

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

UFR :

En vue de l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : Microondes et Microtechnologie

**SIMULATION, CONCEPTION ET REALISATION D'UN
COMMUTATEUR EN TECHNOLOGIE MICROSYSTEME POUR
DISPOSITIFS LOGIQUES SECURITAIRES**

par

François CONSEIL

Ingénieur ISEN

Président

Alain CAPPY

Rapporteurs

Pierre BLONDY, Jean-Louis SANCHEZ

Examineur

Pascal ANCEY

Directeur de la thèse

Dominique COLLARD

Invités

Lionel BUCHAILLOT, Marie-France RAVAT

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé à l'IEMN (Institut d'Electronique, de Micro-électronique et de Nanotechnologies), dirigé par M^f A. CAPPY.

Je tiens tout d'abord à remercier M^{me} M.F. RAVAT et M^f P. DERDERIAN, commanditaire du projet, pour la confiance et le soutien (financier et humain) qu'ils m'ont témoignés durant ces trois années de thèse.

J'adresse tout particulièrement mes plus vifs remerciements à mon directeur de thèse, M^f D. COLLARD, à l'origine de ce sujet. Son enthousiasme et engagement ont été une grande source de motivation.

Je voudrais témoigner ma reconnaissance à M^f L. BUCHAILLOT, responsable du groupe microsystèmes Silicium, pour sa rigueur et non sa « rigidité ».

Merci à Bernard LEGRAND, chargé de recherche au CNRS, membre de l'équipe microsystème Silicium, pour sa disponibilité et le temps consacré à la lecture de ce manuscrit.

Je tiens à remercier très chaleureusement l'ensemble des équipes de technologie et de caractérisation de l'IEMN, qui mettent quotidiennement à disposition des chercheurs les outils nécessaires à leur travail.

Un grand merci à mes collègues de MBDA France, pour leur aide et leur collaboration, en particulier l'équipe de J.C RAMES pour la réalisation d'un certain nombre de mise en boîtier, utiles aux réalisations technologiques présentées dans ce manuscrit.

N'oublions pas mes collègues étudiants qui ont contribué grandement à l'ambiance active et détendue de notre groupe de recherche, en particulier les doctorants et « ex »doctorant : Emmanuel QUEVY, Vincent AGACHE, Olivier MILLET, Philippe BASSET, Philippe MULLER, Matthieu LAGOUGE, Jean-Baptiste BUREAU, Karim SEGUENI, Anne-Sophie ROLLIER et Quynh-huong DUONG.

Je témoigne toute ma gratitude à ma famille et mes amis qui m'ont soutenu. Enfin, je tiens à dédier ce travail à mon père.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
CHAPITRE I : CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	17
I. Introduction.....	18
II. Positionnement de l'étude et objectifs	21
III. Structure de la thèse.....	24
IV. Références	25
CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LES MICRO COMMUTATEURS.....	27
I. Introduction.....	28
II. Interrupteur à contact résistif.....	30
1. Actionnement électrostatique	30
a) Déplacement hors plan	32
b) Déplacement dans le plan.....	33
2. Actionnement électrothermique	34
c) Déplacement hors plan	36
d) Déplacement dans le plan.....	37
3. Actionnement piézoélectrique	38
4. Actionnement magnétique.....	40
5. Contact liquide	42
III. Interrupteurs à couplage capacitif.....	44
IV. Tableau récapitulatif des performances	46
V. Concept retenu et principes de base	47
VI. Références	52
CHAPITRE III : ETUDE THEORIQUE DE L'ACTIONNEMENT	55
I. Introduction.....	56
II. Préliminaires	58
1. Rappels sur les contraintes	58

2.	Étude d'une poutre multicouche.....	59
3.	Modélisation du chauffage par effet Joule d'une ligne multicouche suspendue.....	64
a)	Rappels sur le chauffage par effet Joule	65
b)	Résolution de l'équation de chaleur.....	67
4.	Modélisation de l'actionnement électrostatique dans le cas de plaques parallèles.....	68
III.	Etude théorique des dispositifs	74
1.	Etude de la distribution de température	74
2.	Etude de la déflexion	75
IV.	Modélisation des phénomènes vibratoires et accélérations.....	81
1.	Calcul de la fréquence de résonance.....	81
2.	Coefficient de transmission	82
3.	Modélisation d'une accélération.....	82
V.	Modélisation de l'actionnement électrostatique	84
1.	Tension d'effondrement	84
2.	Tension de décollement.....	86
VI.	Temps d'établissement.....	87
VII.	Comparaison simulation FEM et modélisation analytique.....	89
1.	Actionnement électrothermique.....	90
2.	Phénomènes vibratoires et accélération.....	93
3.	Actionnement électrostatique.....	94
VIII.	Conclusion	96
IX.	Références.....	98
 CHAPITRE IV : CONCEPTION DU MICRO COMMUTATEUR.....		101
I.	Introduction	102
II.	Définition des contraintes de fabrication	103
1.	Principaux moyens technologiques	103
a)	Pulvérisation cathodique.....	103
b)	Evaporation	103
c)	Dépôts chimiques.....	104
d)	Lithographie	104
e)	La gravure.....	104
2.	Recherche des matériaux utilisables.....	104
a)	Ligne à commuter et électrode enterrée	105

b)	Couche sacrificielle	105
c)	Contacteur.....	106
d)	Bilame	106
e)	Propriétés des matériaux.....	106
III.	Contraintes fonctionnelles.....	108
1.	Rappels	108
2.	Dimensionnement de l'actionneur.....	108
3.	Dimensionnement du contact.....	113
4.	Synthèse.....	114
IV.	Fabrication	117
V.	Structure de test in situ.....	124
1.	Rappel sur les contraintes.....	125
2.	Poutre cantilever monocouche : estimation du gradient de contrainte [3]	125
3.	Poutre bi-encastree : estimation des contraintes fixes en compression [4]	127
4.	Anneau dynamométrique : estimation des contraintes fixes en tension [4].....	128
5.	Poutre cantilever bilame : estimation des contraintes et coefficients de dilatation thermique [5] 129	
6.	Estimation de la résistivité	132
VI.	Conclusion	134
VII.	Références	136
CHAPITRE V : ASSEMBLAGE, PACKAGING ET TEST		137
I.	Introduction.....	138
II.	Assemblage et mise en boîtier	139
III.	Moyens de caractérisation.....	141
IV.	Mesures expérimentales portant sur les dispositifs.....	144
1.	Comportement sous charge thermique.....	144
2.	Comportement sous actionnement électrothermique.....	146
3.	Analyse de la température et courant de fonctionnement en fonction de la température ambiante 150	
4.	Déformation.....	152
5.	Comportement sous actionnement électrostatique.....	155
6.	Relaxation de contrainte	158
7.	Fréquence de résonance.....	163

8.	Influence de l'actionnement thermique sur le boîtier.....	164
9.	Evaluation de la résistance de contact.....	165
V.	Temps de commutation électrothermique	170
VI.	Conclusion	171
VII.	Références.....	172
CHAPITRE VI : FIABILITE		173
I.	Introduction	174
II.	Méthodologie.....	175
III.	Récapitulatif des causes de défaillance	177
1.	Fracture.....	177
2.	Fatigue.....	177
3.	Décollement et délamination.....	178
4.	Séchage.....	178
5.	Collage par adhésion.....	179
6.	Contamination particulaire	180
7.	Surcharge électrique et thermique	181
8.	Dégradation du diélectrique.....	181
9.	Environnement.....	183
10.	Fabrication.....	183
IV.	AMDEC.....	185
1.	Analyse fonctionnelle	185
a)	Etat ouvert	185
b)	Etat fermé	186
2.	Evaluation des causes et effets des modes de défaillance	188
a)	Etat ouvert	188
b)	Etat fermé	189
3.	Classification des modes de défaillance	190
V.	Conclusion	191
CHAPITRE VII : PERSPECTIVES ET CONCLUSION GENERALE.....		193
I.	Introduction	194
II.	Perspectives	195

1.	Optimisation	195
2.	Autres considérations.....	200
3.	Applications envisageables.....	202
III.	Conclusion générale	204
	ANNEXES	206
IV.	Description détaillée du procédé de fabrication	207
V.	Programme MATLAB	213
1.	Aperçu du programme	213
2.	Calcul de la déformation.....	214
3.	Interfaces graphiques.....	221
4.	Programme principal	228
VI.	Liste de publications	230

TABLE DES ILLUSTRATIONS (FIGURES)

Figure I-1 : Exemple de réalisation par usinage de surface [8]	20
Figure I-2 : Schéma de principe d'un DSMF	22
Figure II-1: Récapitulatif des performances de différents interrupteurs	29
Figure II-2 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électrostatique de type plaques parallèles [14].	31
Figure II-3 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électrostatique de type combdrive [15].....	32
Figure II-4 : Microrelais à actionnement électrostatique et déplacement hors plan [16]	33
Figure II-5 : Microrelais à actionnement électrostatique et déplacement plan [17].....	34
Figure II-6 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur thermique de type bilame [18].....	35
Figure II-7 : Schéma de fonctionnement de différents actionneurs thermiques dans le plan [19] [20] [21]	36
Figure II-8 : Microrelais à actionnement électrothermique et déplacement hors plan [22].....	37
Figure II-9 : Microrelais à actionnement électrothermique et déplacement hors plan [23].....	37
Figure II-10 : Microrelais à actionnement électrothermique et déplacement plan [24]	38
Figure II-11 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique de type bilame [25]	39
Figure II-12 : Microrelais à actionnement piézoélectrique et déplacement hors plan [26]	40
Figure II-13 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électromagnétique [27]	40
Figure II-14 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur magnétostrictif de type bilame [28]	41
Figure II-15 : Microrelais à actionnement magnétostrictif et déplacement hors plan [29].....	42
Figure II-16 : Microrelais à contact liquide [30].....	43
Figure II-17 : Membrane à actionnement électrostatique pour interruption capacitive [31].....	44
Figure II-18 : Poutre cantilever pour interruption capacitive et à actionnement électrostatique [32]	45
Figure II-19 : Schéma de principe de la première configuration de contact envisagée.....	49
Figure II-20 : Schéma de principe de la deuxième configuration de contact envisagée.....	50
Figure II-21 : Chronogramme du dispositif de type 1	51
Figure II-22 : Chronogramme du dispositif de type 2	51
Figure III-1 : Représentation schématique des contraintes dans un film mince	59
Figure III-2 : Représentation schématique d'une poutre déformée par les contraintes	60
Figure III-3 : Modélisation de l'allongement sous l'effet des contraintes.....	61
Figure III-4 : Modélisation du nouvel axe neutre	62
Figure III-5 : Représentation schématique du cantilever flambé par les contraintes initiales	63
Figure III-6 : Représentation du chauffage par effet Joule et des différentes voie de déperdition de chaleur	65
Figure III-7 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électrostatique de type plaques parallèles	69
Figure III-8 : Représentation graphique des forces exercées sur le dispositif	70
Figure III-9 : Représentation graphique de l'énergie totale du système dans le cas d'une tension faible ...	71
Figure III-10 : Représentation graphique des forces exercées sur le dispositif pour une tension d'actionnement supérieur à la tension d'effondrement	72
Figure III-11 : Représentation graphique de l'énergie totale du système pour une tension d'actionnement supérieur à la tension d'effondrement.....	72

Figure III-12 : Modélisation de la structure pour une approche analytique de la distribution de température	75
Figure III-13 : Modélisation de la structure pour une approche analytique de la déflexion initiale	76
Figure III-14 : Principe de la boucle itérative dans le calcul de la déflexion	80
Figure III-15 : Modélisation de la structure pour une approche analytique de l'influence d'une accélération.....	82
Figure III-16 : Tension d'effondrement d'une poutre encastree libre soumise à une charge électrostatique uniforme distribuée partiellement	84
Figure III-17 : Tension de décollement d'une poutre encastree libre soumise à une charge électrostatique	86
Figure III-18 : Illustration du temps d'établissement de la température et de son influence sur la déflexion.	88
Figure III-19 : Illustration des modélisations analytiques et FEM concernant l'influence du contacteur..	90
Figure III-20 : Comparaison des modèles (étude de la déflexion)	91
Figure III-21 : Comparaison des modèles (étude de la déflexion)	91
Figure III-22 : Comparaison des modèles (étude de la variation de température).....	92
Figure III-23 : Comparaison des modèles (étude de la variation de température).....	92
Figure III-24 : Comparaison des modèles (étude de la fréquence de résonance).....	93
Figure III-25 : Comparaison des modèles (étude de l'accélération).....	94
Figure III-26 : Illustration de l'actionnement électrostatique sous Coventorware	94
Figure III-27 : Erreur sur l'évaluation de la tension d'effondrement et de décollement	95
Figure III-28 : Schéma de principe de la modélisation	97
Figure IV-1 : Principales étapes de conception	102
Figure IV-2: Description des différentes couches constituant le microrelais	105
Figure IV-3 : Répartition de la densité de courant.....	109
Figure IV-4 : Déflexion pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 150 µm de longueur et 20 µm de largeur de bras.	110
Figure IV-5 : Déflexion pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 150 µm de longueur et 20 µm de largeur de bras.	110
Figure IV-6 : Déflexion pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 150 µm de longueur et 20 µm de largeur de bras.	111
Figure IV-7 : Déflexion pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 350 µm de longueur et 20 µm de largeur de bras.	111
Figure IV-8 : Variation maximale de température pour effectuer un contact en fonction du bilame utilisé et de la longueur pour une température ambiante de -40°C.	112
Figure IV-9 : Tension d'effondrement pour différentes configuration de bilame	113
Figure IV-10 : Tension de décollement pour différentes configuration de bilame	113
Figure IV-11 : Erreur par rapport à un dispositif sans contacteur (L=150µm et I=150mA)	114
Figure IV-12 : Désignation des parties fonctionnelles des dispositifs.....	115
Figure IV-13 : Dimension des dispositifs	116

Figure IV-14 : Exemple de dessin de masque	116
Figure IV-15 : Définition des plots contacts inférieurs et électrode fixe	117
Figure IV-16 : Planarisation de la couche sacrificielle	118
Figure IV-17 : Définition de la couche sacrificielle	119
Figure IV-18 : Définition du bushing.....	120
Figure IV-19 : Définition du contacteur.....	121
Figure IV-20 : Définition du bilame	122
Figure IV-21 : Représentation schématique des contraintes dans un film mince.....	125
Figure IV-22 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage de poutres cantilevers pour la mesure de gradient de contrainte.....	126
Figure IV-23 : Déflexion initiale mesurée pour différentes longueurs de poutre.....	127
Figure IV-24 : Gradient de contrainte mesuré pour différentes longueurs de poutre.....	127
Figure IV-25 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage de poutres bi-encastrées pour mesure la de contrainte en compression (1µm).....	128
Figure IV-26 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage d'anneaux dynamométriques pour la mesure de contrainte en tension (1µm).....	129
Figure IV-27 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage de poutres cantilevers bilames pour la mesure de coefficient de dilatation thermique (1µm).....	130
Figure IV-28 : Déflexion initiale sous une charge thermique de 0°C, 50°C et 100°C pour plusieurs longueurs de cantilever.....	131
Figure IV-29 : Motif de Hall	132
Figure IV-30 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage d'un microrelais de type 1 (contact central).....	134
Figure IV-31 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage d'un microrelais de type 2 (contact à l'extrémité).....	135
Figure IV-32 : Détail d'un microrelais, image obtenue par microscopie électronique à balayage	135
Figure V-1 : Réticule de test découpé puis mis en boîtier.....	139
Figure V-2 : Carte et boîtier de test.....	140
Figure V-3 : Bâti de test.....	141
Figure V-4 : Système de vibrométrie interférométrique.....	143
Figure V-5 : Configuration optique du système	143
Figure V-6 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante.....	145
Figure V-7 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante.....	146
Figure V-8 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante.....	146
Figure V-9 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de puissance.....	148

Figure V-10 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de puissance.....	149
Figure V-11 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de puissance.....	150
Figure V-12 : Evolution de la température maximale en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif.....	151
Figure V-13 : Evolution du courant de fonctionnement en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif.....	151
Figure V-14 : Image obtenue par microscopie interférométrique de la déformation d'un microrelais sous actionnement thermique (0, 25, 75 et 100 mA).....	152
Figure V-15 : Image obtenue sous binoculaire de la déformation d'un microrelais sous actionnement thermique (0, 50 et 100 mA).....	153
Figure V-16 : Vue en coupe de la déformation d'un microrelais, de 150µm de long, actionné électrothermiquement (image obtenue par microscopie interférométrique).....	153
Figure V-17 : Mesure de la déformation.....	154
Figure V-18 : Représentation schématique d'une structure en "U" subissant un actionnement électrothermique.....	154
Figure V-19 : Explication schématique du comportement de la structure à l'interface avec le substrat lors d'un actionnement électrothermique.....	155
Figure V-20 : Sans actionnement/Actionnement électrothermique/Actionnement électrothermique et électrostatique.....	155
Figure V-21 : Représentation schématique d'une structure en "U" subissant un actionnement électrothermique et électrostatique.....	156
Figure V-22 : Modélisation FEM de l'actionnement électrostatique sur un dispositif de 150 µm de long actionné de manière électrothermique (0, 75, 150V de tension d'actionnement).....	156
Figure V-23 : Modélisation de la tension d'effondrement.....	157
Figure V-24 : schéma de principe.....	159
Figure V-25 : Mesure de la déflexion d'un dispositif de 350 µm de long après application d'une charge thermique de 50°C.....	161
Figure V-26 : Détail de la relaxation.....	162
Figure V-27 : Détail de la recouvrance.....	162
Figure V-28 : Détail de l'effacement.....	163
Figure V-29 : Mesure de la fréquence de résonance d'un dispositif par microscopie interférométrique..	163
Figure V-30 : Mesure de la fréquence de résonance.....	164
Figure V-31 : Thermographie infrarouge du boîtier lors de l'actionnement d'un dispositif de 350 mm de long et traversé par un courant de 0, 50, et 75 mA (contact) et conduisant à une température théorique supérieure à 250°C.....	165
Figure V-32 : Thermographie infrarouge du boîtier sur trois points lors de l'actionnement d'un dispositif de 350 mm de long et traversé par un courant de 75 mA.....	165
Figure V-33 : Représentation schématique d'un contact.....	167

Figure V-34 : Représentation du problème de surface de contact (vue de profil puis de face)	169
Figure VI-1 : Méthodologie de l'AMDEC.....	176
Figure VI-2 : Exemple de fracture	177
Figure VI-3 : Exemple de décollement.....	178
Figure VI-4 : Illustration des phénomènes d'attraction au moment du séchage.....	179
Figure VI-5 : Exemple de stiction sur des poutres encastrées libres	179
Figure VI-6 : A gauche structure flambée, à droite structure collée.....	180
Figure VI-7 : Exemple de présence de particule	181
Figure VI-8 : Exemple de déformation permanente dans un actionneur bilame après un actionnement électrothermique.....	181
Figure VI-9 : Exemple de problème de recouvrement de marche lors d'un dépôt PECVD d'oxyde de silicium.....	184
Figure VI-10 : Identification des composants du système à l'état ouvert.....	186
Figure VI-11 : Identification des composants du système à l'état fermé	187
Figure VII-1 : Perspective de design.....	199
Figure VII-2 : Simulation numérique de la perspective de design.....	200
Figure VII-3 : Modification du courant d'actionnement en fonction de la température externe.	201
Figure VII-4 : Utilisation d'une redondance pour l'actionnement d'un relais	201
Figure VII-5 : Utilisation de portes logiques « AND » et « OR »	202

TABLE DES ILLUSTRATIONS (TABLEAUX)

Tableau I-1 : Lois d'échelles pour différentes grandeurs physiques [2]	19
Tableau I-2 : Spécifications environnementales.....	23
Tableau I-3 : Spécifications fonctionnelles	23
Tableau II-1 : Tableau récapitulatif des performances de microrelais à contact résistif	46
Tableau II-2 : Tableau récapitulatif des performances de microrelais à couplage capacitif.....	46
Tableau III-1 : Déflexion lue à l'extrémité du dispositif de type1 (contacteur à l'extrémité)	90
Tableau III-2 : Déflexion lue à l'extrémité du dispositif de type2 (contacteur en retrait).....	90
Tableau III-3 : Variation maximale de température pour un dispositif de type1 (contacteur à l'extrémité)	91
Tableau III-4 : Variation maximale de température pour un dispositif de type2 (contacteur en retrait).....	91
Tableau III-5 : Déflexion et fréquence de résonance.....	93
Tableau III-6 : Tension d'effondrement et de décollement d'une structure de longueur.....	95
Tableau IV-1 : Propriétés mécaniques des matériaux employés	107
Tableau IV-2 : Propriétés thermiques des matériaux employés	107
Tableau IV-3 : Propriétés électriques des matériaux employés.....	107
Tableau IV-4 : Méthodes de gravure des matériaux employés.....	107
Tableau IV-5 : Spécifications environnementales	108
Tableau IV-6 : Spécifications fonctionnelles.....	108
Tableau IV-7: Mesure de la déflexion et du gradient de contrainte d'une couche d'aluminium déposé par pulvérisation (1 μm)	126
Tableau IV-8 : Mesure de la déflexion et du gradient de contrainte d'une couche d'or déposé par pulvérisation (1 μm)	126
Tableau IV-9 : Propriétés des matériaux utilisés dans le modèle analytique	130
Tableau IV-10 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante	131
Tableau IV-11 : Modélisation analytique de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante avec un CET de 20.10^{-6} pour l'aluminium et $0,5.10^{-6}$ pour l'oxynitride de silicium.	131
Tableau V-1 : Nombre de réticules mesurés	144
Tableau V-2 : Mesure de la déflexion d'un bilame de 350 μm de longueur et pour différentes configurations de contact.....	145
Tableau V-3 : Mesure de la déflexion d'un bilame de 250 μm de longueur et pour différentes configurations de contact.....	145
Tableau V-4 : Mesure de la déflexion d'un bilame de 150 μm de longueur et pour différentes configurations de contact.....	145
Tableau V-5 : Ecart modélisé entre la déflexion avec et sans gradient de contrainte.....	147
Tableau V6 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes configurations de contact.....	147

Tableau V7 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes configurations de contact.....	148
Tableau V8 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes configurations de contact.....	149
Tableau V9 : Evolution de la température maximale en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif.....	151
Tableau V-10 : Evolution du courant de fonctionnement en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif.....	151
Tableau V-11 : Mesure de la déformation	153
Tableau V-12 : Mesure de la tension d'effondrement.....	156
Tableau V-13 : Modélisation de la tension d'effondrement	157
Tableau V-14 : Variables utilisées dans le calcul du temps de relaxation.....	158
Tableau V-15 : Mesure de la déflexion d'un dispositif de 350 μm de long sous une charge thermique de 50°C	161
Tableau V-16 : Mesure de la déflexion d'un dispositif de 350 μm de long après application d'une charge thermique de 50°C.....	161
Tableau V-17 : Mesure de la fréquence de résonance.....	164
Tableau V-18 : Variables et constantes utilisées lors de l'évaluation de la résistance de contact.....	166
Tableau VI-1 : Identification des modes de défaillance du système à l'état ouvert.....	186
Tableau VI-2 : Identification des modes de défaillance du système à l'état fermé	187
Tableau VI-3 : Evaluation des causes et effets des modes de défaillance du système à l'état ouvert	188
Tableau VI-4 : Evaluation des causes et effets des modes de défaillance du système à l'état fermé	189
Tableau VI-5 : Evaluation de la criticité et de la probabilité	190

Chapitre I : CONTEXTE ET OBJECTIFS

Cette partie introductive présente le sujet de recherche et expose le plan de ce manuscrit.

