tunable GaAs transconductors” in , IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1991, 1991, pp. 1765–1768 vol.3.
- [5] H. C. Nathanson and R. A. Wickstrom, “A RESONANT-GATE SILICON SURFACE TRANSISTOR WITH HIGH-Q BAND-PASS PROPERTIES” Appl. Phys. Lett., vol. 7, no. 4, pp. 84–86, Aug. 1965.
- [6] K. E. Petersen, “Micromechanical Membrane Switches on Silicon” IBM J. Res. Dev., vol. 23, no. 4, pp. 376–385, Jul. 1979.
- [7] L. E. Larson, R. H. Hackett, and R. F. Lohr, “Microactuators for GaAs-based microwave integrated circuits” in 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1991. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91, 1991, pp. 743–746.
- [8] G. M. Rebeiz and J. B. Muldavin, “RF MEMS switches and switch circuits,” IEEE Microw. Mag., vol. 2, no. 4, pp. 59–71, Dec. 2001.
- [9] C. D. Patel and G. M. Rebeiz, “A High-Reliability High-Linearity High-Power RF MEMS Metal-Contact Switch for DC - 40-GHz Applications,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 60, no. 10, pp. 3096–3112, Oct. 2012.
- [10] Macom switch PIN. [Online]. Available: <https://www.macom.com/ShuntPIN>.
- [11] SKYWORKS. [Online]. Available: http://www.skyworksinc.com/products_switches.aspx.
- [12] PSEMI. [Online]. Available: <http://www.psemi.com/products/rf-switches/pe42524>.
- [13] Triquint. [Online]. Available: <http://www.triquint.com/products/d/DOC-B-00000841>.
- [14] Radiall. [Online]. Available: <https://www.radiall.com/products/rf-microwave-switches.html>.
- [15] COM DEV. [Online]. Available: <http://www.meslmicrowave.com/phase-shifters-and-switches/latching-ferrite-switches/>.
- [16] G. M. Rebeiz, RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [17] Arthur S. Morris, III, Li Sun, Norlito Baytan, “Thin-film lid MEMS devices and methods” US20100032775 A1, 18-Apr-2016.
- [18] David I. Forehand and Charles L. Goldsmith, “Wafer Level micro-Encapsulation” MEMtronics Corporation, Plano, Texas, USA 75075.
- [19] F. Barriere et al., “Zero level metal thin film package for RF MEMS” in 2010 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), 2010, pp. 148–151.
- [20] C. Gillot, E. Lagoutte, P. L. Charvet, F. Souchon, and N. Sillon, “Wafer Level Thin Film Encapsulation for MEMS” in 2005 Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, 2005, pp. 1–4.