I.	Introduction	18
II.	Positionnement de l'étude et objectifs	21
III.	Structure de la thèse	24
IV.	Références.....	25

I. Introduction

Avec la mise au point des technologies de fabrication des circuits intégrés (CI) dans les années 1960, est apparue la faculté de fabriquer des objets micrométriques, en grand nombre et à faible coût. Par la suite, certains chercheurs ont envisagé d'utiliser ce mode de fabrication (dépôt de matière en film mince, photolithographie, gravure sèche ou humide, etc.) pour la conception de dispositifs dans le domaine de la mécanique, de l'optique et de la fluide. Leurs objectifs étant d'obtenir, par rapport aux systèmes conventionnels, une réduction de volume, une amélioration des performances, une diminution des coûts de fabrication, ainsi qu'un gain en fiabilité.

L'un des premiers articles faisant référence à une utilisation du silicium à des fins mécaniques, plutôt qu'électroniques, a été publié par Kurt Petersen en 1980 [1]. C'est ainsi que près de 20 ans après l'invention du circuit intégré, le premier micromécanisme en silicium a vu le jour. De nos jours, les microsystemes englobent une large gamme de produits dans de nombreux domaines. Les microsystemes ou systèmes microélectromécaniques se décrivent assez bien par leur nom : le terme «Micro» se réfère à la taille (d'un micromètre à un millimètre), «Electro» annonce que l'électricité ou l'électronique sont impliquées et «mécanique» que quelques parties mobiles devraient y être incluses. Les microsystemes se définissent donc par la réalisation d'un dispositif micrométrique intégrant ou combinant des éléments mécaniques avec de l'électronique sur un substrat commun.

Les trois principales caractéristiques de ces dispositifs sont :

- Une *miniaturisation* rendue possible par l'emploi des technologies de fabrication des circuits intégrés. Elle permet, grâce à une réduction de masse et de volume des éléments mécaniques, outre la résolution des problèmes d'encombrement, d'atteindre des performances attractives (fréquences de résonance élevées, temps d'établissement courts, sensibilités importantes, etc...). De plus, il est possible de co-intégrer sur un même substrat les fonctions de capteurs capables de mesurer les paramètres d'environnement (choc, accélération...) et d'actionneurs pouvant réagir sur le monde extérieur.

- Deuxième point, la *multiplicité* inhérente au mode de fabrication. Elle rend possible le traitement parallèle qui mène à une fabrication en grande quantité et à faible coût, c'est-à-dire la fabrication de plusieurs millions de composants facilement, rapidement et simultanément.
- Enfin, pour exploiter la miniaturisation et la multiplicité, une *électronique de commande* adaptée est nécessaire. Cette dernière fournit « l'intelligence » aux dispositifs et permet de contrôler les actionneurs ou de traiter le signal recueilli. Elle peut être fabriquée soit séparément soit en co-intégration du microsysteme.

La miniaturisation ne se résume pas seulement à une réduction d'échelle. Les équilibres physiques existants à l'état macroscopique ne le sont plus forcément lors du passage à l'échelle microscopique. Certaines forces négligeables dans un cas deviennent prédominantes dans l'autre, ou inversement. Par exemple, l'influence de la force de gravité dans le bilan des forces d'un objet micrométrique devient insignifiante, tandis que les forces de capillarité deviennent considérables. Le Tableau I-1 présente les lois de variation de certaines grandeurs physiques en fonction de la taille de l'objet considéré.

Grandeur physique	Loi d'échelle
Force de gravité	L^3
Force de Van Der Waals	L^{-7}
Force électrostatique	L^2
Puissance thermique transférée par conduction	L^1
Force magnétique sous champ extérieur	L^3

Tableau I-1 : Lois d'échelles pour différentes grandeurs physiques [2]

Les techniques de fabrication des microsystemes les plus couramment utilisées sont le micro-usinage de volume [3] et le micro-usinage de surface [4]. Elles sont issues des technologies de microfabrication de circuits intégrés [5] en ce sens qu'elles utilisent ces technologies en les modifiant afin d'obtenir l'outil d'usinage recherché. D'autres méthodes de fabrication sont disponibles pour la réalisation de microsystemes, elles comptent dans leurs rangs la technologie LIGA¹ [6] et les techniques de fabrication 3D

¹ LIGA : Lithographie Galvanoformung Abformung : Technique de formage de structure basée sur la réalisation d'un moule de nickel à partir d'une résine épaisse.

comme la microstéréolithographie² [7]. En général, les étapes de micro-usinage sont effectuées après la fabrication des circuits intégrés dans des fonderies commerciales : elles sont dites étapes de «postprocessing». Cependant, bien que la fabrication de la partie électronique et le micro usinage n'interfèrent pas dans le temps, cet usinage doit tâcher d'être compatible aux procédés de fabrication de circuits intégrés afin de ne pas endommager ni de modifier les caractéristiques électroniques des composants (par exemple, respecter un budget thermique).

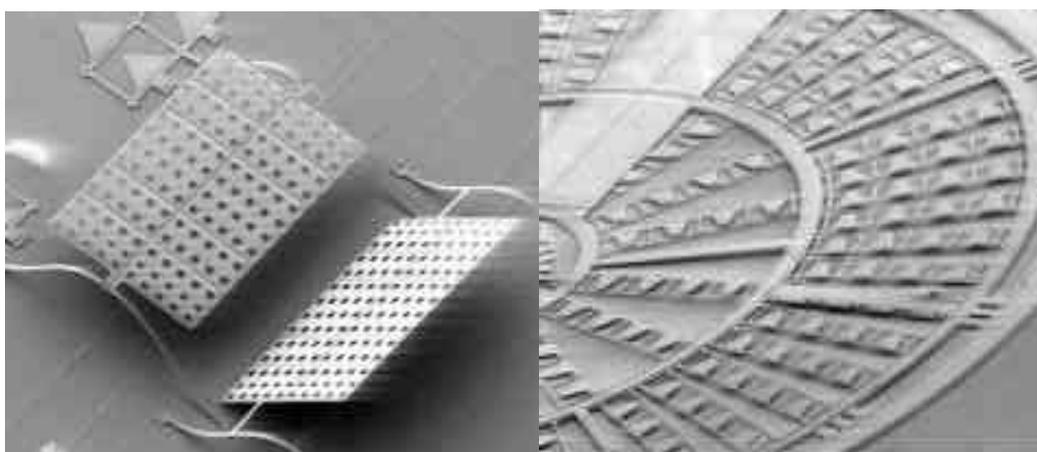


Figure I-1 : Exemple de réalisation par usinage de surface [8]

² Microstéréolithographie : La microstéréolithographie est un procédé de prototypage rapide permettant la réalisation d'objets en trois dimensions à partir d'une résine.

II. Positionnement de l'étude et objectifs

Le travail de thèse, ici exposé, vise à la réalisation en technologie microsysteme de dispositifs pouvant entrer dans la composition des Dispositifs de Sécurité et de Mise à Feu (DSMF) de missiles [9]. La principale mission d'un dispositif de sécurité et de mise à feu est de rester insensible aux agressions accidentelles pendant le stockage et l'emport, d'autoriser la mise à feu lorsque les conditions de sécurité requises sont toutes réunies et enfin de procéder à la mise à feu dans un délai voulu lorsque le système d'arme en a donné l'ordre.

Le fonctionnement du DSMF se réduit à quatre fonctions principales (Figure I-2) :

- Rendre inerte le système d'arme,
- Détecter l'environnement correspondant à l'engagement de l'arme,
- Passer d'un système inerte à un système armé,
- Procéder à la mise à feu sur ordre.

Pour toutes ces raisons, les technologies employées pour les DSMF sont traditionnellement des systèmes à base de mécanismes horlogères, d'électromécanismes simples et de petits pyromécanismes. Plus récemment, des dispositifs électroniques ont fait leur apparition. Ces DSMF sont toutefois volumineux et présentent certains problèmes de fiabilité.

De ce fait, les microsystemes présentent un très grand intérêt pour les applications embarquées, espace et armement. En effet, pour réaliser des fonctions similaires elle permet, sur une base de micromécanismes, une réduction du volume, des masses et des coûts, induite par le mode de fabrication fortement collectif. De plus, l'évaluation de la fiabilité des composants est rendue plus aisée par la possibilité d'en fabriquer simultanément un grand nombre et de les tester à grande échelle. Ces technologies permettent également de co-intégrer plusieurs fonctionnalités dans l'environnement du DMSF, telles qu'une base de temps, un accéléromètre ou un détecteur de choc.

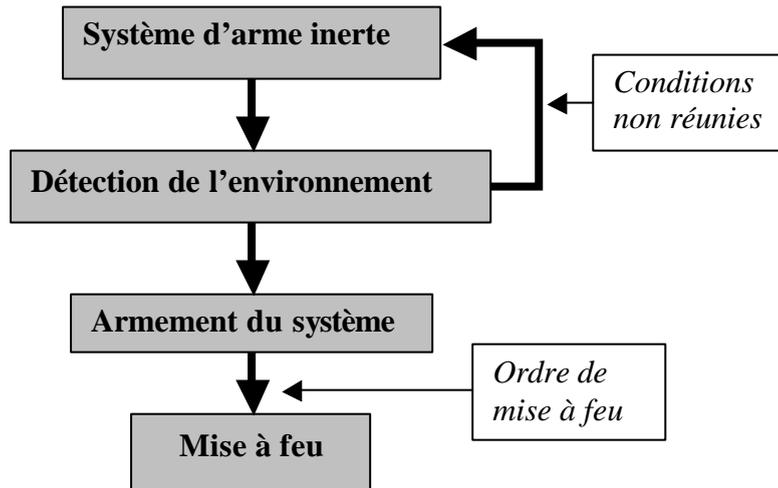


Figure I-2 : Schéma de principe d'un DSMF

L'étude présentée dans ce manuscrit a pour objectif la réalisation d'un dispositif de commutation en technologie microsystème. Cet élément de commutation a pour vocation d'intervenir dans la phase d'armement du DSMF. Les caractéristiques fonctionnelles et les modes de pannes de ces dispositifs sont différents de ceux des circuits électroniques généralement employés. Ceci permet donc, dans une approche système, de les associer éventuellement afin de répondre aux besoins particuliers que sont la sécurité et la fiabilité.

Les fonctions visées par ces microcommutateurs relèvent de l'armement du système. Elles géreront la mise en place de verrous et l'enchaînement d'étapes logiques à partir d'informations extérieures (libération du missile, temps de vol, détection d'impact...). Par exemple, elles permettront d'aligner/désaligner électriquement la chaîne de pyromécanismes dans le but de gérer une logique d'événements. Pour réaliser ces fonctions plusieurs configurations sont envisageables : court-circuiter les entrées électriques pour rendre inerte le système lors du stockage et du transport, ou amener l'alimentation nécessaire pour le passage d'un mode inerte à un mode armé. Ce projet est l'une des étapes visant à la réalisation, dans le futur, d'une nouvelle architecture de DSMF.

Les contraintes de fiabilité, dans ces conditions d'utilisation, sont bien évidemment très exigeantes. Cette étude s'intéressera donc également au développement d'architectures

de circuits en vue d'une amélioration globale de la fiabilité. Ceci passe par l'exploitation des techniques de redondance rendues possibles par le nombre de dispositifs réalisables simultanément et la mise en place de méthodes de test capables de profiter de ce parallélisme. Toutefois, la réalisation de la fonction de commutation, malgré l'environnement très versatile d'un DSMF, reste le principal défi apporté à ce sujet.

Les spécifications environnementales et fonctionnelles sont explicitées dans le Tableau I-2 et le Tableau I-3.

Température de fonctionnement	Entre -40°C et +100°C
Vibrations	.04g ² /Hz, 20 à 2000Hz, 10g rms, 30g max. (3σ)
Choc	300g

Tableau I-2 : Spécifications environnementales

Courant à commuter	>100mA
Consommation	>100mA
Tension autorisée	+/- 15V

Tableau I-3 : Spécifications fonctionnelles

III. Structure de la thèse

Après ce premier chapitre introductif, le deuxième a pour objet un état de l'art des dispositifs de commutation d'un signal électrique en technologie microsysteme. Cette étude bibliographique permettra en fin de chapitre d'aborder les principales caractéristiques du commutateur envisagé pour cette thèse.

Le troisième chapitre se rapporte à la modélisation analytique du fonctionnement du microcommutateur. Les équations analytiques développées dans ce chapitre seront confrontées à une analyse numérique afin de vérifier la validité des hypothèses.

Le chapitre quatre porte sur la phase de conception et de fabrication du microcommutateur. Ce chapitre définit, à partir des spécifications de fonctionnement, des contraintes de fabrication et des modélisations établies dans le chapitre précédent, les principales caractéristiques géométriques des actionneurs. Cette conception est suivie par une description détaillée du procédé de fabrication.

Dans le cinquième chapitre, l'assemblage, le packaging et les modes opératoires sont décrits préalablement avant de procéder à une analyse des résultats expérimentaux. Ces résultats portent sur les différentes configurations du dispositif.

Le sixième chapitre aborde l'aspect fiabilité avec une l'analyse des modes de défaillance (AMDEC³). L'AMDEC est une méthode inductive permettant d'évaluer les effets de chaque mode de défaillances et d'identifier ceux ayant des conséquences sérieuses sur la fiabilité.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation des perspectives de développement du dispositif et récapitule, en conclusion générale, les principaux résultats obtenus.

³ AMDEC : Analyse de Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités.

IV. Références

- [1] K.E. Petersen, 1980, "Silicon Torsional Scanning Mirror", IBM J. R&D, vol 24, p631
- [2] P. Tabeling, 2003, "Microfluidique", Belin
- [3] K.E. Petersen, 1982, "Silicon as mechanical material", In Proc IEEE p420-457
- [4] G.T.A Kovacs, et al, 1988, "Bulk micromachining of Si", In Proc IEEE vol 86
- [5] M. Mehregany, et al, 1988, "Integrated fabrication of polysilicon mechanisms", In J. Vac. Sci. Electron Devices, ED35
- [6] E. Becker, et al, 1986, "Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoforming, and Plastic Moulding (LIGA Process)", Microelectronic Engineering, vol 4, p35-56
- [7] K. Ikuta and K. Hirowatar, 1993, "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding", Proc MEMS '93, p42-47.
- [8] E. Quévy, L. Buchailot, D. Collard, 2001, "Realization and actuation of continuous membrane by an array of 3D self-assembling micro-mirrors for adaptive optics", Proceedings of the 14th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical system, 2001, p329-332
- [9] Norme OTAN non classifiée STANAG 3535

Chapitre II : ETAT DE L'ART SUR LES MICRO COMMUTATEURS

Cette partie dresse un état de l'art des dispositifs de commutation en technologie microsysteme. La fin de ce chapitre établit les principales caractéristiques du microrelais développé durant ce travail de thèse.

I.	Introduction	28
II.	Interrupteur à contact résistif.....	30
III.	Interrupteurs à couplage capacitif.....	44
IV.	Tableau récapitulatif des performances.....	46
V.	Concept retenu et principes de base.....	47
VI.	Références.....	52

I. Introduction

Les microsystemes connaissent depuis peu un incroyable essor et une part non négligeable des études concerne le développement des microrelais. Traditionnellement, les diodes PIN et interrupteurs FET sont les deux modes d'interruptions les plus utilisés dans le domaine des radios fréquences (RF) et des micro-ondes. Pour la commutation de puissance dans la gamme DC (continu) les relais conventionnels électromagnétiques ou ferriques sont préférés. La réduction d'échelle rendue possible par les microsystemes confère aux relais micromécaniques de nombreux avantages, que ce soit en terme de vitesse de commutation, de consommation et de taille. Ce type de dispositifs semble être, par ailleurs, une bonne alternative aux systemes conventionnels parce qu'il offre une méthode fiable de transfert de puissance avec peu de pertes et présente la possibilité d'être associé facilement avec une électronique de commande ou de traitement.

Les domaines d'application concernés par le développement des microrelais sont nombreux, on notera pour illustration qu'ils vont du domaine automobile à celui des télécommunications. Un nombre important de publications a déjà abordé la question des microrelais. On y trouve différentes architectures d'interrupteurs micromécaniques avec mises en action variés et des matériaux divers. La Figure II-1⁴ illustre à titre de comparaison les caractéristiques et performances de différentes technologies de relais.

Le panel des actionnements utilisables est considérable. On y trouve principalement l'actionnement électrostatique [1], électrothermique [2] et piézoélectrique [3]. Les structures de base, exploitées pour commuter une ligne, sont, elles aussi, très variées, elles incluent des poutres cantilever [4], des membranes [5], l'utilisation de billes de mercure [6] et même des lignes de transmission tournantes [7].

En ce qui concerne le mode de fabrication, on remarquera l'usinage de volume [8] qui permet l'obtention de microstructures suspendues par gravure chimique du substrat. Et l'usinage de surface [9] qui emploie l'empilement de couches minces et la gravure sélective pour définir une structure. Selon les applications envisagées et la technologie

⁴ Figure issue de « RF MEMS from a device perspective », J. Micromech. Microeng. **10** (2000) R9–R38.

employée, on peut choisir entre deux modes de déplacement pour l'élément mobile, le déplacement latéral ou «dans le plan» [10] et le déplacement vertical ou «hors plan» [11]. Les modes d'interruption envisageables sont soit de types résistifs [12], soit de type capacitif pour le domaine RF [13].

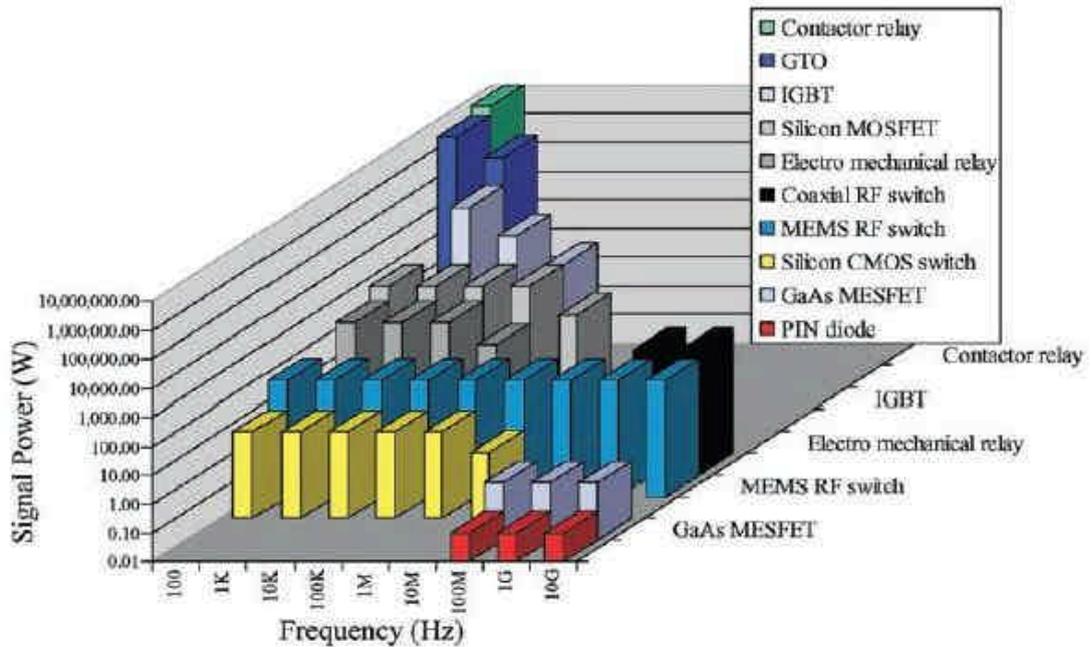


Figure II-1: Récapitulatif des performances de différents interrupteurs

La suite de ce chapitre propose de découvrir les architectures de microrelais les plus courantes, ainsi que de comprendre plus clairement les principaux mécanismes d'actionnement utilisés.

II. Interrupteur à contact résistif

Le relais à contact résistif permet la commutation de signaux dont la fréquence se situe dans une bande allant du continu aux hautes fréquences (supérieures au gigahertz). La large bande de fréquence utilisable de ce type de relais en fait l'un des plus employés. Les modes d'actionnement et les structures utilisables dans cette configuration sont très variés.

1. Actionnement électrostatique

L'actionnement électrostatique est le plus utilisé de par sa simplicité d'utilisation, et sa consommation (théoriquement) nulle en régime statique. Lorsqu'on applique une tension entre deux électrodes, celles-ci se trouvent sous une influence capacitive occasionnant une attraction électrostatique. Dans les champs électrostatiques, les charges apparaissent et disparaissent rapidement, ce qui permet d'obtenir des temps de fonctionnement très courts.

Cette force électrostatique peut s'exprimer de différentes manières. La première concerne les actionneurs en type « plaques parallèles » (Figure II-2) [14]. La force électrostatique générée est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant les électrodes. Ce qui requiert, pour éviter l'emploi de tensions d'actionnement trop importantes, l'utilisation de faibles distances de séparation. Lorsque la tension est suffisamment importante (tension d'effondrement), la force d'attraction l'emporte sur la force de rappel de la structure. On se trouve, à ce moment, dans un état instable où l'espace entre les électrodes n'est plus contrôlable. Les électrodes viennent, à ce moment, en contact.

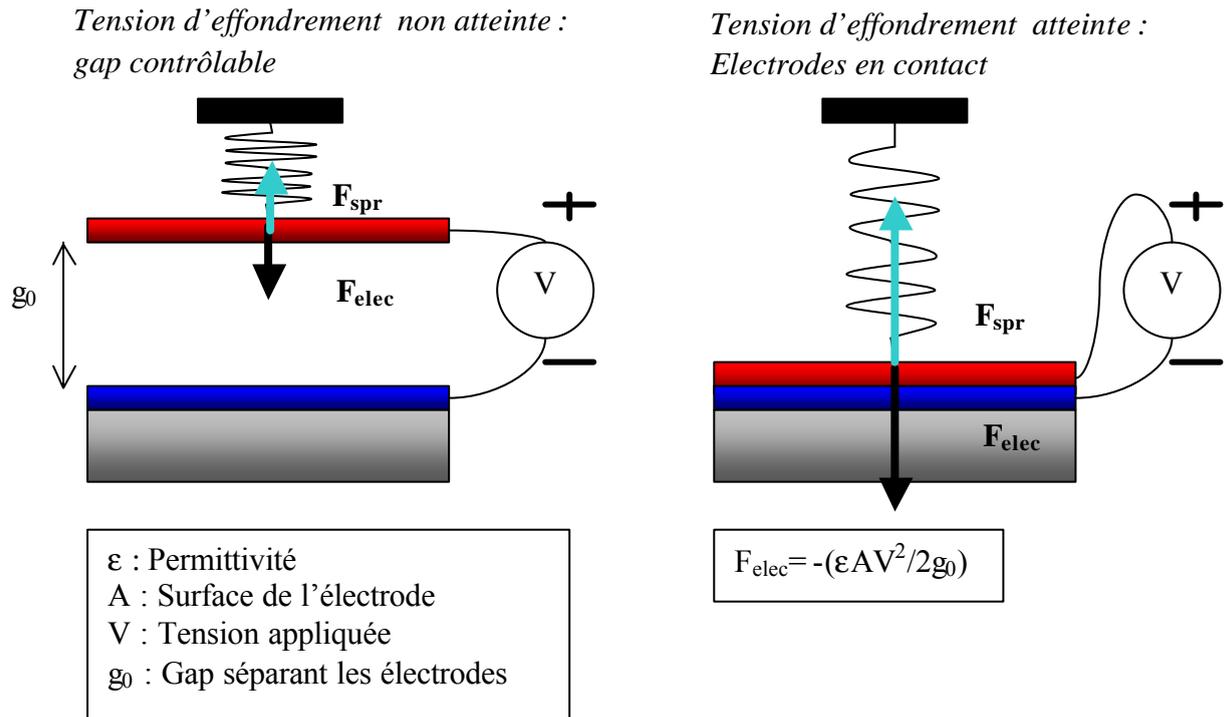


Figure II-2 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électrostatique de type plaques parallèles [14]

Un second principe d'actionnement électrostatique consiste en un dispositif en peignes interdigités (Figure II-3) [15]. La force électrostatique générée est directement proportionnelle au nombre de dents, elle est également inversement proportionnelle à l'espacement entre les dents du peigne. Lorsqu'on applique une différence de potentiel entre les deux électrodes, l'électrode mobile se déplace latéralement par rapport à l'électrode fixe. La force d'un actionneur à peignes interdigités reste constante à mesure que l'électrode mobile se déplace. Pour obtenir une force importante et à cause des limites technologiques et géométriques (épaisseur des matériaux déposés et profondeur des entrefers) ce type d'actionneur nécessite l'utilisation d'un nombre de doigts important. Il est cependant le mieux adapté pour des déplacements dans le plan.

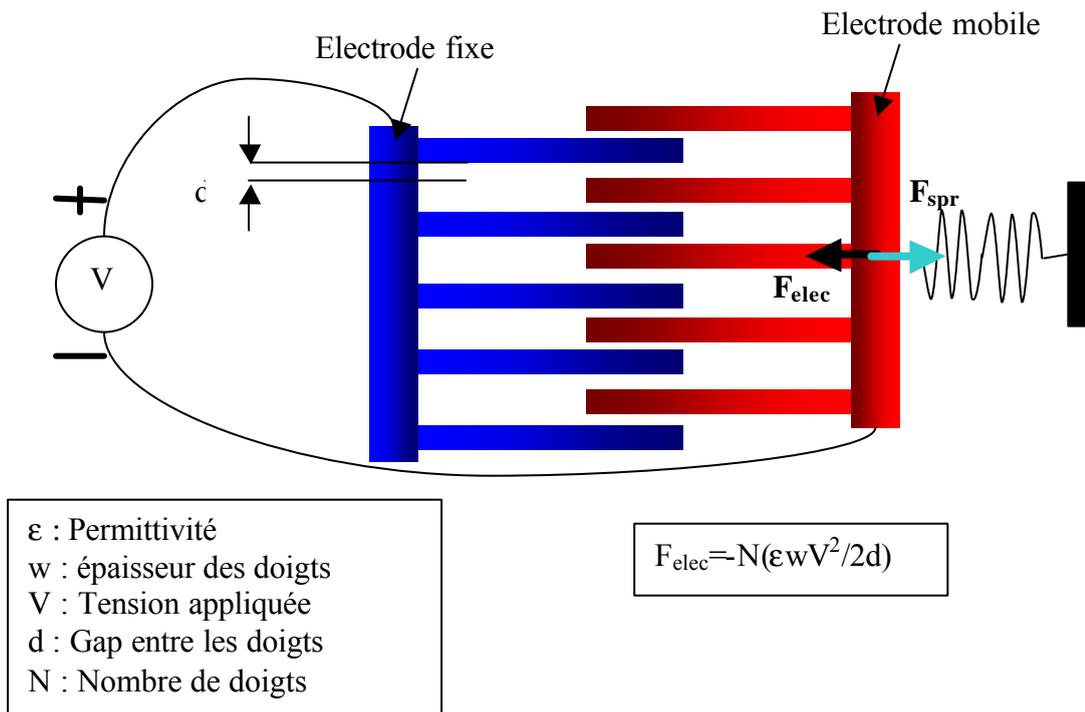


Figure II-3 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électrostatique de type combdrive [15]

a) Déplacement hors plan

Il existe de nombreux exemples d'interrupteurs électrostatiques hors plan. Deux types de structures sont communément utilisés : le cantilever et la poutre bi-encastée. L'ensemble structure et contre-électrode formant une capacité. La plupart de ces structures sont fabriquées par usinage de surface : une couche de polysilicium ou de métal sert généralement d'élément structurel et une couche de résine, d'aluminium ou d'oxyde de silicium de couche sert de couche sacrificielle.

Le dispositif suivant (Figure II-4) [16] présente un cantilever multicouche oxyde de silicium/or/oxyde de silicium, un contacteur métallique placé à son extrémité permet de commuter un signal électrique. La couche métallique supérieure du cantilever est utilisée comme électrode mobile, la contre-électrode est constituée par le substrat silicium. Les couches d'oxyde de silicium servent de couches isolantes empêchant les courts circuits entre les électrodes d'actionnement d'une part et entre le contact supérieur et l'électrode mobile d'autre part. Un flambement initial de la structure est induit par les contraintes résiduelles et permet une bonne isolation des lignes. En

appliquant une différence de potentiel entre l'électrode mobile et la contre électrode, une force électrostatique suffisante est créée pour que la barre de contact supérieure vienne s'aboucher avec les plots de contact.

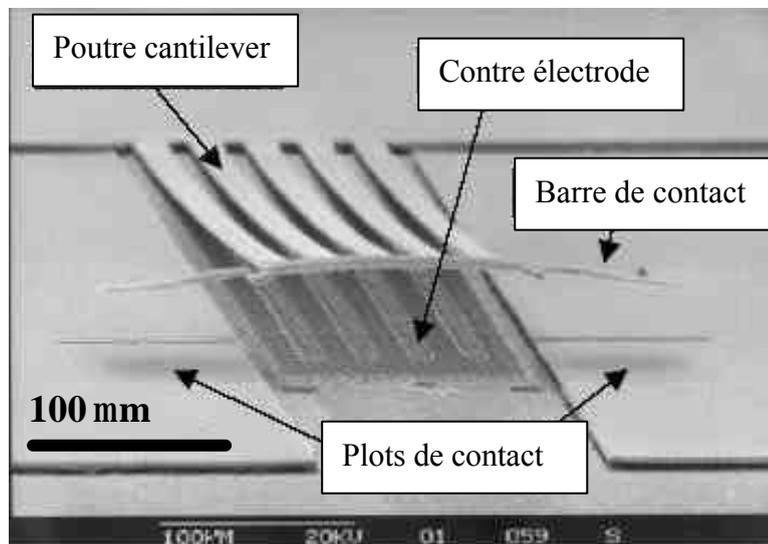


Figure II-4 : Microrelais à actionnement électrostatique et déplacement hors plan [16]

b) Déplacement dans le plan

De nombreux actionneurs électrostatiques latéraux utilisent également le principe des plaques parallèles décrit précédemment. La force électrostatique étant proportionnelle à la surface des électrodes en regard, la hauteur du matériau constituant les électrodes est un paramètre déterminant dans l'obtention d'une force importante. Pour ce faire, les techniques utilisées sont la gravure profonde ou la technologie LIGA.

Dans l'exemple qui suit (Figure II-5) [17], le microrelais utilise un actionnement électrostatique dans le plan. Pour générer la force électrostatique nécessaire au déplacement du cantilever, une différence de potentiel est appliquée entre deux électrodes l'une mobile (cantilever) et l'autre fixe. La structure tire également avantage de la forme de la contre électrode fixe (incurvée), celle-ci qui permet profiter d'un effet zip (fermeture rapide) diminuant ainsi la tension d'actionnement. Les plots de contacts se trouvent à l'extrémité du cantilever. Des plots d'arrêt sont judicieusement placés pour empêcher les électrodes d'actionnement d'entrer en contact, ceci pour éviter les courts circuits. La fabrication de ce relais s'effectue par gravure profonde du silicium d'un

substrat SOI (silicon on insulator) et nécessite seulement trois masques. Ce relais, à actionnement dans le plan, offre un très bon comportement en dynamique grâce à un ressort de rappel important, ainsi qu'une excellente isolation. Cependant, le temps de commutation est élevé (30 μs contre seulement 5 μs pour un actionnement hors plan).

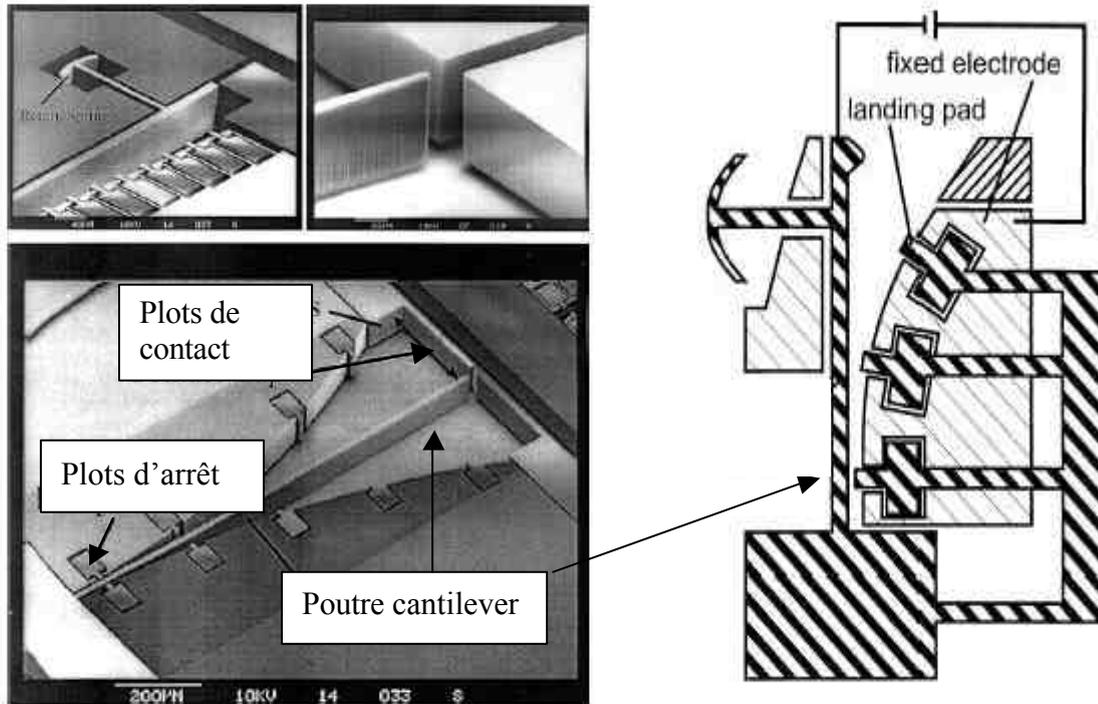


Figure II-5 : Microrelais à actionnement électrostatique et déplacement plan [17]

2. Actionnement électrothermique

L'actionnement électrothermique est également très employé dans le domaine des microsystemes. Il permet de générer des forces importantes, de l'ordre du millinewton, ce qui rend son utilisation intéressante dans le cas de grands déplacements. Selon le principe de la dilatation thermique des matériaux, lorsqu'un matériau est chauffé et qu'il n'a pas moyen de dissiper la chaleur facilement, les atomes de la couche deviennent excités, provoquant ainsi la dilatation de la couche. Un matériau de volume V , sous une variation de température ΔT , verra son volume augmenter d'une quantité $\alpha V \Delta T$, où α correspond au coefficient de dilatation thermique. Par le biais d'une source de chaleur contrôlable, l'actionnement électrothermique met à profit le changement de volume d'un matériau pour générer des déplacements.

La réduction d'échelle permise par les microsystèmes en fait un actionnement intéressant car les variations de température sont rapides pour de faibles volumes. Cependant, un tel actionnement consomme plus de puissance qu'un actionnement électrostatique. De plus, la répétitivité des déplacements n'est pas assurée (évolution des propriétés des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une forte température).

La structure la plus couramment exploitée est celle d'un cantilever constitué d'un empilement de couches de coefficients de dilatation thermique (CDT) différents. Lorsque les matériaux du cantilever sont chauffés, la différence entre les CDT génère un déplacement vertical proportionnel à l'énergie thermique appliquée. Par exemple, pour un bilame, chacune des couches chauffées va subir une augmentation de longueur respective ΔL_1 et ΔL_2 avec $\Delta L_1 < \Delta L_2$. Cependant, la relation de continuité à l'interface des couches transforme ces allongements en un gradient de contraintes. Ce gradient peut se résumer à une charge F appliquée à l'extrémité de la poutre (Figure II-6) [18].

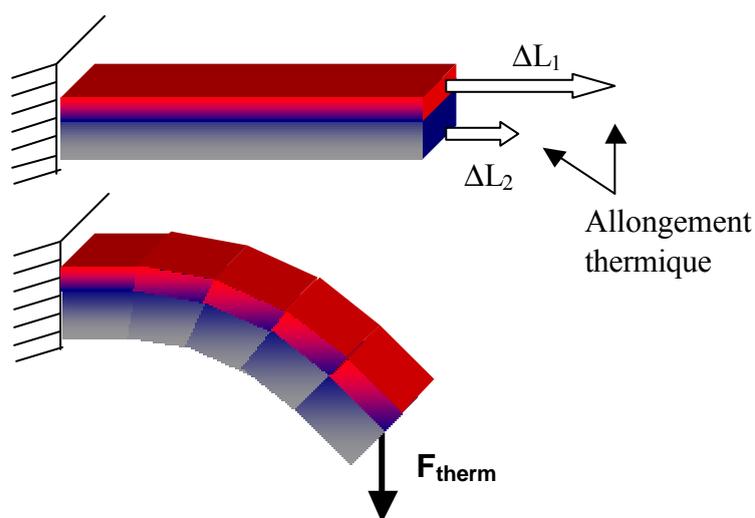


Figure II-6 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur thermique de type bilame [18]

Parmi les mécanismes travaillant dans le plan, plusieurs procédés existent. La plupart sont basés sur la génération d'un gradient de température suite au passage d'un courant. En effet, une modification géométrique de la structure (Figure II-7a) [19] ou un changement de la résistivité du matériau [20] (Figure II-7b) provoque, par une variation de la résistance électrique, un gradient de température. Ce gradient a pour conséquence la génération d'un mouvement latéral provoqué par la différence de dilatation thermique

entre le côté « chaud » et le côté « froid ». D'autres mécanismes utilisent une forme géométrique particulière (généralement en « V »), non pas pour changer la valeur de la résistance électrique, mais pour amplifier la déformation produite par dilatation thermique [21] (Figure II-7c).