- [21] B. H. Stark and K. Najafi, “A low-temperature thin-film electroplated metal vacuum package” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 147–157, Apr. 2004.
- [22] O. Wunnicke et al., “Small, low-ohmic RF MEMS switches with thin-film package” in 2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011, pp. 793–796.
- [23] K. D. Leedy, R. E. Strawser, R. Cortez, and J. L. Ebel, “Thin-Film Encapsulated RF MEMS Switches” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 304–309, Apr. 2007.
- [24] J. Zekry, D. S. Tezcan, J. P. Celis, R. Puers, C. V. Hoof, and H. A. C. Tilmans, “Wafer-level thin film vacuum packages for MEMS using nanoporous anodic alumina membranes” in 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2011, pp. 974–977.
- [25] J. W. Lee, W. S. Wang, J. Sharma, Y. C. Lin, and N. Singh, “Nano Porous Gold as a Capping Layer for Thin Film Encapsulation,” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 22, no. 5, pp. 998–1000, Oct. 2013.
- [26] D. Saint-Patrice, J. L. Pornin, B. Savornin, G. Rodriguez, S. Danthon, and S. Fanget, “Low temperature sealing process for vacuum MEMS encapsulation,” in 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, 2012, pp. 97–101.
- [27] H. Kim and K. Najafi, “Characterization of Aligned Wafer-Level Transfer of Thin and Flexible Parylene Membranes” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 16, no. 6, pp. 1386–1396, Dec. 2007.
- [28] J. L. Pornin et al., “Thin Film Packaging atmosphere management by solder reflow sealing” in 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2015, pp. 1324–1330.
- [29] R. Gando et al. “Evaluation of gas permeability for micro-scale thin polymer film with encapsulated MEMS damped oscillator” in IEEE SENSORS 2014 Proceedings, 2014, pp. 970–973.
- [30] D. Forehand and C.L.Goldsmith, “Zero-Level Packaging for RF MEMS Switches,” *Govt Microcircuit Applications and Critical Tech Conf, San Diego California*, pp. 36–39, 2006.
- [31] David Forehand, “Low temperature wafer-level micro-encapsulation” US20040166606 A1, 18-Apr-2016.
- [32] Tony Ivanov, Julio Costa, and Jonathan Hale Hammond, “Integrated MEMS switch” US7745892 B1.
- [33] J. Costa et al., “Silicon RFCMOS SOI technology with above-IC MEMS integration for front end wireless applications,” in 2008 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2008, pp. 204–207.
- [34] V. Joshi et al., “A CMOS compatible back end MEMS switch for logic functions” in 2010 IEEE International Interconnect Technology Conference, 2010, pp. 1–3.
- [35] K. Najafi, “Micropackaging Technologies for Integrated Microsystems: Applications to MEMS and MOEMS,” *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 4979, 2003.
- [36] K. N. Bhat et al., “Wafer bonding - A powerful tool for MEMS” *Indian J. Pure Appl. Phys.*, vol. 45, no. 4, Apr. 2007.
- [37] M. M. Torunbalci, S. E. Alper, and T. Akin, “Wafer level hermetic sealing of MEMS devices with vertical feedthroughs using anodic bonding” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 224, pp. 169–176, Apr. 2015.
- [38] Y. T. Cheng, L. Lin, and K. Najafi, “A hermetic glass-silicon package formed using localized aluminum/silicon-glass bonding,” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 392–399, Sep. 2001.
- [39] T. J. Harpster and K. Najafi, “Field-assisted bonding of glass to Si-Au eutectic solder for packaging applications” in IEEE the Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto, 2003, pp. 630–633.

- [40] J. Mitchell, G. R. Lahiji, and K. Najafi, “Encapsulation of vacuum sensors in a wafer level package using a gold-silicon eutectic” in *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05.*, 2005, vol. 1, p. 928–931 Vol. 1.
- [41] A. Jourdain, S. Brebels, W. D. Raedt, and H. A. C. Tilmans, “Influence of 0-level packaging on the microwave performance of RF-MEMS devices” in *Microwave Conference, 2001. 31st European, 2001*, pp. 1–5.
- [42] M. F. Seonho Seok, “Enhancement of bonding strength of packaging based on BCB bonding for RF devices” *Microsyst. Technol.*, vol. 18, no. 12, 2012.
- [43] “MIL-STD-883.” [Online]. Available: <http://www.dsccl.dla.mil/downloads/milstd883/docs/mil-std-883/std883.pdf>.
- [44] P. M. Zavracky, S. Majumder, and N. E. McGruer, “Micromechanical switches fabricated using nickel surface micromachining” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 3–9, Mar. 1997.
- [45] S. Majumder, J. Lampen, R. Morrison, and J. Maciel, “A packaged, high-lifetime ohmic MEMS RF switch” in *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International, 2003*, vol. 3, pp. 1935–1938 vol.3.
- [46] A. Jourdain, H. Ziad, P. D. Moor, and H. A. C. Tilmans, “Wafer-scale 0-level packaging of (RF) MEMS devices using BCB,” in *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS 2003, 2003*, pp. 239–244.
- [47] J. Muldavin, C. Bozler, S. Rabe, and C. Keast, “Wide-band low-loss MEMS packaging technology” in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005*, p. 4 pp.-pp.
- [48] M. Fujii, I. Kimura, T. Satoh, and K. Imanaka, “RF MEMS Switch with Wafer Level Package Utilizing Frit Glass Bonding” in *Microwave Conference, 2002. 32nd European*, pp. 1–3.
- [49] I. Comart, K. Topalli, S. Demir, and T. Akin, “Microwave Characterization of a Wafer-Level Packaging Approach for RF MEMS Devices Using Glass Frit Bonding” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 6, pp. 2006–2011, Jun. 2014.
- [50] W. H. Ko, “Packaging of microfabricated devices and systems” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 42, no. 3, pp. 169–175, Nov. 1995.
- [51] D. Stroehle, “On the Penetration of Gases and Water Vapour into Packages with Cavities and on Maximum Allowable Leak Rates” in *Reliability Physics Symposium, 1977. 15th Annual*, pp. 101–106.
- [52] A. Goswami, B. Han, S. J. Ham, and B. G. Jeong, “Quantitative Characterization of True Leak Rate of Micro to Nanoliter Packages Using Helium Mass Spectrometer” *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 32, no. 2, pp. 440–447, May 2009.
- [53] S. Ruthberg, “Graphical Solution for the Back Pressurization Method of Hermetic Test” *IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 217–224, Jun. 1981.
- [54] John Newman and Steve Thayer, “Optical Leak Testing of Hermetic Semiconductor, MEMS and Optoelectronic Devices” *NorCom Systems Inc.*
- [55] A. Goswami and B. Han, “On ultra-fine leak detection of hermitic wafer level packages” in *56th Electronic Components and Technology Conference 2006, 2006*, p. 6 pp.-pp.
- [56] G. Elger, L. Shiv, N. Nikac, F. Muller, R. Liebe, and M. Grigat, “Optical leak detection for wafer level hermeticity testing” in *Electronics Manufacturing Technology Symposium, 2004. IEEE/CPMT/SEMI 29th International, 2004*, pp. 326–331.
- [57] Y. Tao and A. P. Malshe, “Theoretical investigation on hermeticity testing of MEMS packages based on MIL-STD-883E” *Microelectron. Reliab.* vol. 45, no. 3–4, pp. 559–566, Mar. 2005.