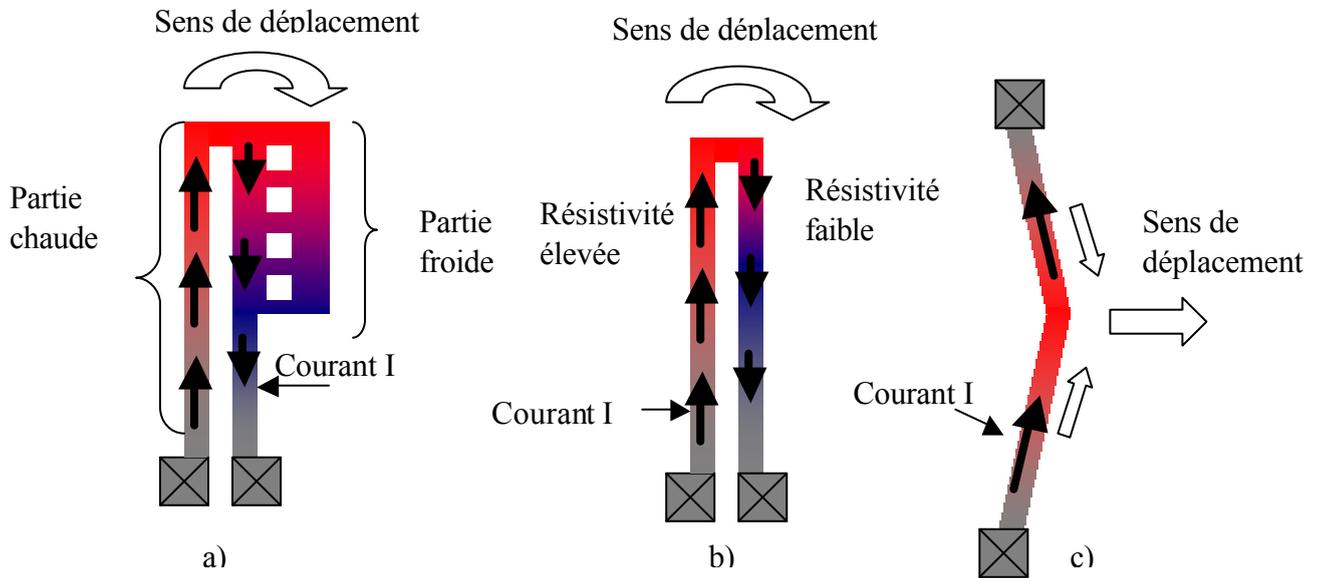


Figure II-7 : Schéma de fonctionnement de différents actionneurs thermiques dans le plan [19] [20] [21]

c) Déplacement hors plan

Dans l'exemple suivant (Figure II-8) [22], la structure utilise un cantilever bilame en U. La poutre cantilever est composée d'un empilement d'une couche d'oxyde de silicium et d'un siliciure ($TaSi_2$). Un flambement initial, dû aux contraintes résiduelles des différentes couches composant le relais, permet d'obtenir une bonne isolation. Le coefficient de dilatation thermique du siliciure est plus important que celui de l'oxyde de silicium et comme le passage d'un courant à travers la structure provoque une augmentation de température par effet Joule, un déplacement vertical en direction de la ligne à commuter est observable. Pour une température suffisante, le contact électrique est accompli. Dans cet exemple l'actionnement électrothermique est complété par un actionnement électrostatique. Le matériau constitutif du contact et de la ligne à commuter est l'or.

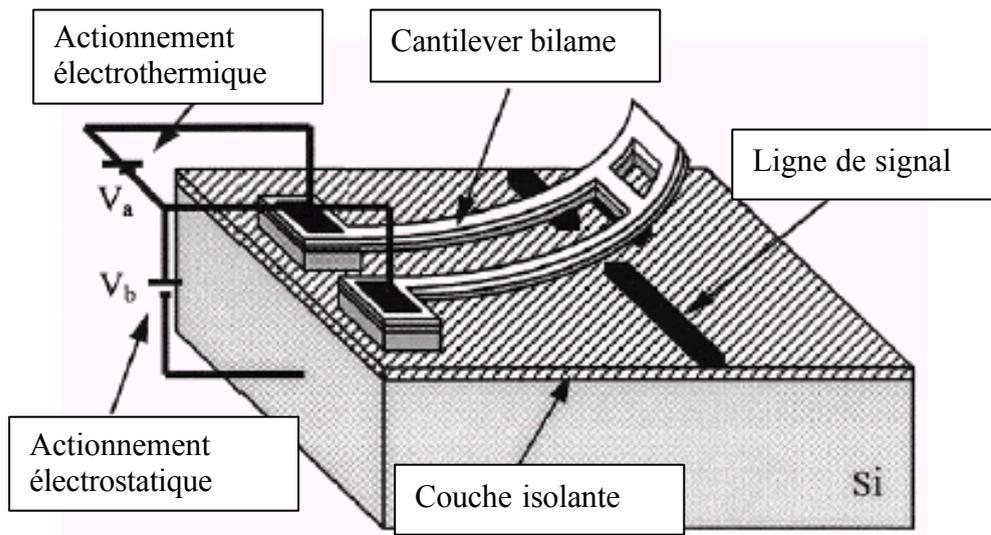


Figure II-8 : Microrelais à actionnement électrothermique et déplacement hors plan [22]

Un second exemple (Figure II-9) [23], utilisant le même principe consiste en une poutre bi-encastée. Elle est formée d'une couche d'oxyde de silicium, d'une partie métallique (pour l'effet bilame), et d'un élément chauffant située à l'intérieure de l'oxyde. L'effet bilame est complété par un actionnement électrostatique pour verrouiller le contact.

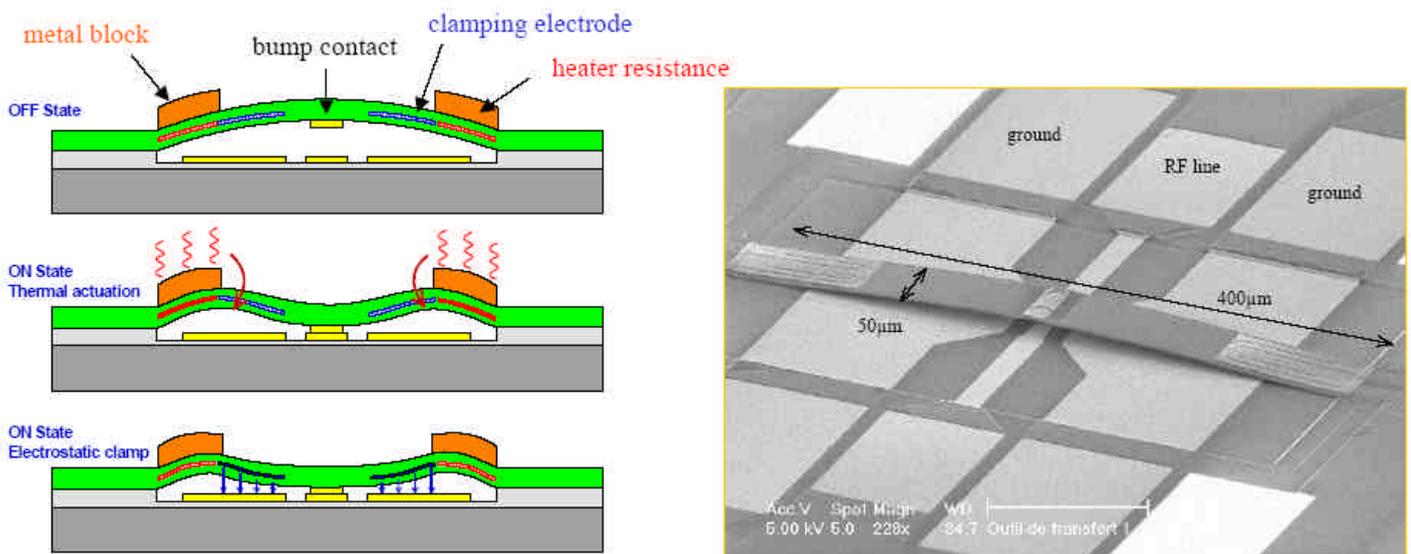


Figure II-9 : Microrelais à actionnement électrothermique et déplacement hors plan [23]

d) Déplacement dans le plan

L'exemple qui suit (Figure II-10) [24] présente une structure en polysilicium en forme de chevron. Cet aspect, comme expliqué précédemment, amplifie les déformations

proportionnellement à l'angle formé par les bras. Lorsqu'un courant est appliqué à travers la structure, il s'en suit une augmentation de température et l'expansion thermique du matériau. Cette élévation provoque un déplacement latéral jusqu'à l'établissement du contact avec la ligne à commuter.

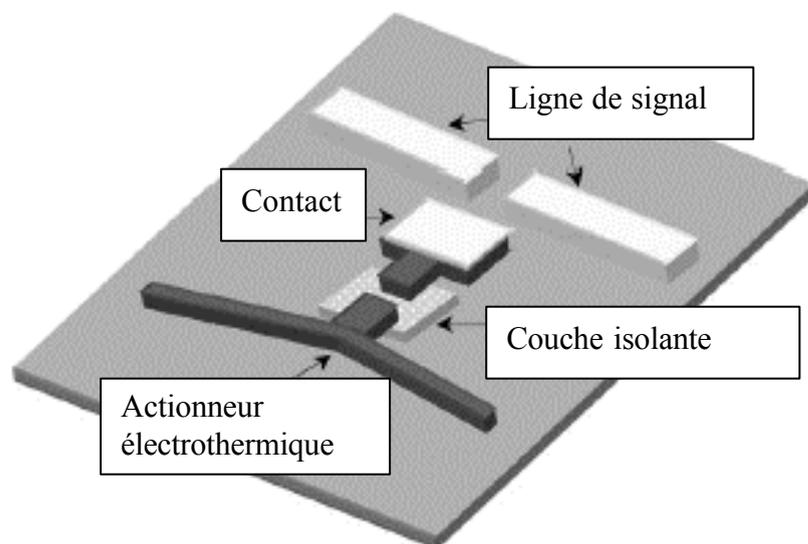


Figure II-10 : Microrelais à actionnement électrothermique et déplacement plan [24]

Le contact est isolé thermiquement et électriquement de l'actionneur par un raccord en nitrure de silicium. La couche métallique utilisée pour la ligne transportant le signal et le contacteur est formée d'une couche d'or déposée par pulvérisation. Les performances de ce type de relais sont limitées par le flambement de la structure lorsque celui-ci travaille à de hautes températures.

3. Actionnement piézoélectrique

L'actionnement piézoélectrique s'apparente à l'actionnement thermique d'un bilame, en ce sens que le mouvement est créé suite à une variation d'allongement entre deux films. En effet, le film piézoélectrique a la capacité de se contracter ou de s'allonger lors de l'application d'une tension (Figure II-11) [25]. L'actionnement piézoélectrique a un rendement élevé, car la majorité de l'énergie électrique appliquée est directement transformée en énergie mécanique.

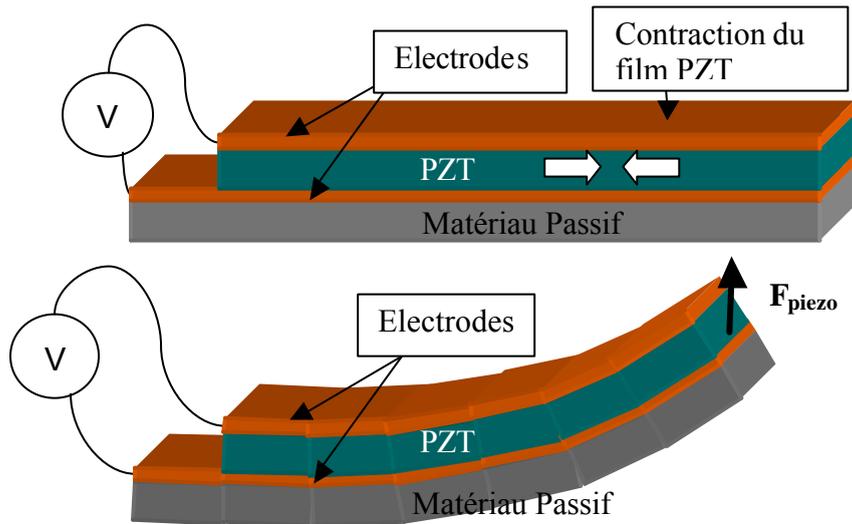


Figure II-11 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique de type bilame [25]

Les autres avantages de l'actionnement piézoélectrique sont l'amplitude des forces générées, sa faible interaction avec d'autres composants électroniques, et le temps de réaction généralement court (de l'ordre de quelques microsecondes). Cependant, ce mode d'actionnement est encore peu développé et reste peu compatible avec les procédés de fabrication de l'électronique classique.

Dans le relais présenté ci-dessous (Figure II-12) [26], l'actionnement s'effectue par le biais d'un cantilever. Un film piézoélectrique est mis en sandwich entre deux électrodes et placé sur une poutre micro-usinée en silicium. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée, le film piézoélectrique se contracte ce qui produit un moment de flexion qui occasionne une déflexion du cantilever vers le substrat jusqu'au contact.

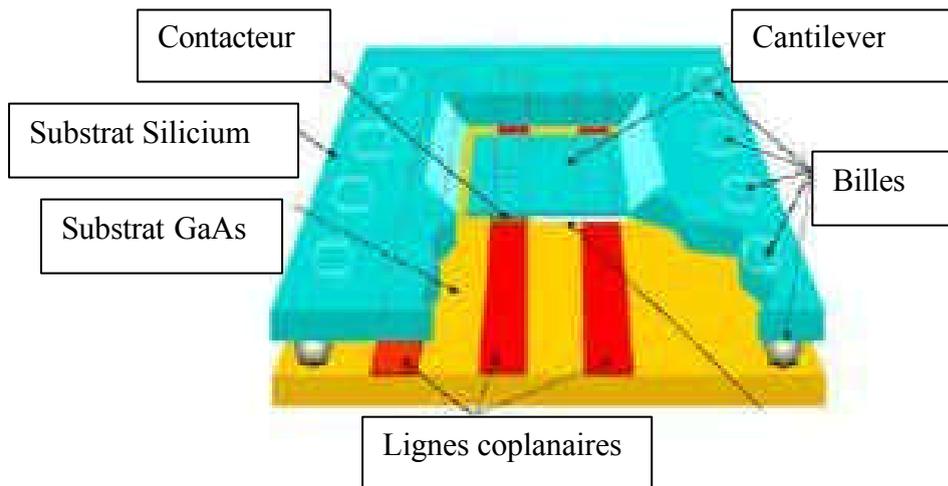


Figure II-12 : Microrelais à actionnement piézoélectrique et déplacement hors plan [26]

4. Actionnement magnétique

L'actionnement magnétique le plus courant utilise la force électromagnétique créée lors du passage d'un courant dans une bobine. En effet, lorsqu'un objet ferromagnétique est amené dans le champ, il y a attraction de l'objet par la bobine (Figure II-13). Si on ajoute au système un aimant permanent, des forces d'attraction et de répulsion sont obtenues par le changement de sens du champ magnétique externe [27].

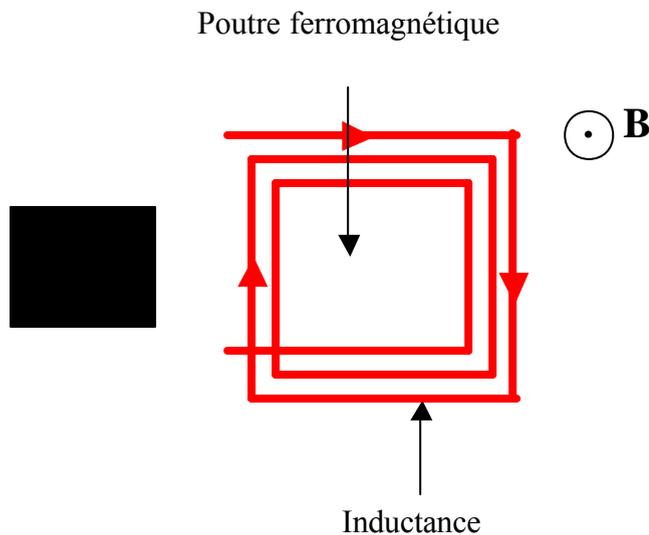


Figure II-13 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électromagnétique [27]

La magnétostriction est le second mécanisme d'origine magnétique employé dans les microsystemes. Elle est définie par le changement de dimension d'un matériau

magnétique sous l'effet d'un champ magnétique. Une magnétostriction négative est la contraction du matériau dans la direction le champ magnétique et son expansion dans la direction perpendiculaire. En effet, les matériaux magnétostrictifs possèdent des domaines magnétiques orientés aléatoirement. En appliquant un champ magnétique ces domaines s'orientent perpendiculairement à la direction du champ ce qui provoque une elongation du matériau dans cette direction et la contraction dans l'autre (Figure II-14) [28]. Le rapport d'aspect important et la faible épaisseur du film permettent de négliger l'influence de la contraction sur le comportement mécanique de la poutre.

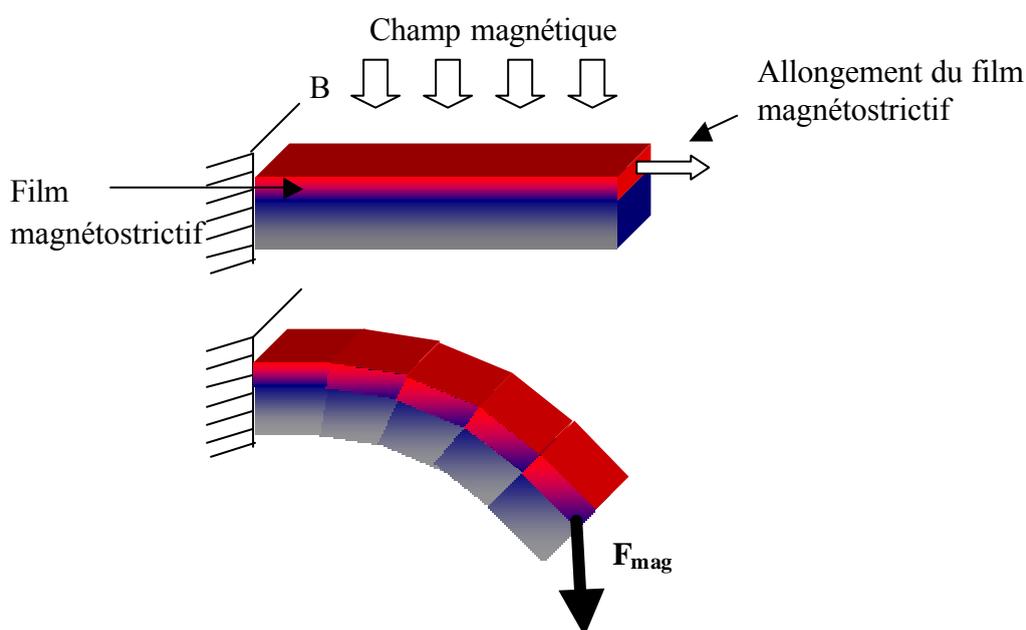


Figure II-14 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur magnétostrictif de type bilame [28]

L'actionnement magnétique dans le domaine des microsystemes est, en général, nettement moins employé que les autres moyens d'actionnement. Ceci à cause de la complexité de fabrication, d'utilisation et d'intégration de ce type d'actionneur. L'actionnement magnétique permet néanmoins de produire des forces considérables de l'ordre de la dizaine de millinewton.

Le relais présenté ci-dessous (

Figure II-15) [29] est composé d'une bobine pour la création du champ magnétique, et d'une poutre cantilever en matériau ferromagnétique (Fe-Ni). Le champ magnétique induit la création d'un moment de flexion au niveau du cantilever, ce qui provoque une déflexion suffisante pour effectuer un contact électrique.

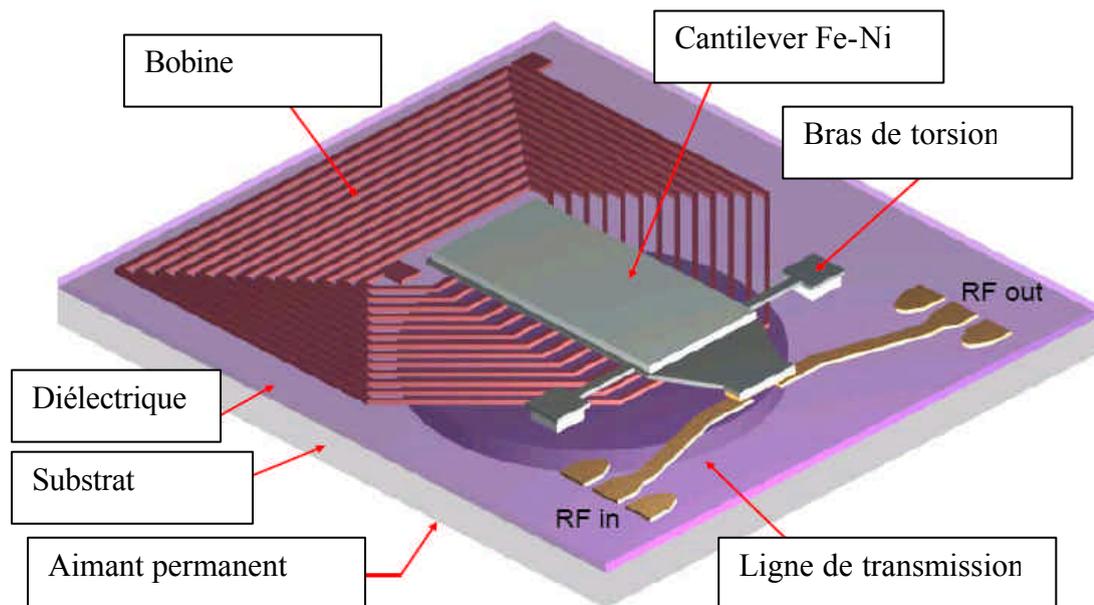


Figure II-15 : Microrelais à actionnement magnétostrictif et déplacement hors plan [29]

5. Contact liquide

Ce paragraphe contrairement aux précédents ne concerne pas un mode d'actionnement mais une voie originale pour venir commuter un signal électrique. A l'inverse des exemples précédents, où l'on utilise un contact métallique «solide» se déplaçant par l'entremise d'une poutre ; le dispositif suivant (Figure II-16) [30] utilise une bille de mercure se déplaçant dans un canal comprenant un liquide diélectrique. La bille de mercure se déplace sous l'effet d'un actionnement thermique : des éléments chauffants placés à chaque extrémité du canal génèrent une certaine quantité de chaleur. L'augmentation de la température occasionne l'apparition d'une bulle d'air dans le liquide diélectrique modifiant la pression qui s'exerce sur la bille de mercure. Cette différence de pression agit sur le positionnement de la bille.

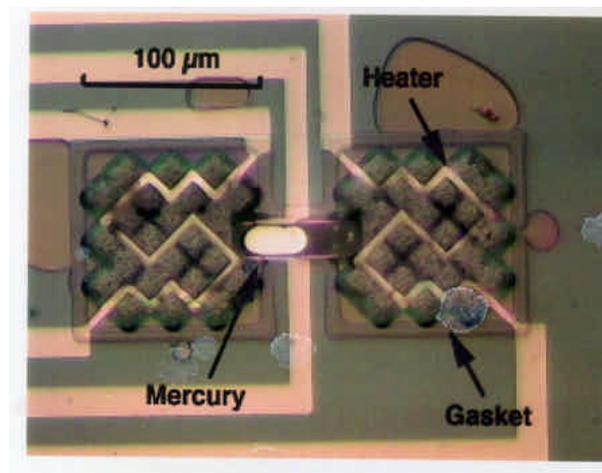
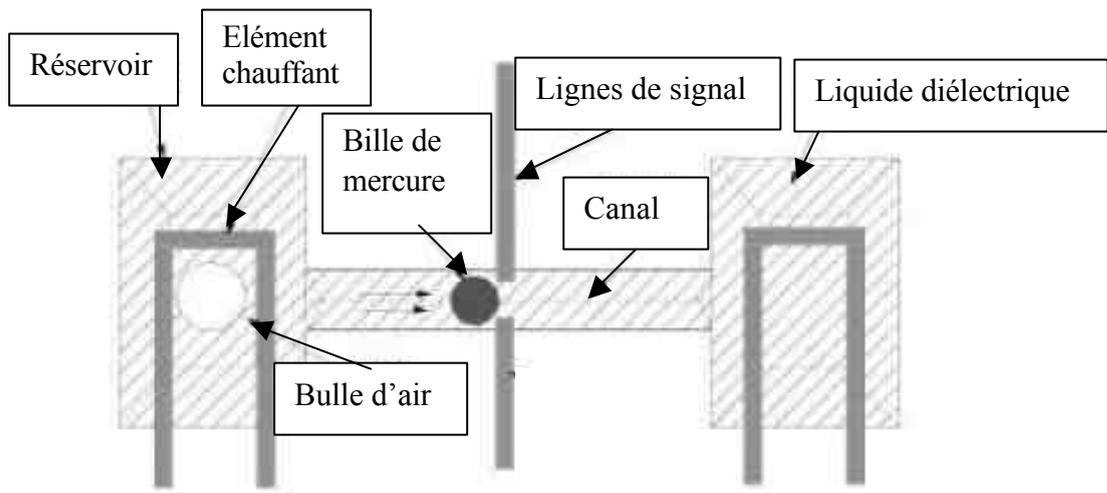


Figure II-16 : Microrelais à contact liquide [30]

III. Interrupteurs à couplage capacitif

Les interrupteurs à couplage capacitif ont pour objet les applications en radiofréquence (RF). Leur principe de fonctionnement est le court-circuitage d'un signal en amenant un plan de masse à proximité. Du fait de la nature de l'interruption (capacitive), ce type de relais n'est performant que pour la commutation de signaux dont la fréquence est supérieure à plusieurs dizaines de gigahertz. Les forces requises pour le mouvement mécanique peuvent être obtenues par un actionnement électrostatique, thermique ou encore piézoélectrique. Cependant les principales applications visées par ces interrupteurs à couplage capacitif (téléphonie, radar) demandent un temps de commutation court. Ceci est la raison pour laquelle la plupart utilise un actionnement électrostatique. De plus, pour l'instant seulement des interrupteurs de type électrostatique ont démontré une bonne fiabilité et une fabrication simple.

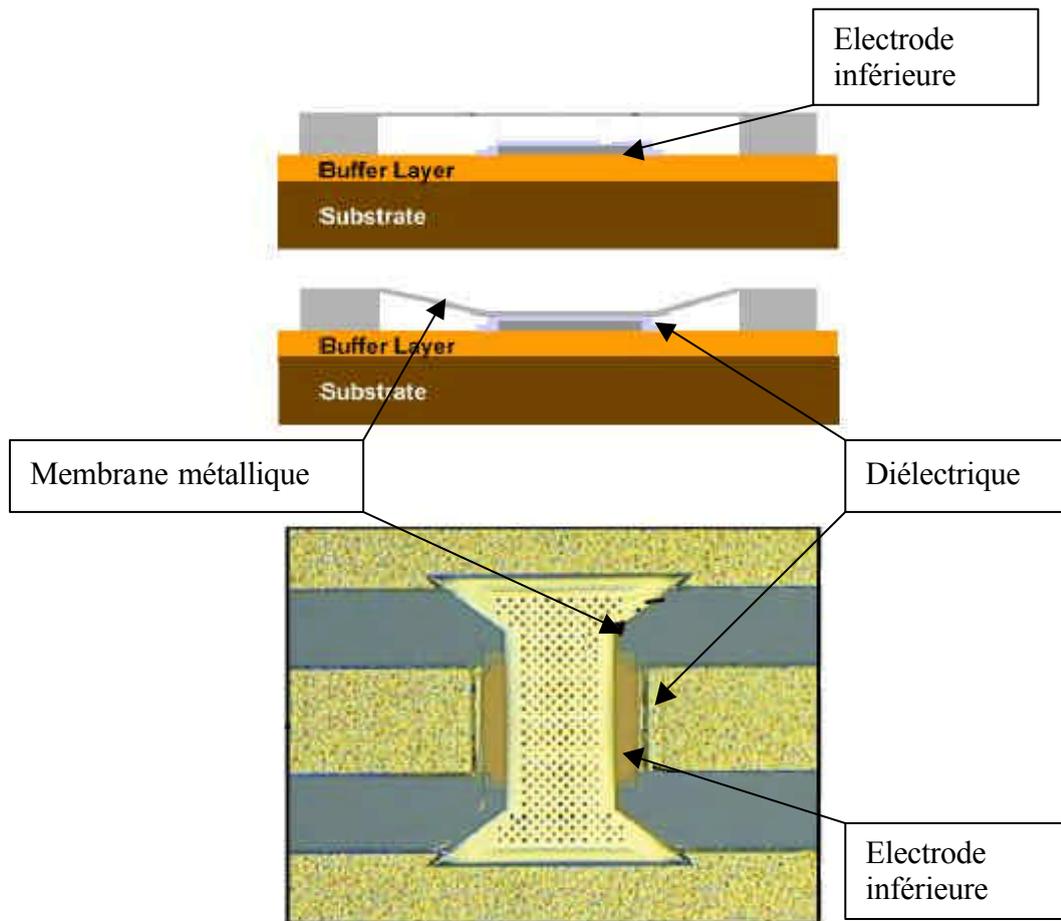


Figure II-17 : Membrane à actionnement électrostatique pour interruption capacitive [31]

Le type de structure le plus couramment utilisée est un pont métallique (Figure II-17) [31] suspendu au dessus du signal à commuter. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée entre les deux conducteurs, la membrane métallique est attirée vers la ligne transportant le signal à commuter. À partir de la tension d'effondrement, la membrane métallique vient se positionner sur le diélectrique protégeant l'électrode inférieure (un fin diélectrique permet d'éviter les courts-circuits DC entre le signal et le pont). La capacité entre la ligne transportant le signal et la membrane métallique augmente alors fortement pour atteindre un ratio entre la capacité à l'état passant et non passant de 100. Cet état crée une faible impédance entre le signal et le plan de masse, ce qui provoque un court circuit de la ligne et par conséquent la commutation.

L'exemple qui suit (Figure II-18) [32] concerne un dispositif utilisant le même principe de fonctionnement que la poutre bi-encastree métallique précédemment évoquée. Une différence de potentiel est appliquée entre le cantilever métallique initialement flambé par les contraintes intrinsèques et une électrode située en dessous. Le faible gap séparant les électrodes au niveau de l'ancrage permet d'utiliser un effet « zip » [33] ce qui provoque l'affaissement de la structure à partir d'une tension d'actionnement de faible amplitude.

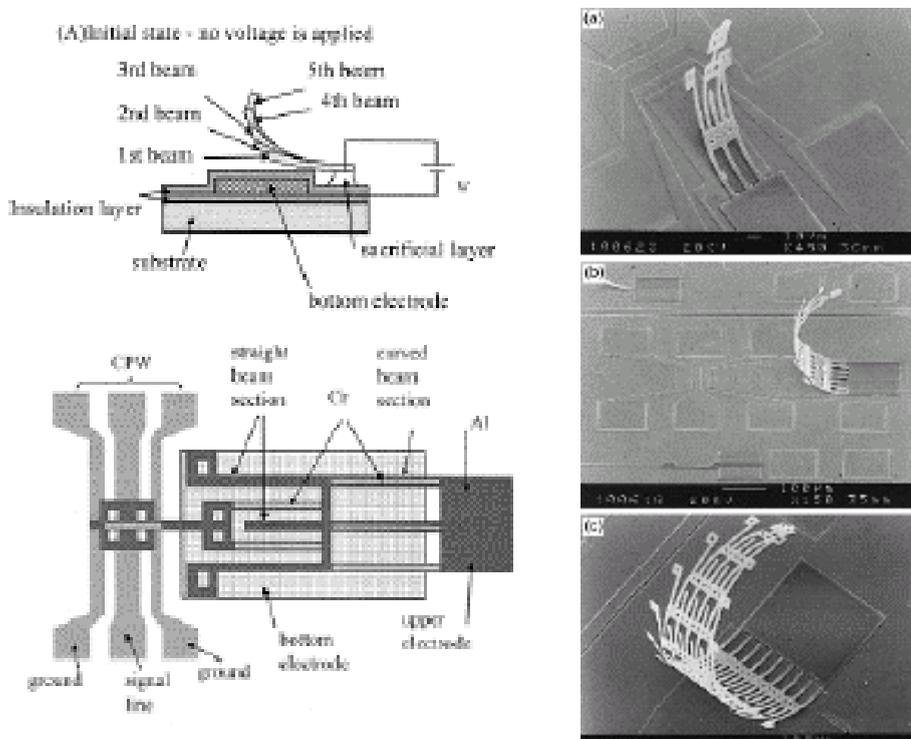


Figure II-18 : Poutre cantilever pour interruption capacitive et à actionnement électrostatique [32]

IV. Tableau récapitulatif des performances

	Électrostatique		Electrothermique			Magnéto trictif [28]	Piézoélect rique [26]	Mercure [30]
	Plan [17]	Hors Plan [16]	Plan [24]	Hors Plan [22]	Hors Plan [23]			
Vitesse de commutation	33 μ s	5 μ s	N/A	100 μ s	250 μ s	15 μ s	N/A	10 ms
Pertes	N/A	<0.1dB@ 4GHz	1dB@12 GHz	N/A	0.3 dB@2 GHz	N/A	N/A	0.1dB@4 GHz
Isolation	N/A	50dB@4 GHz	20dB@12 GHz	N/A	50dB@2 GHz	N/A	25dB@50 GHz	44dB@2 GHz
Alimentation	50-260 V	20-100 V	8 V	8 mW	3 V	19 mW	3-5 V	100 mW
Taille	L=1200 μ m	L=200 μ m	L=200 μ m	L=200 μ m	L=400 μ m	L=1000 μ m	L=1000 μ m	L=200 μ m
Résistance de contact	1 k Ω	3 Ω	60 m Ω	0.6-0.8 Ω	5 m Ω	25 m Ω	N/A	120 Ω/ μ m ²

Tableau II-1 : Tableau récapitulatif des performances de microrelais à contact résistif

	Poutre bi encastrée [31]	Poutre cantilever [32]
Vitesse de commutation	3.5-5.3 μ s	N/A
Pertes par insertion	0.14dB@10GHz	0.2dB@20GHz
Isolation	15dB@10GHz	17dB@10GHz
Tension d'effondrement	50V	26V

Tableau II-2 : Tableau récapitulatif des performances de microrelais à couplage capacitif

V. Concept retenu et principes de base

Ce chapitre a permis de nous éclairer sur les différentes technologies disponibles pour la conception de micro commutateurs. Nous avons vu que les commutateurs à couplage capacitif sont mieux adaptés pour des utilisations en hautes fréquences et que les commutateurs à contact résistif sont mieux adaptés pour des applications dans une gamme de fréquence basse comprenant le DC. Nous avons également montré que l'actionnement électrostatique largement apprécié pour sa rapidité d'exécution demande des tensions de fonctionnement élevées ou un faible espace entre les électrodes, ce qui le rend peu adapté à nos spécifications fonctionnelles. L'actionnement thermique utilise des tensions du même ordre de grandeur que celles utilisées dans les circuits intégrés et permet de grands déplacements mais son mode d'actionnement le rend très sensible aux variations de température. Parmi les technologies utilisables, l'usinage de surface se révèle comme la plus attrayante car elle permet une intégration aisée des dispositifs avec des composants électroniques.

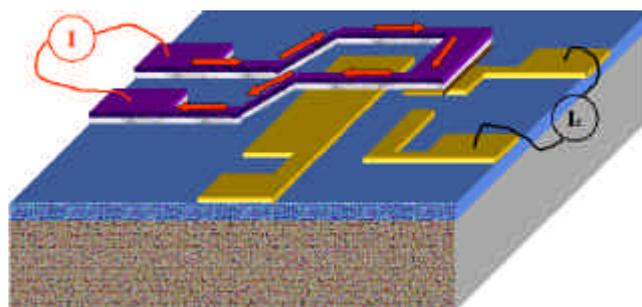
Étant donné qu'un DSMF exige des applications de commutation de puissance de signaux DC, le concept finalement retenu est celui de la commutation d'un signal électrique par un ensemble de cantilevers bilames actionnés conjointement de manière thermique et électrostatique dans le plan vertical. Le mode d'actionnement privilégié est d'origine électrothermique car il permet l'obtention de mouvement hors plan considérable. Cet actionnement thermique sera complété par un actionnement électrostatique qui verrouille le contact. La combinaison de ces deux actionnements provoquera le contact électrique et le passage du courant I_c . La partie bilame sera composée d'une couche métallique de fort coefficient de dilatation thermique sur une couche diélectrique de faible coefficient de dilatation thermique. La couche métallique sera utilisée à la fois comme élément chauffant et comme électrode mobile. La couche diélectrique sert à la fois d'isolant thermique au cours de l'actionnement thermique et d'isolant électrique au cours de l'actionnement électrostatique. Pour permettre le passage du courant on utilisera un dispositif en forme de «U». Le concept envisagé oblige le recours à une technologie dite froide (température de dépôt inférieure à 300°C) afin d'obtenir des contacts de type métal-métal.

Les principaux avantages de cette approche se trouvent dans une intégration simple avec l'électronique environnante d'un DSMF, une faible résistance de contact, et une bonne fiabilité. En effet, l'utilisation commune d'un actionnement thermique et électrostatique permet d'obtenir une force de contact considérable pour garantir un contact électrique malgré l'environnement versatile. De plus, les contraintes intrinsèques des matériaux induisent un flambement initial du bilame. Cette séparation importante, entre la ligne à commuter et l'élément de contact mobile, permet d'éviter les phénomènes de collage avec le substrat et d'obtenir une grande isolation électrique.

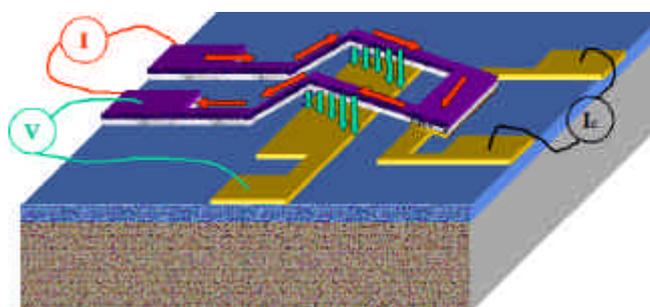
Deux configurations de dispositif sont essayées :

- La première configuration emploie un élément de contact à l'extrémité du cantilever, le but est d'obtenir un contact électrique suite à un actionnement électrothermique, puis le « verrouiller » par l'actionnement électrostatique.
- La seconde configuration positionne l'élément de contact en retrait de l'extrémité du cantilever. Cette disposition permet à l'actionnement électrostatique de se faire de part et d'autre du contact. La pression exercée est alors plus uniforme, ce qui rend le contact moins sensible aux vibrations. Cette configuration ne permet pas à l'actionnement thermique d'acheminer seul le contact électrique. Il permet uniquement de réduire la distance entre les électrodes d'actionnement électrostatique, réduisant du même coup la tension d'effondrement. L'actionnement électrostatique est utilisé pour obtenir le contact électrique.

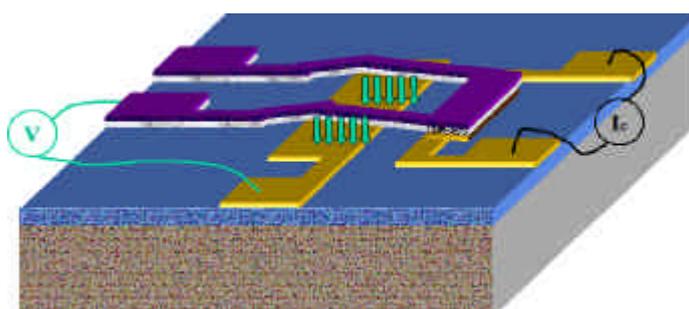
La Figure II-19 et la Figure II-20 illustrent le principe de fonctionnement des dispositifs imaginés. La Figure II-21 et la Figure II-22, les chronogrammes des différentes configurations.



Etape 1 : Actionnement électrothermique
Application d'un courant au travers du dispositif pour venir commuter le signal

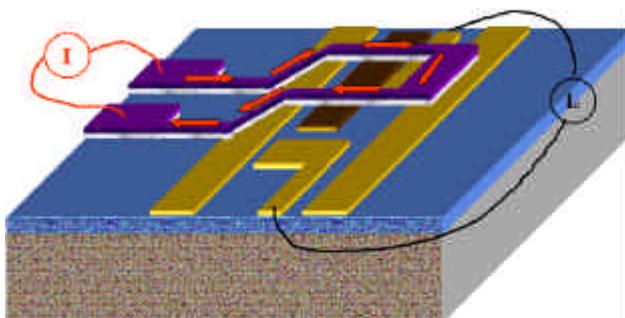


Etape 2 : Actionnement électrostatique
Une fois le contact établi, application d'une différence de potentiel pour verrouiller le système

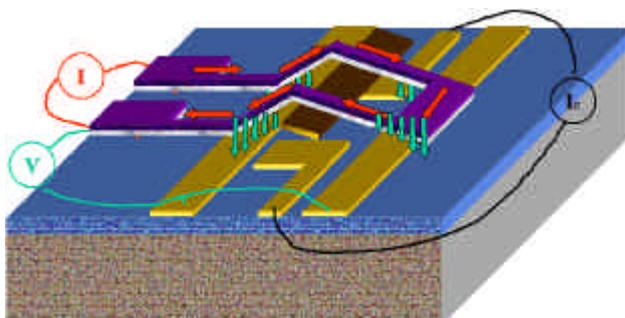


Etape 3 : Mode sécurisé
Fin de l'actionnement électrothermique, le système reste fermé.