- [58] P. J. van der Wel et al., “Hermeticity testing of capacitive RF MEMS switches” in 2008 IEEE International Reliability Physics Symposium, 2008, pp. 691–692.
- [59] M. D. Suzanne Millar, “MEMS ultra low leak detection methods: A review,” *Sens. Rev. - SENS REV*, vol. 29, no. 4, pp. 339–344, 2009.
- [60] P. F. Berry and J. F. Cameron, “Detection and measurement of leaks in hermetically sealed electrical components using krypton 85” *Proc. IEE - Part Power Eng.*, vol. 109, no. 3, pp. 172–175, 1962.
- [61] “Reliability categories by application requirements” [Online]. Available: [http://downloads.semi.org/web/wstdsbal.nsf/4ea0c6bf3ded2c56882577930006621b/809ae8565481bb6d8825749b00295b82/\\$FILE/4446.pdf](http://downloads.semi.org/web/wstdsbal.nsf/4ea0c6bf3ded2c56882577930006621b/809ae8565481bb6d8825749b00295b82/$FILE/4446.pdf).
- [62] C. D. Patel and G. M. Rebeiz, “RF MEMS Metal-Contact Switches With mN-Contact and Restoring Forces and Low Process Sensitivity,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 59, no. 5, pp. 1230–1237, May 2011.
- [63] M. Fujii, I. Kimura, T. Satoh, and K. Imanaka, “RF MEMS Switch with Wafer Level Package Utilizing Frit Glass Bonding,” in *Microwave Conference, 2002. 32nd European, 2002*, pp. 1–3.
- [64] GE MEMS for LTE Advanced Mobile Devices, GE Global Research. [Online]. Available: <http://www.geglobalresearch.com/news/press-releases/ge-mems-switch-technology-demonstrates-performance-meet-demands-next-generation-true-4g-mobile-devices>. [Accessed: 16-Aug-2016].
- [65] H. H. Hsu, M. Koslowski, and D. Peroulis, “An Experimental and Theoretical Investigation of Creep in Ultrafine Crystalline Nickel RF-MEMS Devices” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 59, no. 10, pp. 2655–2664, Oct. 2011.
- [66] O. Rezvanian et al., “The role of creep in the time-dependent resistance of Ohmic gold contacts in radio frequency microelectromechanical system devices” *J. Appl. Phys.*, vol. 104, no. 2, p. 24513, Jul. 2008.
- [67] A. Tazzoli, M. Barbato, F. Mattiuzzo, V. Ritrovato, and G. Meneghesso, “Study of the actuation speed, bounces occurrences, and contact reliability of ohmic RF-MEMS switches” *Microelectron. Reliab.* vol. 50, no. 9–11, pp. 1604–1608, Sep. 2010.
- [68] Z. J. Guo, N. E. McGruer, and G. G. Adams, “Modeling and Measurement of the Dynamic Performance of an OHMIC Contact-Type RF MEMS Switch” in *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007*, pp. 651–654.
- [69] A. Alexeenko, S. Chigullapalli, J. Zeng, X. Guo, A. Kovacs, and D. Peroulis, “Uncertainty in microscale gas damping: Implications on dynamics of capacitive MEMS switches” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 96, no. 9, pp. 1171–1183, Sep. 2011.
- [70] C. Do, M. Cychowski, M. Lishchynska, and K. Delaney, “Dual-Pulse control to eliminate bouncing of Ohmic RF MEMS switch,” in *Signals and Systems Conference (ISSC 2010), IET Irish, 2010*, pp. 36–41.
- [71] E. Lemoine, C. Guines, A. Pothier, and P. Blondy, “Asymmetrical mechanical design for bouncing suppression in RF-MEMS switches” in *European Microwave Integrated Circuit Conference (EuMIC), 2014 9th, 2014*, pp. 656–659.
- [72] G. M. Rebeiz and J. B. Muldavin, “RF MEMS switches and switch circuits” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 59–71, Dec. 2001.
- [73] A. Verger, A. Pothier, C. Guines, P. Blondy, O. Vendier, and F. Courtade, “Nanogap MEMS micro-relay with 70 ns switching speed” in *2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2012*, pp. 717–720.
- [74] B. C. Joshi, G. Eranna, D. P. Runthala, B. B. Dixit, O. P. Wadhawan, and P. D., “LPCVD and PECVD Silicon Nitride for Microelectronics Technology” *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, pp. 303–309, Dec-2000.

- [75] P. Farinelli et al., “RF-MEMS SPDT switch on silicon substrate for space applications” in 2004 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2004. Digest of Papers, 2004, pp. 151–154.
- [76] Radant [Online]. Available: http://www.radantmems.com/radantmems.data/Library/Radant-Datasheet220HP_2.0.pdf.
- [77] M. Tang, A. Q. Liu, and A. Agarwal, “A compact DC - 20 GHz SPDT switch circuit using lateral RF MEMS switches” in 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 2005, vol. 2, p. 4 pp.-pp.
- [78] MAcom [Online]. Available: http://cdn.macom.com/DataSheets/ma4sw110_210_310.pdf.
- [79] RFMD [Online]. Available: http://www.rfmd.com/store/downloads/dl/file/id/29352/rf3021_data_sheet.pdf.
- [80] R. Goggin, P. Fitzgerald, B. Stenson, E. Carty, and P. McDaid, “Commercialization of a reliable RF MEMS switch with integrated driver circuitry in a miniature QFN package for RF instrumentation applications” in 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2015, pp. 1–4.
- [81] W. C. Wu, L. H. Hsu, E. Y. Chang, J. P. Starski, and H. Zirath, “60 GHz broadband 0=1-level RF-via interconnect for RF-MEMS packaging” *Electron. Lett.* vol. 43, no. 22, Oct. 2007.
- [82] D. Staiculescu, J. Laskar, and E. M. Tentzeris, “Design rule development for microwave flip-chip applications,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 48, no. 9, pp. 1476–1481, Sep. 2000.
- [83] J. J. Blech, “On Isothermal Squeeze Films” *J. Lubr. Technol.*, vol. 105, no. 4, pp. 615–620, Oct. 1983.
- [84] W. S. Griffin, H. H. Richardson, and S. Yamanami, “A Study of Fluid Squeeze-Film Damping” *J. Basic Eng.*, vol. 88, no. 2, pp. 451–456, Jun. 1966.
- [85] M. Andrews, I. Harris, and G. Turner, “A comparison of squeeze-film theory with measurements on a microstructure,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 36, no. 1, pp. 79–87, Mar. 1993.
- [86] T. Veijola, H. Kuisma, and J. Lahdenpera, “Model for gas film damping in a silicon accelerometer” in 1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago, 1997, vol. 2, pp. 1097–1100 vol.2.