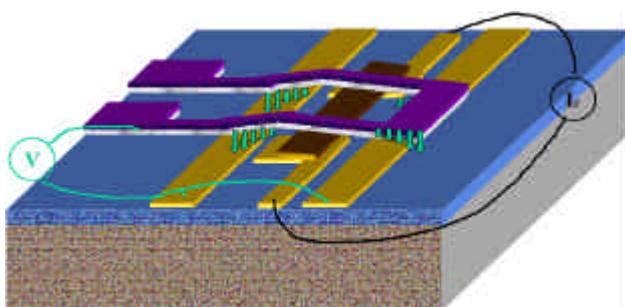
Figure II-19 : Schéma de principe de la première configuration de contact envisagée



Etape 1 : Actionnement électrothermique
Application d'un courant au travers du dispositif pour venir commuter le signal



Etape 2 : Actionnement électrostatique
Une fois le contact établi, application d'une différence de potentiel pour verrouiller le système



Etape 3 : Mode sécurisé
Fin de l'actionnement électrothermique, le système reste fermé.

Figure II-20 : Schéma de principe de la deuxième configuration de contact envisagée

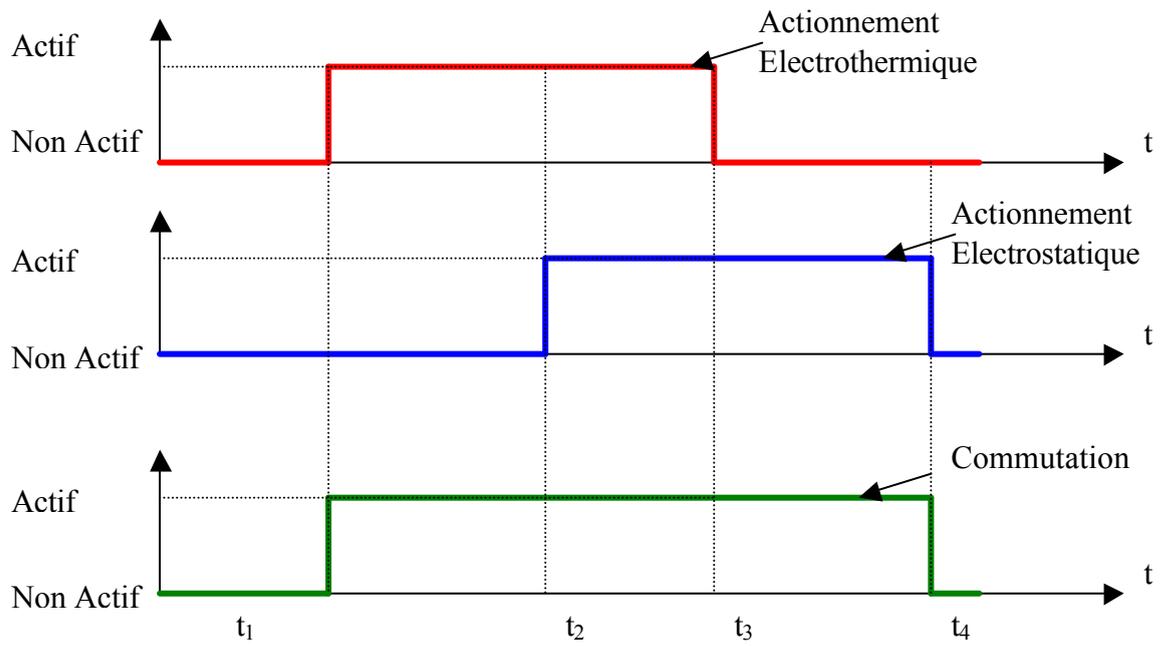


Figure II-21 : Chronogramme du dispositif de type 1

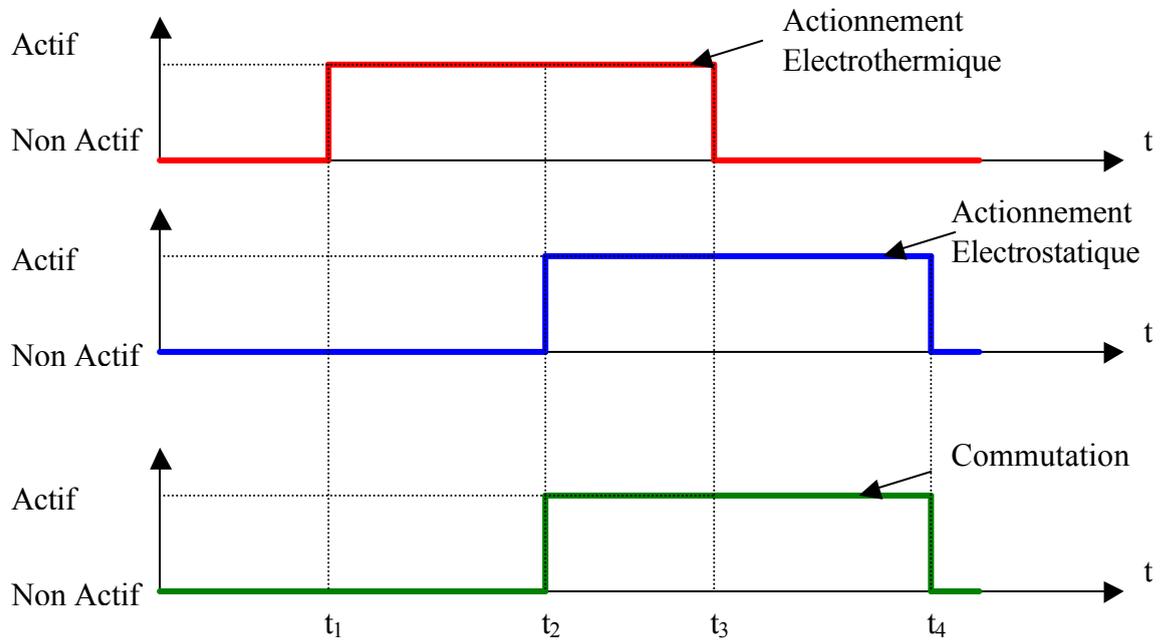


Figure II-22 : Chronogramme du dispositif de type 2

VI. Références

- [1] M. Sakata, Y. Komura, T. Seki, K. Kobayashi, K. Sano, S. Horiike, Omron corporation, 1999, "Micromachined relay, which utilizes single crystal silicon electrostatic actuator", MEMS'99, p21-30
- [2] C. Sanders, 1998, MCNC thermally actuated microrelays, "News Release MEMS Technology Application Center MCNC".
- [3] D.L. DeVoe and A.P. Pisano, 1997, "Modeling and optimal design of piezoelectric cantilever microactuators", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 6, p266-270.
- [4] J.J. Yao and M.F. Chang, 1995, "A surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz", Tech. Digest, 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators p384-387.
- [5] J.B. Muldavin and G.M. Rebeiz, 1999, "30 GHz tuned MEMS switches", Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. p1511-1514.
- [6] J. Simon, S. Saffer and C-J Kim, 1996, "A micromechanical relay with a thermally-driven mercury micro-drop", Proc. IEEE, 9th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems p 515-20.
- [7] L. E. Larson, R. H. Hackett and R. F. Lohr, 1991, "Microactuators for GaAs-based Microwave Integrated Circuits", Digest Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (transducer '91), p743-746.
- [8] G.T.A Kovacs, *et al*, 1988, "Bulk micromachining of Si", In Proc IEEE vol 86
- [9] M. Mehregany, *et al*, 1988, "Integrated fabrication of polysilicon mechanisms", In Jour. Vac. Sci. Electron Devices, ED35.
- [10] I. Schiele and B. Hillerich, 1999, "Comparison of lateral and vertical switches for application as microrelays", J. Micromech. Microeng. Vol 9, p146-150.
- [11] J.Wong *et al*, 2000, "An electrostatically-actuated MEMS switch for power applications", MEMS'00, p633-638.
- [12] M-A Grétilat, F. Grétilat and N.F. de Rooij, 1999, "Micromechanical relay with electrostatic actuation and metallic contacts", J. Micromech. Microeng. Vol 9, p324-331
- [13] K. Suzuki, S. Chen, T. Marumoto, Y. Ara and R. Iwata, 1999, "A micromachined RF microswitch applicable to phased-array antennas", Tech. Digest, IEEE Microwave Theory Techniques Symp. p1923-1926.

- [14] M. Yamaguchi and K. Kawamura, 1993, "Distributed Electrostatic Microactuator", Proc. MEMS 1993, Fort Lauderdale, FL, p 18-23
- [15] T. Akiyama and K. Shono, 1993, "A New Step Motion of Polysilicon Microstructures", Proc. MEMS 1993, Fort Lauderdale, FL, p 272-277
- [16] R. Sattler, P. Voigt, H. Pradel and G. Wachutka, 2001, "Innovative design and modelling of a micromechanical relay with electrostatic actuation", J. Micromech. Microeng., Vol 11, p428-433.
- [17] Ignaz Schiele and Bernd Hillerich, 1999, "Comparison of lateral and vertical switches for application as microrelays", J. Micromech. Microeng., Vol 9, p146-150.
- [18] W-H. Chu, M. Mehregany, and R. L. Mullen, 1993, "Analysis of tip deflection and force for a bimetallic cantilever microactuator", J. Micromech. Microeng., Vol 3, p4
- [19] Q-A. Huang and N. K. S. Lee, 1999, "Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator," J. Micromech. Microeng., Vol. 9, p 64-70
- [20] Cragun *et al*, 1999, "Linear thermomechanical microactuators", Proc. ASME IMECE p81-88.
- [21] Lott *et al*, 2001, "Thermal modelling of a surface micro-machined linear thermomechanical actuator" Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems, Hilton Head, T51.21
- [22] S. Zhou, S. Xi-Qing, N.C. William, 1997, "A micro variable inductor chip using MEMS Relays", Digest Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (transducer '97), p1137-1140.
- [23] P. Robert *et al*, 2003, "Integrated RF-MEMS Switch Based on a Combination of Thermal and Electrostatic Actuation", Transducer 2003.
- [24] Y. Wang *et al*, 2002, "Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications", MEMS'02, p645-648.
- [25] A. M. Flynn, L. S. Tavrow, S. F. Bart, R. A. Brooks, D. J. Ehrlich, K. R. Udayakumar and L. E. Cross, 1990, "Piezoelectric micromotors for microrobots", Ultrasonics symposium, p1163
- [26] M. Beck, M. M. Ahmed, C. J. Brierley, A. P. Needham, S. P. Marsh, 2000, "Microwave filters and switches produced using micro-machining techniques", International Microwave Symposium 2000.

- [27] J.A. Wright and Y.C. Tai, 1998, "Micro-Miniature Electromagnetic Switches Fabricated Using MEMS Technology," Proceedings: 46th Annual International Relay Conference, NARM '98, Oak Brook, Illinois, p13.1-13.4.

- [28] K. I. Arai and T. Honda, 1996, "Micromagnetic actuators", Robotica, Vol 14, p 477-481

- [29] Site internet : www.microlab.net

- [30] J. Simon, S. Saffer, F. Sherman, and C.-J. Kim, 1998, "Lateral Polysilicon Microrelays with a Mercury Micro-Drop Contact", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, p 854-860

- [31] C. Goldsmith, J. Randall, S. Eshelman, T-H. Lin, D. Denniston, S. Chen and B. Norvell, 1996, "Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies", Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. p 1141

- [32] C. Chang and P. Chang, 1999, "Innovative micromachined microwave switch with very low insertion loss", Digest Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (transducer '99), p 1830-1833.

Chapitre III : ETUDE THEORIQUE DE L'ACTIONNEMENT

Cette partie s'intéresse à l'étude théorique de l'actionnement électrothermique et électrostatique. Les équations développées dans ce chapitre seront ensuite utilisées lors de la phase de conception et d'optimisation des dispositifs de commutation.

I.	Introduction	56
II.	Préliminaires	58
III.	Etude théorique des dispositifs	74
IV.	Modélisation des phénomènes vibratoires et accélérations.....	81
V.	Modélisation de l'actionnement électrostatique	84
VI.	Temps d'établissement.....	87
VII.	Comparaison simulation FEM et modélisation analytique.....	89
VIII.	Conclusion	96
IX.	Références.....	98

I. Introduction

Le chapitre précédent a jeté les bases du fonctionnement d'un microrelais en technologie microsysteme et susceptible de fonctionner dans un Dispositif de Sécurité et de Mise à Feu (DSMF). Le principe retenu repose sur l'utilisation d'actionneurs bilames afin de commuter un signal électrique. Le contact établi, la procédure de commutation se termine par un verrouillage électrostatique du dispositif. Celui-ci permet de conserver le contact électrique même après la fin de l'actionnement électrothermique.

Le deuxième chapitre de ce manuscrit, a décrit qualitativement les principes de base des actionnements utilisés. Dans ce chapitre, ils sont détaillés sous la forme d'équations analytiques appliquées à la géométrie des dispositifs. Celles-ci permettent de modéliser le comportement mécanique du dispositif soumis à ce type d'actionnement. Le but de ces modélisations, réalisées sous MATLAB [1], est d'extraire dans un premier temps, des règles de conception et d'optimisation, puis dans un second temps, de permettre une meilleure interprétation des données expérimentales.

Afin de vérifier les hypothèses et les approximations employées lors de la résolution des équations, les données obtenues par ces expressions analytiques sont confrontées à celles obtenues par un simulateur utilisant les éléments finis (ou FEM pour Finite Element Method). De nombreux logiciels de simulations FEM existent sur le marché, on peut citer ANSYS [2], COVENTORWARE® [3] ou encore MEMSCAD [4]. Ces logiciels permettent des simulations thermiques, mécaniques et électrostatiques. Cependant, il existe un intérêt majeur à utiliser une approche analytique simple plutôt que d'utiliser un code de simulation par éléments finis : elle permet une réduction non négligeable du temps de calcul lors de la conception. En effet, lors de cette étape de nombreuses variations de paramètres sont effectuées, nécessitant un nombre important de simulations.

La modélisation du dispositif peut se scinder en trois parties distinctes :

- La première correspond au comportement du dispositif à l'état initial lorsqu'il n'est soumis qu'à des contraintes intrinsèques liées à la fabrication et à son environnement (température, vibrations, et accélérations).

- La deuxième correspond au comportement sous actionnement électrothermique. Ce dernier est basé sur deux principes, celui du chauffage par effet Joule pour induire une augmentation de température, et celui de la dilatation thermique des matériaux pour entraîner une déflexion.
- La troisième et dernière partie traite du comportement lors de l'actionnement électrostatique utilisé pour le verrouillage du contact.

Dans ce chapitre, nous nous plaçons dans l'hypothèse de petites perturbations (faibles déplacements, rotations et déformations) et en l'absence de couplage entre raideur de flexion et efforts longitudinaux. Nous supposons de plus que les efforts normaux dans les poutres sont suffisamment faibles pour ne pas introduire de modification du comportement en flexion.

II. Préliminaires

1. Rappels sur les contraintes

La plupart des films minces subissent les phénomènes de contraintes résiduelles à l'origine de la courbure de structures [5]. En se répercutant directement sur les performances, les effets occasionnés par les contraintes résiduelles sont l'un des principaux problèmes dans la réalisation de dispositifs en technologie microsystèmes. Cette influence est particulièrement problématique dans notre situation. En effet, comme nous le verrons par la suite, l'épaisseur de la couche d'air entre la partie suspendue du dispositif et le substrat interagit de manière étroite avec l'actionnement électrothermique.

Les contraintes résiduelles dans les films minces sont d'origine thermiques et/ou intrinsèques [6]. Elles sont dues aux réactions chimiques, au dopage par diffusion ou implantation d'ions, au mode de dépôt évaporation ou pulvérisation. Un matériau est donc soumis par sa nature et selon les conditions de dépôt à des contraintes initiales plus ou moins importantes [7].

Considérons un film mince situé dans le plan (xOz) avec une épaisseur h selon l'axe (Oy) (Figure III-1), l'origine des coordonnées est choisie au milieu du film, de telle sorte que $y \in \hat{I} [-h/2, h/2]$. La contrainte résiduelle sur une tranche élémentaire dx est donnée par l'expression polynomiale suivante :

$$\mathbf{s}_R = \sum_0^{\infty} \mathbf{s}_k \left(2 \frac{y}{h} \right)^k \quad (\text{III.1})$$

Pour simplifier les calculs nous considérons seulement l'ordre 1, l'expression devient alors :

$$\mathbf{s}_R = \mathbf{s}_o + \mathbf{s}_1 \left(2 \frac{y}{h} \right) \quad (\text{III.2})$$

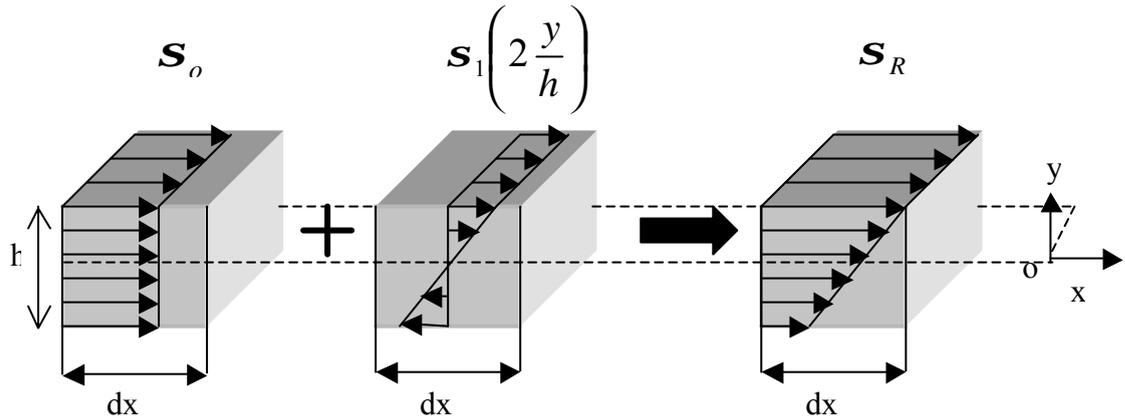


Figure III-1 : Représentation schématique des contraintes dans un film mince

On approxime les contraintes d'un film à la somme de deux composantes : une composante uniforme et une composante verticale (gradient de contrainte). Les gradients de contrainte [8] sont souvent aussi importants que les contraintes uniformes dans des films minces. Ils sont occasionnés par des variations d'ordre technologique lors de la composition du film. Le recuit est généralement très efficace pour diminuer les effets des gradients dans des films minces.

2. Étude d'une poutre multicouche

Ce paragraphe développe un modèle adapté à l'étude de poutres multicouches afin d'en extrapoler, dans la partie suivante, une modélisation complète des dispositifs.

On suppose les propriétés des matériaux uniformes dans chaque couche et indépendantes de la température. Chaque matériau noté de l'indice i , a une épaisseur t_i , une largeur w_i , un coefficient d'expansion thermique α_i , et un module d'Young E_i . Soit $s_{0,i}$ et $s_{1,i}$ respectivement la contrainte moyenne et le gradient de contrainte de la couche i . Soit Y_i et M_i respectivement l'axe neutre et le moment de flexion de la $i^{\text{ème}}$ couche et Y le nouvel axe neutre de l'ensemble (l'axe neutre d'un matériau déformé par une sollicitation correspond aux fibres ne subissant aucune contrainte).

Les effets de courbure le long de la largeur de la poutre ont été négligés. On prend également pour hypothèse que l'allongement unitaire des matériaux est identique à la jonction de chaque couche.

Considérons un élément de longueur L , les forces axiales agissant au centre de chaque matériau provoquent des moments de flexion et par conséquent le flambement de la poutre [9] (Figure III-2).