Perspectives

Contrôle de la pression dans le package pour réduire le rebond

Nous avons vu dans le chapitre 2 que nous pouvons réduire le phénomène du rebond d'un commutateur MEMS-RF en jouant sur la hauteur d'un stoppeur plus haut que le dimple du contact RF en transférant l'énergie de contact restante vers ce stoppeur. Également, nous présentons dans cette partie une méthode applicable pour des commutateurs MEMS-RF encapsulés hermétiquement.

La réponse dynamique d'un commutateur MEMS-RF est donnée par le principe de d'Alembert dans (1),

$$m \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + D \cdot \frac{d z(t)}{dt} + k \cdot z(t) = -F_e \quad (1)$$

Où z est le déplacement de la poutre mobile, m est la masse effective de la poutre, D est le coefficient d'amortissement, k est la constante de raideur et F_e est la force électrostatique appliquée sur la poutre donnée par,

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V_{app}^2}{(g_0 + z(t))^2} \quad (2)$$

Pour résoudre cette équation différentielle non linéaire dont le but d'étudier le comportement du commutateur sous différentes conditions tels que la polarisation, la perte de l'énergie au niveau de contact et la pression localisée dans le package. Cette étude de rebond est faite en utilisant la méthode numérique de Taylor présentée par l'équation (3) pour résoudre l'équation (1) en créant un algorithme sous MATLAB pour compiler ces équations. La méthode est basée sur la série de Taylor se prête bien à des traitements numériques. Commençons par subdiviser l'intervalle $[t_0, t_0 + T]$ en N sous intervalles de même longueur h et appelons t_n les points de subdivision:

$$h = \frac{T}{N} \text{ et } t_n = t_0 + n \cdot h \text{ pour } n = 0, \dots, N \quad (3)$$

$$y_{(n+1)} = y_{(n)} + h \cdot y'_{(n)} + \frac{h^2}{2!} + \dots + \frac{h^m}{m!} y^{(m)}_{(n)}$$

Avec ce calcul, nous pouvons voir l'influence de chaque paramètre tel que la pression, la tension appliquée et le coefficient de restitution au niveau de contact.

En se basant sur les équations de Reynolds [83], [84], [85], le coefficient d'amortissement «D» appliqué pour des commutateurs MEMS-RF peut s'écrire sous la forme suivant,

$$D = \frac{3}{2\pi} \frac{\mu_e S^2}{g_0^3} \quad (4)$$

Où μ_e est la viscosité équivalente dérivée par Veijola et al [86] du gaz présenté dans la cavité.

Cette viscosité est donnée par l'équation suivante,

$$\mu_e = \frac{\mu}{1 + 9,638 K_n^{1,159}} \quad (5)$$

Où K_n est le nombre de Knudsen qui est une mesure de la viscosité du gaz (ou fluide) par-dessous de la poutre MEMS et est donnée par,

$$K_n = \frac{\lambda_a}{g_0} \quad (6)$$

$$\lambda_a = \frac{\lambda_0 P_0}{P_a} \quad (7)$$

λ_0 est le libre parcours moyen est (0.07-0.09 μm) pour la plupart des gaz à une pression et une température standard (STP est de 25 °C, 101 kPa, ou 760 torr), par contre, λ_a est le libre parcours moyen à une pression donnée P_a . Il serait intéressant d'étudier l'impact de la pression sur la dynamique (et donc la durée de vie du composant). En effet, comme le montre les simulations ci-dessous, une pression élevée diminue le nombre de rebonds.