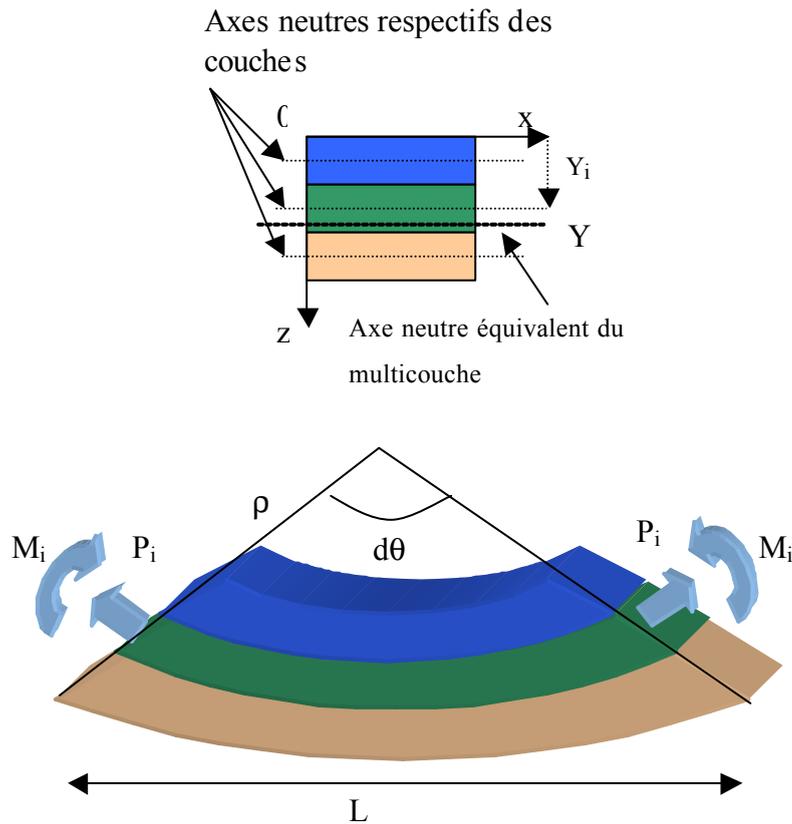


Figure III-2 : Représentation schématique d'une poutre déformée par les contraintes

Influence des contraintes uniformes

Considérons dans un premier temps le système exempt de gradients de contrainte. En additionnant les différents allongements sur la $i^{\text{ème}}$ couche, provoqués par les contraintes intrinsèques et la déformation de la poutre après libération, on obtient l'expression de son élongation e_i (Figure III-3) :

$$e_i = \frac{s_i}{E_i} + f \left(\frac{L_{\text{théorique}}}{L_{\text{finale}}} \right) \quad (\text{III.3})$$

Avec $\mathbf{s}_i = \mathbf{s}_{0i} - \mathbf{a}_i E_i \Delta T$

$L_{théorique}$ représente la longueur de la poutre avant libération, L_{finale} la longueur de la poutre après libération et $f(L_{théorique}/L_{finale})$ la fonction représentant l'allongement de la structure après libération.

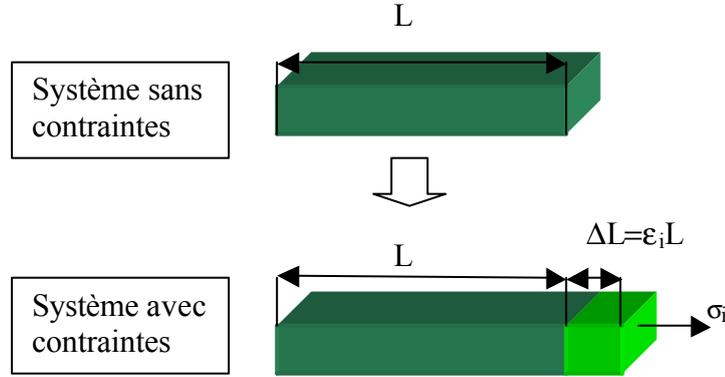


Figure III-3 : Modélisation de l'allongement sous l'effet des contraintes

Comme la poutre cantilever n'est soumise à aucune charge axiale externe, la force P_i générée par les contraintes sur $i^{\text{ème}}$ couche a pour expression :

$$P_i = E_i t_i w_i \mathbf{e}_i \quad (\text{III.4})$$

A l'équilibre la résultante des forces, égale à la somme de toutes les forces dues à la flexion de la poutre, est nulle. On obtient alors l'expression suivante :

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n E_i t_i w_i \mathbf{e}_i = 0 \quad (\text{III.5})$$

De même, le moment de flexion interne est égal à la somme de tous les moments internes générés par les contraintes.

$$\text{et } \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n E_i t_i w_i \mathbf{e}_i (Y - Y_i) \quad (\text{III.6})$$

Rappelons pour mémoire que l'axe neutre de la $i^{\text{ème}}$ couche (Figure III-4) a pour expression :

$$Y_i = \left(\frac{t_i}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right) \quad (\text{III.7})$$

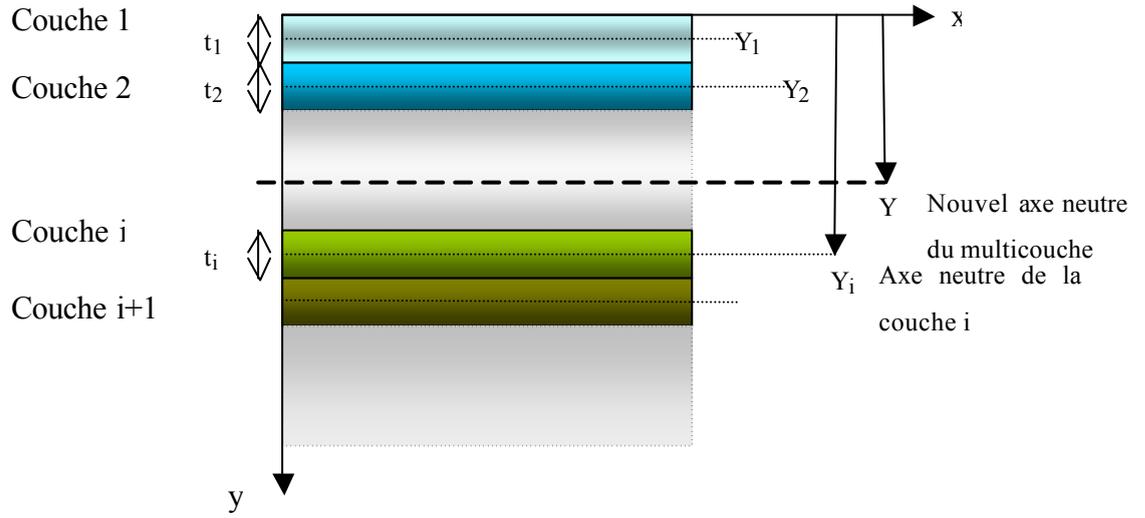


Figure III-4 : Modélisation du nouvel axe neutre

Le nouvel axe neutre Y de l'ensemble (Figure III-4) est déterminé en appliquant le théorème de superposition. Il a pour expression :

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n E_i w_i t_i Y_i}{\sum_{i=1}^n E_i w_i t_i} \quad (\text{III.8})$$

Avec l'équation (III.5) nous obtenons la relation qui lie la résultante des forces avec l'allongement des couches :

$$\sum_{i=1}^n P_i = f \left(\frac{L_{\text{théorique}}}{L_{\text{finale}}} \right) \sum_{i=1}^n E_i t_i w_i + \sum_{i=1}^n \mathbf{s}_i t_i w_i = 0 \quad (\text{III.9})$$

On en déduit l'expression $f \left(\frac{L_{\text{théorique}}}{L_{\text{finale}}} \right)$ que l'on réinjecte dans l'équation (III.3).

$$\mathbf{e}_i = \frac{\mathbf{s}_i}{E_i} + \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{s}_i t_i w_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i} \quad (\text{III.10})$$

A l'aide des relations (III.6) et (III.10) on détermine le moment de flexion résultant des contraintes fixes.

$$M_{\text{init}} = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n E_i t_i w_i \mathbf{e}_i (Y - Y_i) \quad (\text{III.11})$$

$$M_{init} = \sum_{i=1}^n \left(E_i t_i w_i \left(\frac{s_i}{E_i} + \frac{\sum_{i=1}^n s_i t_i w_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i} \right) (Y - Y_i) \right) \quad (\text{III.12})$$

Influence du gradient de contrainte

Considérons maintenant que chaque couche comporte un gradient de contrainte linéaire et d'expression :

$$s_{1,j} \left(2 \frac{y}{h} \right) \quad (\text{III.13})$$

Les gradients de contraintes des couches induisent un moment qui s'ajoute au moment précédemment calculé. Ce moment a pour expression :

$$M_{grad} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n w_i t_i^2 s_{1,i} \quad (\text{III.14})$$

Expression du rayon de courbure

La relation qui lie le rayon de courbure (Figure III-5) au module du moment de flexion est donnée par [10] :

$$\frac{1}{r_0} = \frac{M_{init} + M_{grad}}{(EI)_{eq}} \quad (\text{III.15})$$

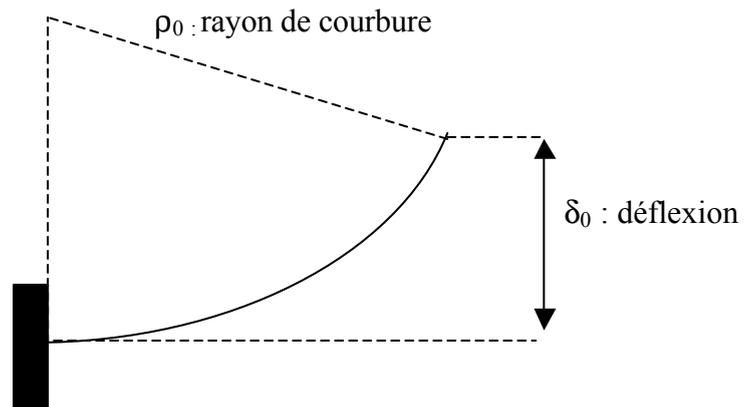


Figure III-5 : Représentation schématique du cantilever flambé par les contraintes initiales

L'expression de la rigidité équivalente est déterminée en appliquant le théorème de superposition :

$$(EI)_{eq} = \sum_{i=1}^n \left[E_i I_i + E_i w_i t_i (Y_i - Y)^2 \right] \quad (\text{III.16})$$

La relation (III.15) devient :

$$\frac{1}{r_0} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(E_i t_i w_i \left(\frac{s_i}{E_i} + \frac{\sum_{i=1}^n s_i t_i w_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i} \right) (Y - Y_i) + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n w_i t_i^2 s_{1,i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{E_i w_i t_i^3}{12} + E_i w_i t_i (Y_i - Y)^2 \right]} \quad (\text{III.17})$$

Conjointement par un calcul différentiel élémentaire le rayon de courbure peut s'exprimer par :

$$\frac{1}{r} = \frac{\frac{d^2 z}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{III.18})$$

Si on se place dans l'hypothèse de faibles déformations d'Euler Bernoulli [11], l'expression (III.18) se réduit alors à :

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2 z}{dx^2} \quad (\text{III.19})$$

Par intégration de l'expression (III.18) et en prenant comme conditions initiales une déflexion et une dérivée première nulle en $x=0$, on obtient l'expression de la déflexion en x_0 d'une poutre cantilever :

$$d_0(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(E_i t_i w_i \left(\frac{s_i}{E_i} + \frac{\sum_{i=1}^n s_i t_i w_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i} \right) (Y - Y_i) + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n w_i t_i^2 s_{1,i} \right)}{2 \sum_{i=1}^n \left[\frac{E_i w_i t_i^3}{12} + E_i w_i t_i (Y_i - Y)^2 \right]} x_0^2 \quad (\text{III.20})$$

3. Modélisation du chauffage par effet Joule d'une ligne multicouche suspendue

Ce paragraphe s'intéresse à la distribution de température d'une ligne multicouche composée d'une couche conductrice d'épaisseur t_{metal} et de conductivité thermique I_{metal} et d'un empilement de couches d'une épaisseur totale t_{ox} et de conductivité thermique

équivalente I_{ox} . Cette ligne de longueur L , de largeur w est située à une hauteur t_{air} du substrat.

a) Rappels sur le chauffage par effet Joule

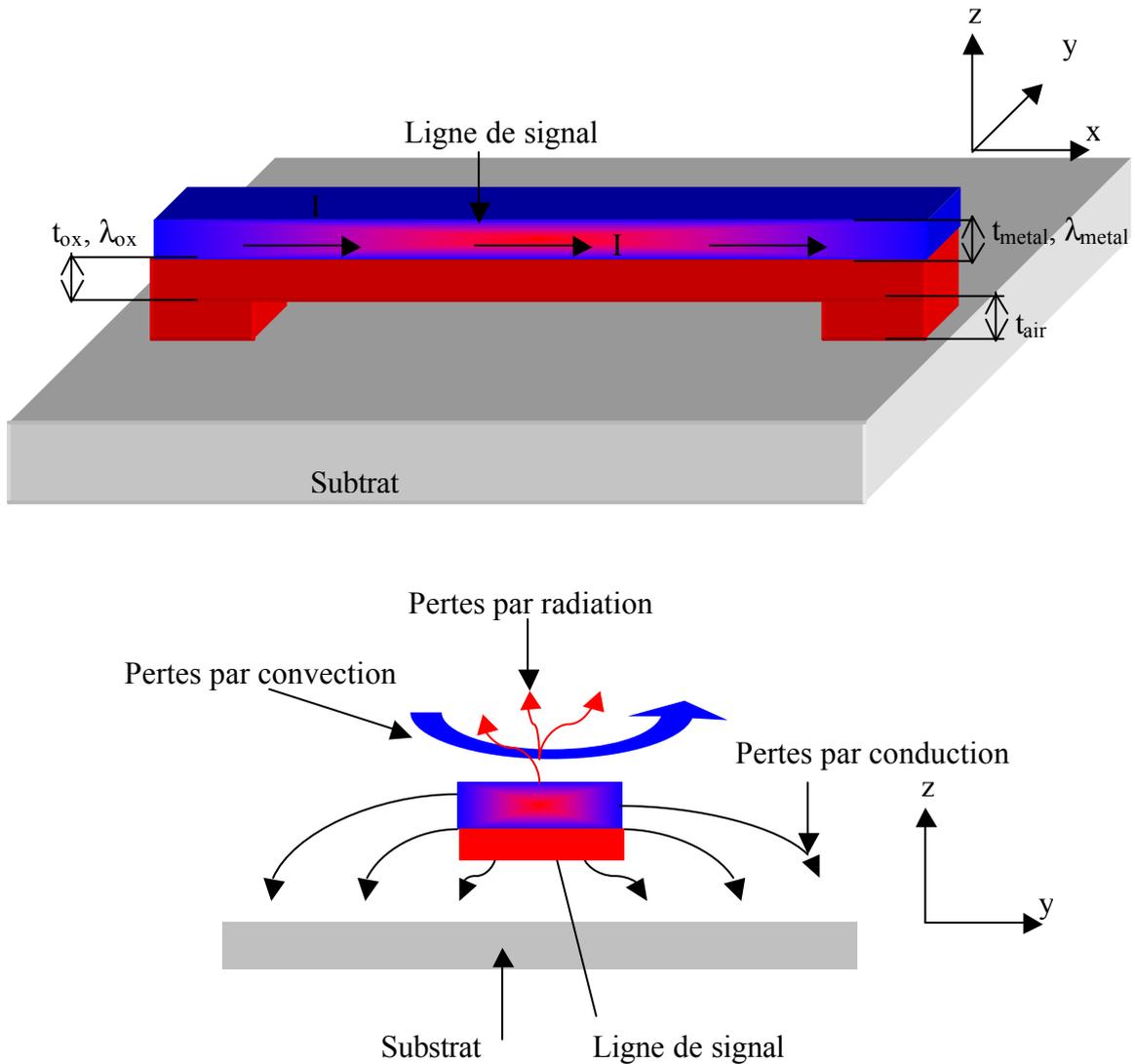


Figure III-6 : Représentation du chauffage par effet Joule et des différentes voie de déperdition de chaleur

Le passage d'un courant au travers d'un dispositif a comme conséquence une augmentation de température [12]. Cette augmentation de température est provoquée par effet Joule et dépend des conditions initiales, de la géométrie de la ligne, des propriétés des matériaux ainsi que de l'environnement dans lequel elle se trouve (Figure

III-6). La longueur des structures micro-usinées étant nettement plus importante que la hauteur et la largeur, cela permet de raisonner avec un modèle de distribution en température à une dimension, suivant l'axe x . L'épaisseur du substrat, les dimensions des points d'ancrage et la conductivité thermique du substrat sont supposées suffisamment importantes, pour considérer les points d'ancrage à température ambiante. On notera également l'existence d'une symétrie centrale qui permet de réduire l'étude à la moitié de la ligne.

La suite de ce paragraphe propose de découvrir les différents mécanismes débouchant sur la connaissance de la répartition de température au travers d'une ligne suspendue.

Equation de chaleur

Considérons un élément de la ligne de longueur Dx . Le bilan de puissance intervenant au niveau d'une tranche $[x, x+Dx]$ s'écrit :

$$P + P_{cond} + P_{conv} + P_{rad} = Crwh\Delta x \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.21})$$

Où P représente la puissance générée par effet joule [11] et qui s'écrit sous la forme :

$$P = J^2 r w t_{metal} \Delta x [1 + \alpha (T - T_o)] \quad (\text{III.22})$$

Avec $J=I/(w.t_{metal})$ la densité de courant, r la résistivité de la couche métallique, t_{metal} l'épaisseur de la couche conductrice. P_{cond} , P_{conv} et P_{rad} correspondent aux différents mécanismes de transfert thermiques (respectivement les pertes par conduction, convection et radiation).

Pertes par conduction

La conduction est le mécanisme par lequel la chaleur se propage de proche en proche, et d'un matériau à un autre. L'utilisation d'un facteur de forme est nécessaire afin de prendre en considération les pertes latérales.

Les pertes par conduction de la structure ont pour expression :

$$P_{cond} = -I w t_{metal} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right] - \frac{I_T h w \Delta x (T - T_s)}{t_{air} + t_{ox}} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Avec } h = \frac{t_{metal}}{w} \left(2 \frac{t_{air} + t_{ox}}{t_{metal}} + 1 \right) + 1, \quad I_T = \frac{t_{air} + t_{ox}}{\frac{t_{air}}{I_{air}} + \frac{t_{ox}}{I_{ox}}}$$

h correspond au facteur de forme et I_T correspond à la résistance thermique équivalente comprise entre la couche métallique et le substrat.

Pertes par convection

La convection est l'échange d'énergie par contact direct entre un corps et un fluide ambiant (ici l'air) en mouvement. L'étendue des échanges dépend de la différence de température entre les deux corps, de la vitesse du fluide, et du coefficient de convection (qui dépend de la nature du fluide).

Les pertes par convection s'écrivent :

$$P_{conv} = p\Delta x H(T - T_{air}) \quad (\text{III.24})$$

Avec H le coefficient de convection (entre 5 et 25 $\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ dans l'air), et p le périmètre de la section de la poutre, typiquement $2(w + t_{metal})$ pour un bicouche.

Pertes par radiation

La radiation est l'émission de rayonnement infrarouge (ondes électromagnétiques). Elle dépend de la température de l'élément, celle du milieu ambiant, et du pouvoir d'absorption du matériau.

Les pertes par radiation ont pour expression

$$P_{rad} = \epsilon s \Delta x (w + 2t_{metal}) \Delta x (T^4 - T_s^4) \quad (\text{III.25})$$

Où s est la constante de Stephan boltzmann ($5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) et ϵ l'émissivité du matériau.

b) Résolution de l'équation de chaleur

Pour le cas de lignes suspendues comportant un faible gap, les pertes par convection et radiation sont supposées négligeables devant les pertes par conduction vers le substrat ($P_{cond} \cong 10000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, $P_{conv} \cong 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ et $P_{rad} \cong 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). On obtient alors l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{h}{I_{metal} t_{metal} \left(\frac{t_{air}}{I_{air}} + \frac{t_{ox}}{I_{ox}} \right)} (T - T_s) - \frac{J^2 r}{I_{metal}} [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (\text{III.26})$$

Où T et T_s sont respectivement la température de la poutre et celle du substrat, T_0 représentant la température de référence des propriétés des matériaux.

Si l'on considère que $T_s \gg T_0$, en posant $(T - T_s) = (T - T_a) = q(x)$ l'expression III.26 devient :

$$\frac{\partial^2 q(x)}{\partial x^2} = \frac{h}{I_{metal} t_{metal} \left(\frac{t_{air}}{I_{air}} + \frac{t_{ox}}{I_{ox}} \right)} q(x) - \frac{J^2 r}{I_{metal}} [1 + \alpha q(x)] \quad (III.27)$$

L'expression se simplifie en posant :

$$A^2 = \frac{h}{I_{metal} t_{metal} \left(\frac{t_{air}}{I_{air}} + \frac{t_{ox}}{I_{ox}} \right)} + B\alpha \quad \text{et} \quad B = \frac{J^2 r}{I_{metal}} \quad (III.28)$$

La relation (III.27) devient alors :

$$\frac{\partial^2 q(x)}{\partial x^2} = A^2 q(x) - B \quad (III.29)$$

La résolution de l'équation différentielle III.29 en prenant comme conditions initiales $q(0)=0$ et $q(L)=0$, permet d'obtenir l'expression de l'augmentation de température en x_0 :

$$q(x_0) = \frac{B}{A^2} + C_1 e^{Ax_0} + C_2 e^{-Ax_0} \quad (III.30)$$

$$C_1 = -\frac{B}{A^2} \left(\frac{1 - e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} \right) \quad \text{et} \quad C_2 = -\frac{B}{A^2} - C_1 \quad (III.31)$$

Remarque : L'équation ne convient plus pour des températures élevées ($>250^\circ\text{C}$)

4. Modélisation de l'actionnement électrostatique dans le cas de plaques parallèles.

Les actionneurs électrostatiques, constitués de deux armatures en vis-à-vis et dont l'une est mobile, sont modélisés par une capacité variable suspendue par un ressort [13] (approche simple) (Figure III-7). Deux méthodes peuvent être utilisées dans l'analyse de l'actionnement électrostatique. La première méthode réduit le problème à trouver les points d'équilibre et la stabilité de ceux-ci à partir du bilan des forces. La seconde étudie les variations d'énergies (stockées dans le générateur, la capacité et le ressort). Les points d'équilibre sont donnés par la dérivée première de l'énergie totale, et la nature de l'équilibre par la dérivée seconde.