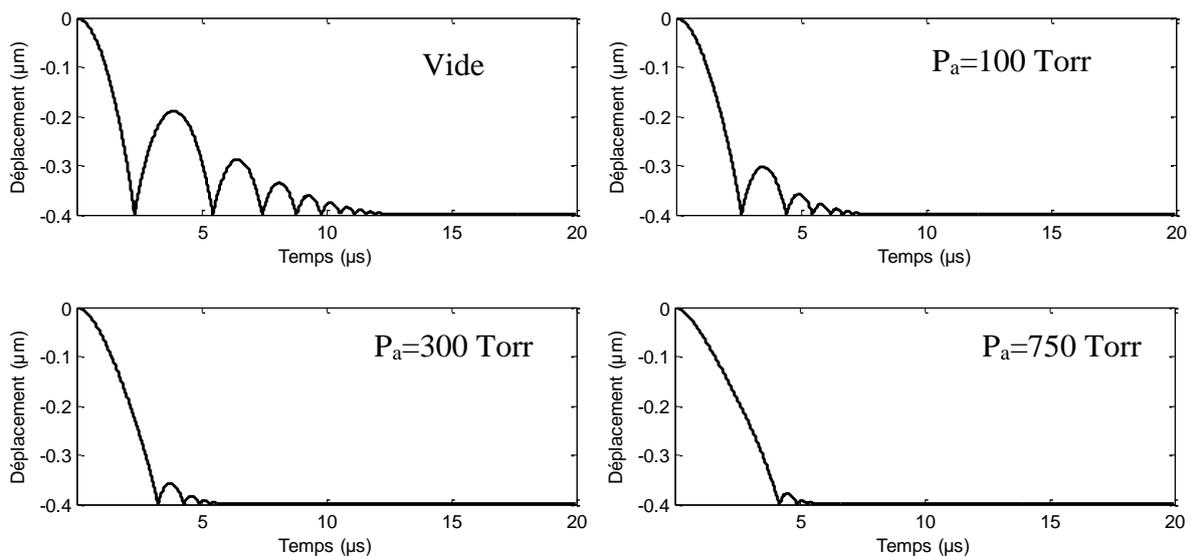


Figure 1 : Réponse dynamique du commutateur pour différentes pressions.

La miniaturisation de la puce

Actuellement, la taille de la puce fait 1,65x1,58 mm². Une des perspectives serait la miniaturisation du composant, en réalisant des vias dans le substrat pour créer l'interconnexion de l'entrée et de la sortie RF du commutateur avec une carte électronique (figure 2). Cette technique facilite l'intégration du composant puisqu'elle pourrait réduire la taille de la puce à 1x1mm². La figure 3 montre une simulation réalisée sur une ligne de transmission encapsulée avec sa réponse RF en utilisant des vias dans le substrat pour faire l'interconnexion.

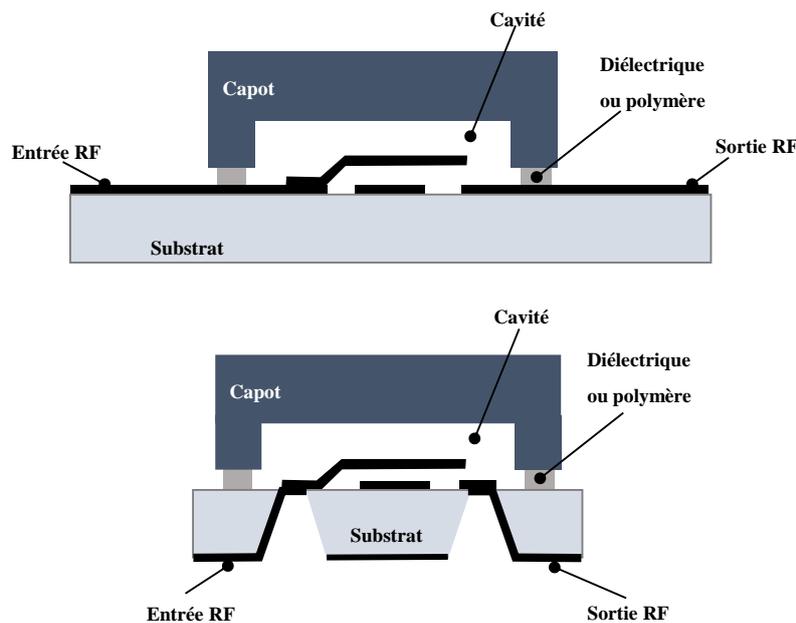


Figure 2 : principe de la miniaturisation de la puce.

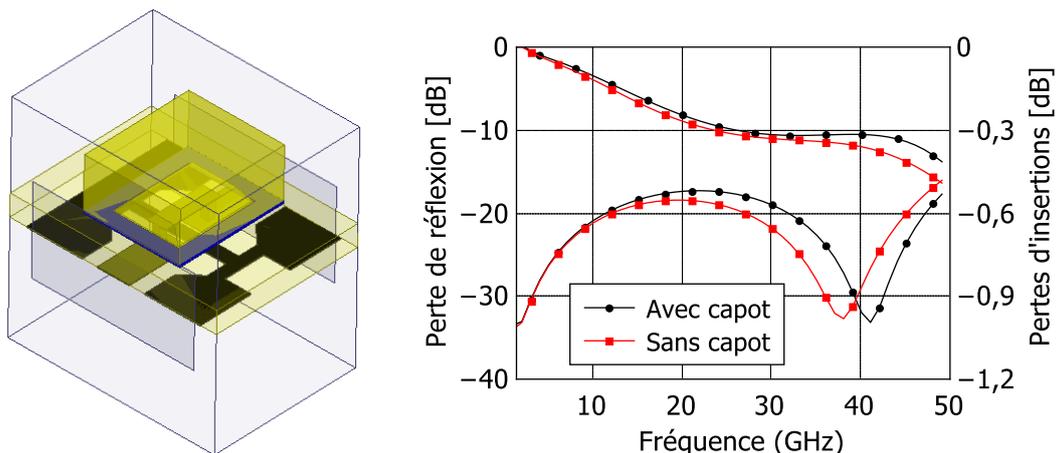


Figure 3 : Ligne de transmission encapsulée en utilisant l'interconnexion par des vias et sa réponse RF.

Dans la même logique, l'empilement 3D de MEMS packagés est un sujet d'étude encore peu répandu qui permettrait la réalisation de circuits, ou fonctions de commutation d'autant plus intégrées.

Bibliographie personnelle

Brevet

P. Blondy, R. Stefanini, L.Y. Zhang, and **A.H. Zahr**, "Study Microelectromechanical Switch," WO/2016/062956, 29-Apr-2016. (Disponible en Francais : Commutateur micro électro-mécanique robuste WO 2016062956 A1)

Membrane MEMS à ligne de transmission intégrée, R. Stefanini, P. Blondy, L.Y. Zhang, **A.H. Zahr**

Congrès internationaux

A.H Zahr, L.Y Zhang, C. Dorion, R. Stefanini, P. Blondy « A Low Parasitics Metal Thin Film Package for MEMS-RF switches » *MEMSWAVE 2014*.

R. Stefanini, **A.H Zahr**, L.Y Zhang, C. Dorion, P. Blondy « An MEMS-RF Switch for Defense and Space Applications» *MEMSWAVE 2014*.

A.H Zahr, L.Y Zhang, C. Dorion, R. Stefanini, P. Blondy « A DC – 30 GHz Packaged MEMS-RF SPDT switch» *MEMSWAVE 2015*.

Zahr, A.H.; Blondy, P.; Zhang, L.Y.; Dorion, C.; Stefanini, R.; Courtade, F.; Pressecq, F., "A DC-30 GHz high performance packaged MEMS-RF SPDT switch," in *Microwave Conference (EuMC), 2015 European*, vol., no., pp.1015-1017, 7-10 Sept. 2015

M. Ossama, C. Matthieu, **Z.A. Halim**, B. Pierre, C. Aurelian and J.C. Orlianges, "Elimination of spurious modes in zinc oxide micro-resonators by optimizing structure parameters," *2016 European Frequency and Time Forum (EFTF)*, York, 2016, pp. 1-3.

O. Mortada, **A-H. Zahr**, J-C. Orlianges, A. Crunteanu, M. Chatras and P. Blondy "Analysis and optimization of acoustic wave micro-resonators integrating piezoelectric zinc oxide layers" *Journal of Micromechanics and Microengineering*, (Awaiting Referee Reports).

Congrès nationaux

A.H Zahr, L.Y Zhang, C. Dorion, R. Stefanini, P. Blondy « Design, Simulation et Réalisation d'une encapsulation film-mince métallique pour MEMS-RF » *JNM 2015*

A.H Zahr, L.Y Zhang, C. Dorion, R. Stefanini, P. Blondy « Commutateur large bande (DC-40 GHz) et hautes performances à base de MEMS-RF» *JNM 2015*.

Optimisation et réalisation d'un package pour MEMS-RF

Le packaging des MEMS-RF est un sujet de recherche qui a été étudié de manière intensive ces dernières années. En effet, la fiabilité des composants micromécaniques est directement dépendante de l'humidité et de la poussière avoisinant la structure. C'est pourquoi la recherche d'un package parfaitement hermétique à très faible coût, sans influence sur les performances RF reste d'actualité, même si un grand nombre de publications et de solutions ont été présentées auparavant. Ces travaux de recherche porte sur la conception, la réalisation et la caractérisation de commutateurs MEMS-RF ohmiques packagés par deux techniques différentes. La première partie de cette thèse a été consacrée d'étudier une encapsulation par film mince. Une couche métallique d'or électrolysée est utilisée pour former le capot, ensuite le nitrure de silicium est utilisé pour sceller le capot. Cette technique a présenté plusieurs avantages où nous obtenons une petite taille, l'augmentation du nombre de composants par substrat tout en réduisant le cout de fabrication. Malgré tous ces avantages, cette technique engendre aux composants des faibles effets parasites sur leurs performances RF. La deuxième technique qui a été étudié dans ce travail, est l'encapsulation par collage de tranche. Le principe de cette encapsulation est de sceller un substrat de capots micro-usinés en silicium avec un substrat contenant les composants MEMS-RF. Ensuite, une découpe de deux substrats est nécessaire pour obtenir les commutateurs MEMS-RF encapsulés. Le scellement utilisé durant cette thèse était le glass frit qui garantit une très bonne herméticité. Des mesures d'herméticité sont faites par le CNES montrent que les commutateurs MEMS-RF sont encapsulés hermétiquement en indiquant un taux de fuite de $8.8e^{-12}$ atm.cc/s. Les performances RF du commutateur MEMS-RF sont déjà présentées et qui montrent que cette technique d'encapsulation ne présente aucune influence sur ces performances.

Mots clés : MEMS-RF, encapsulation par film mince, encapsulation par collage de tranche, herméticité, scellement.

Optimization and realization of package for RF-MEMS

RF MEMS packaging is an important research topic that is intensively studied for years. Indeed, Micro-mechanical devices that are protected from humidity, dust and working in a clean controlled atmosphere consequently improve their reliability. Meanwhile, the search for a perfectly hermetic package at very low cost with no influence on the RF performances is still a challenge even if a lot of publications and solutions have been presented so far. This research focuses on the design, realization and characterization of encapsulated RF MEMS switches using two different techniques. The first part of this thesis has been to study a Wafer Level Thin Film Packaging (WLTFP) using a metallic cap, then we have utilize the silicon nitride to seal this cap. This encapsulation technique presents several advantages where we have extremely small volume cavity, no double-wafer alignment required, and substantial increase in the number of devices per wafer reducing cost. Despite all these advantages, this technique generates to the components a low parasitic effects on their RF performances. Another type of packaging has been studied during this thesis is Wafer to Wafer Packaging. The principle of this encapsulation is to seal a micro-machined wafer of caps on the wafer containing RF MEMS switches to be protected. The both wafers are then cut together and we obtain directly the packaged switches. The RF MEMS packaging using this technique permits to obtain a hermetic package (leak rate of $8.8e^{-12}$ atm.cc/s measured by the French Space Agency-CNES) with no influence on the device characteristics. The RF characterization of the switch having a silicon cap bonded using a dielectric sealing paste have shown that the insertion loss in the ON state and the isolation in the OFF state is practically the same before and after capping.

Keywords: RF-MEMS, Thin Film Package, Wafer to Wafer package, hermeticity, seal.