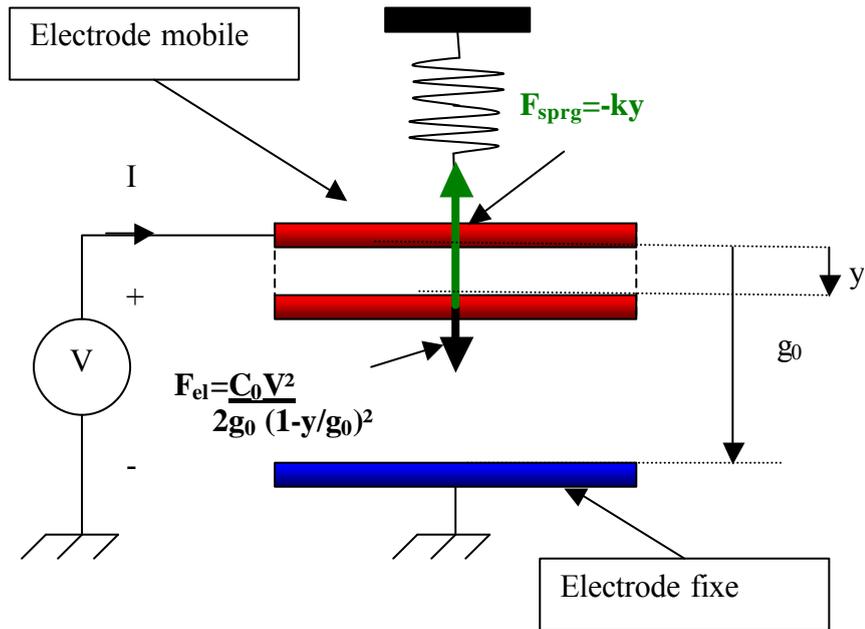


Figure III-7 : Schéma de fonctionnement d'un actionneur électrostatique de type plaques parallèles

Méthode 1

Considérons le système mécanique composé d'une électrode mobile. La force électrostatique exercée sur l'électrode mobile a pour expression :

$$F_{el} = \frac{1}{2} C_0 \frac{V^2}{g_0 \left(1 - \frac{y}{g_0}\right)^2} \quad (\text{III.32})$$

Avec $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{g_0}$ et S qui correspond à la surface de l'électrode.

La force de rappel exercée par le ressort a pour expression :

$$F_{sprg} = -ky \quad (\text{III.33})$$

Avec k la raideur du ressort.

L'équilibre des forces est atteinte lorsque $F_{el} + F_{sprg} = 0$. La Figure III-8 représente une résolution graphique de cette équation.

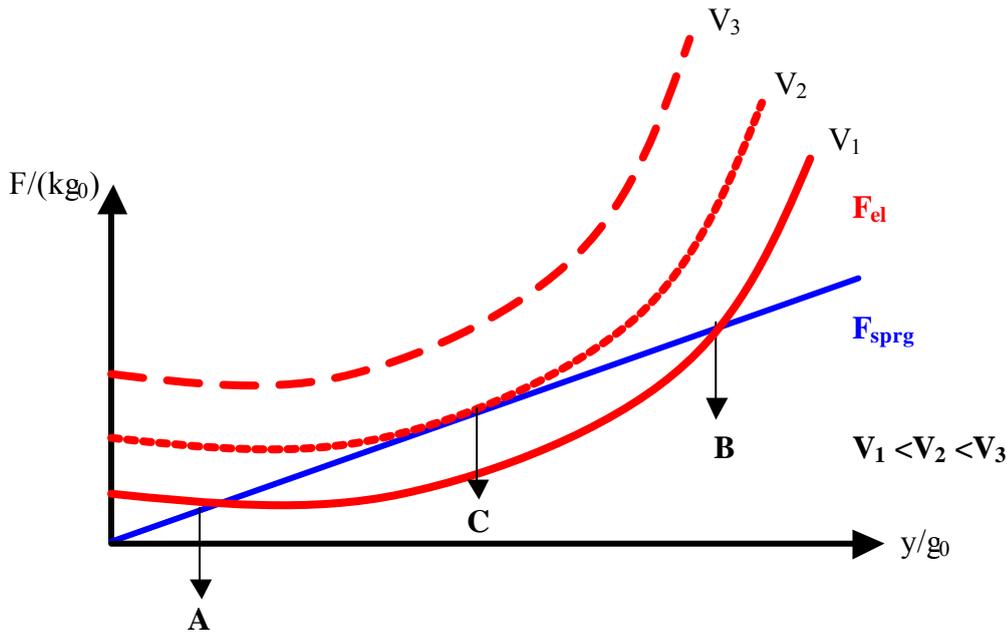


Figure III-8 : Représentation graphique des forces exercées sur le dispositif

Pour de faibles valeurs de tension, on remarque deux points d'intersection (A et B) dont l'un seulement correspond à une solution stable. Celle-ci peut être déterminée en appliquant une faible variation dy au système. Ce faible déplacement (dans le sens positif) provoque une augmentation de la force électrostatique. Dans le cas B celle-ci devient plus importante que l'augmentation de la force de rappel, ce qui éloigne le système de sa position d'origine : le point est instable. Dans le cas A, l'augmentation de la force électrostatique est plus faible que celle de la force de rappel, ce qui ramène le système à sa position d'origine : le point est stable.

Méthode 2

Considérons le même système mécanique composé d'une électrode mobile. L'énergie mécanique stockée dans le ressort à une position y a pour expression :

$$U_{sprg} = \frac{1}{2}ky^2 \quad (\text{III.34})$$

Avec k la raideur du ressort.

L'énergie électrique stockée dans la capacité pour une tension V à la position y a pour expression :

$$U_{el} = \frac{1}{2} V^2 C(y) = \frac{1}{2} C_0 V^2 \frac{\frac{y}{g_0}}{1 - \frac{y}{g_0}} \quad (\text{III.35})$$

Avec $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{g_0}$ et S qui correspond à la surface de l'électrode.

L'énergie électrique fournie par le générateur, pour maintenir la tension constante lors du déplacement de l'armature mobile, a pour expression :

$$U_{gen} = -\int V I dt = -\int V dQ = -V^2 C(y) = -C_0 V^2 \frac{\frac{y}{g_0}}{1 - \frac{y}{g_0}} \quad (\text{III.36})$$

L'énergie totale du système a donc pour expression la somme des énergies (Figure III-9) :

$$U_T(y) = U_{sprg}(y) + U_{el}(y) + U_{gen}(y) = \frac{1}{2} k y^2 - \frac{1}{2} C_0 V^2 \frac{\frac{y}{g_0}}{1 - \frac{y}{g_0}} \quad (\text{III.37})$$

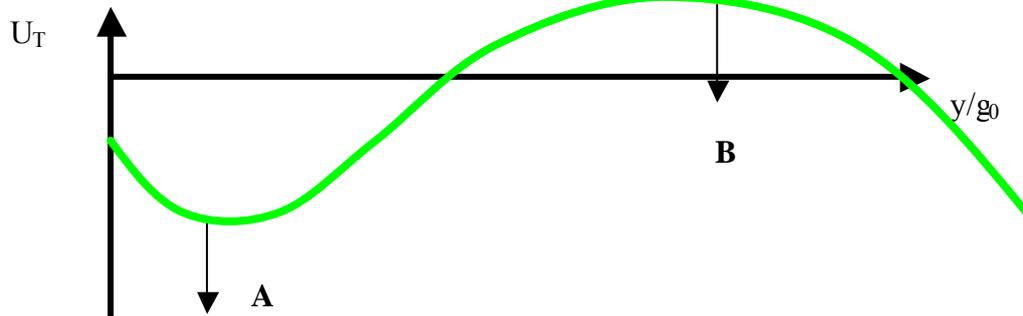


Figure III-9 : Représentation graphique de l'énergie totale du système dans le cas d'une tension faible

La dérivée de l'énergie totale permet de trouver les positions d'équilibre A et B. L'étude de la dérivée seconde de ces points nous donne la stabilité du système (stable si positif, instable si négatif).

Tension d'effondrement

Pour des tensions d'actionnement supérieur à la tension dite d'effondrement, il n'existe plus d'intersection entre les courbes de forces (Figure III-10). La force électrostatique devient, quelque soit la valeur de y , plus importante que la force de rappel. La position d'équilibre est atteinte lorsque l'énergie est minimale, c'est-à-dire lorsque les deux électrodes sont en contact (Figure III-11).

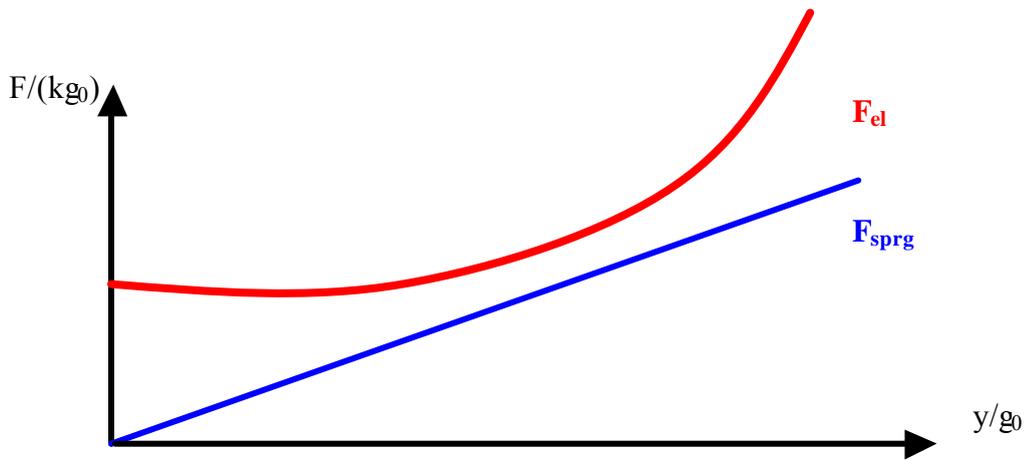


Figure III-10 : Représentation graphique des forces exercées sur le dispositif pour une tension d'actionnement supérieure à la tension d'effondrement

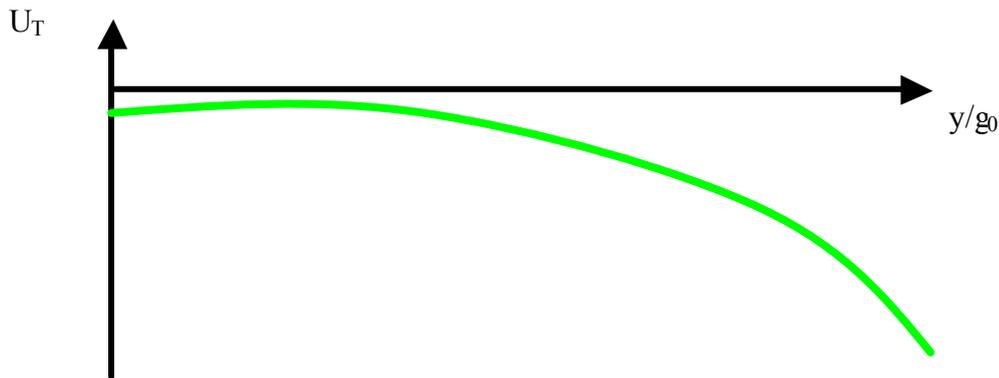


Figure III-11 : Représentation graphique de l'énergie totale du système pour une tension d'actionnement supérieure à la tension d'effondrement

Les deux méthodes ont chacune des avantages et des inconvénients. Cependant, la méthode des énergies est mieux adaptée à l'étude de la tension d'effondrement dans le cas d'un système comprenant plusieurs degrés de liberté. C'est cette dernière méthode que nous voyons :

Normalisons les variables.

$$\text{Soit } y_n = \frac{y}{g_0}, \quad V_n = \frac{V}{g_0 \sqrt{\frac{k}{C_0}}} \quad \text{et} \quad U_n = \frac{U_T}{\frac{1}{2} k g_0^2} = y_n^2 + V_n^2 \left(1 - \frac{1}{1 - y_n} \right)$$

Le système à résoudre pour déterminer la tension d'effondrement est :

$$\frac{\partial U_n}{\partial y_n} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 U_n}{\partial y_n^2} = 0 \quad (\text{III.38})$$

Soit en développant :

$$y_n^3 - 2y_n^2 + y_n - \frac{V_n^2}{2} = 0 \text{ et } 3y_n^2 - 4y_n + 1 = 0 \quad (\text{III.39})$$

La position d'équilibre est obtenue pour $y_n = \frac{1}{3}$.

Soit une tension d'effondrement de : $V_n = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)^3}$

En développant :

$$V_{\text{effondrement}} = g_0 \sqrt{\frac{8k}{27C_0}} \quad (\text{III.40})$$

Tension de décollement

Si la tension d'actionnement est supérieure à la tension d'effondrement l'électrode mobile vient en contact de l'électrode fixe. Pour se libérer de ce contact et revenir en zone stable, la tension doit être réduite à la tension de décollement. Soit t_{ox} et ϵ_{ox} l'épaisseur et la constante diélectrique de la couche d'isolant située sur l'électrode inférieure et permettant d'éviter tout court circuit entre les électrodes lors du contact.

L'équilibre des forces pour un allongement g_0 donne :

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_{ox} \frac{SV^2_{\text{décollement}}}{t_{ox}^2} = k g_0 \quad (\text{III.41})$$

soit :

$$V_{\text{décollement}} = \sqrt{\frac{2k g_0 t_{ox}^2}{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}} \quad (\text{III.42})$$

III. Etude théorique des dispositifs

1. Etude de la distribution de température

Afin de déterminer la répartition de température dans nos dispositifs, ces derniers sont modélisés par une ligne de longueur totale $2L+w_e$ et de largeur w (Figure III-12). De plus, l'influence du contacteur la répartition de température n'est pas modélisée. Les pertes supplémentaires générées par ce dernier étant négligeables.

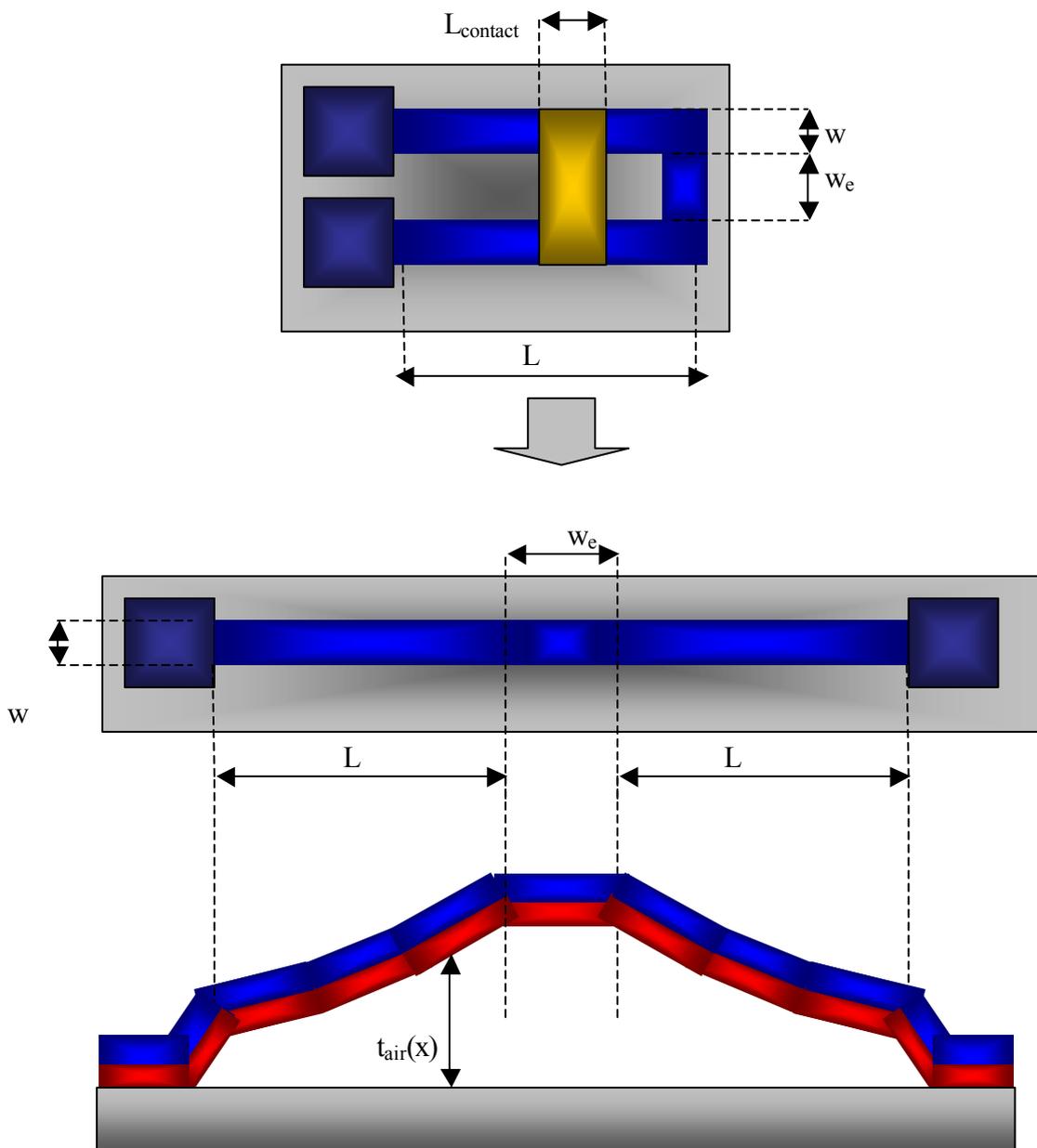


Figure III-12 : Modélisation de la structure pour une approche analytique de la distribution de température

Lors de l'actionnement électrothermique, il est intéressant de remarquer que la structure se trouve dans un état pré déformé par les contraintes. Dans ce cas, la ligne étudiée se caractérise par une épaisseur de couche d'air (sous la ligne) variant suivant x . Le terme A de l'équation différentielle (III.29) dépend donc de x , ce qui ne permet pas une résolution simple de l'équation différentielle. Pour simplifier le système différentiel, l'hypothèse de faibles variations de température est introduite. Cette hypothèse permet de considérer le terme A comme constant lors de la résolution de l'équation différentielle.

On pose $L_T=2L+W_e$, en prenant comme conditions initiales $q(0)=0$ et $q(L_T)=0$, on obtient l'expression de la température finale de la ligne en x_0 :

$$q(x_0) = \frac{B}{A^2} + C_1 e^{Ax_0} + C_2 e^{-Ax_0} \quad (\text{III.43})$$

$$C_1 = -\frac{B}{A^2} \left(\frac{1 - e^{-AL_T}}{e^{AL_T} - e^{-AL_T}} \right) \text{ et } C_2 = -\frac{B}{A^2} - C_1 \quad (\text{III.44})$$

Remarque : Le terme A dépend toujours de x . Cette dépendance s'observe dans l'expression finale de la température.

2. Etude de la déflexion

Afin d'alléger les expressions analytiques qui modélisent l'influence des contraintes résiduelles sur le dispositif, certaines hypothèses d'ordre géométriques sont utilisées. Elles concernent l'approximation du comportement mécanique de l'actionneur en U à celui de ceux de ses bras (Figure III-13), c'est-à-dire à une poutre cantilever de longueur L et de largeur $2w$. L'épaisseur de la couche supérieure du bilame est de t_1 , celle de la couche inférieure du bilame t_2 et celle du contact t_3 . t_{air} représente l'espace initial entre le substrat et la partie mobile du dispositif. $X_{contact}$ et $L_{contact}$ correspondent respectivement à la position du contacteur et sa longueur. $d(x)$ correspond à la déflexion du dispositif en x .

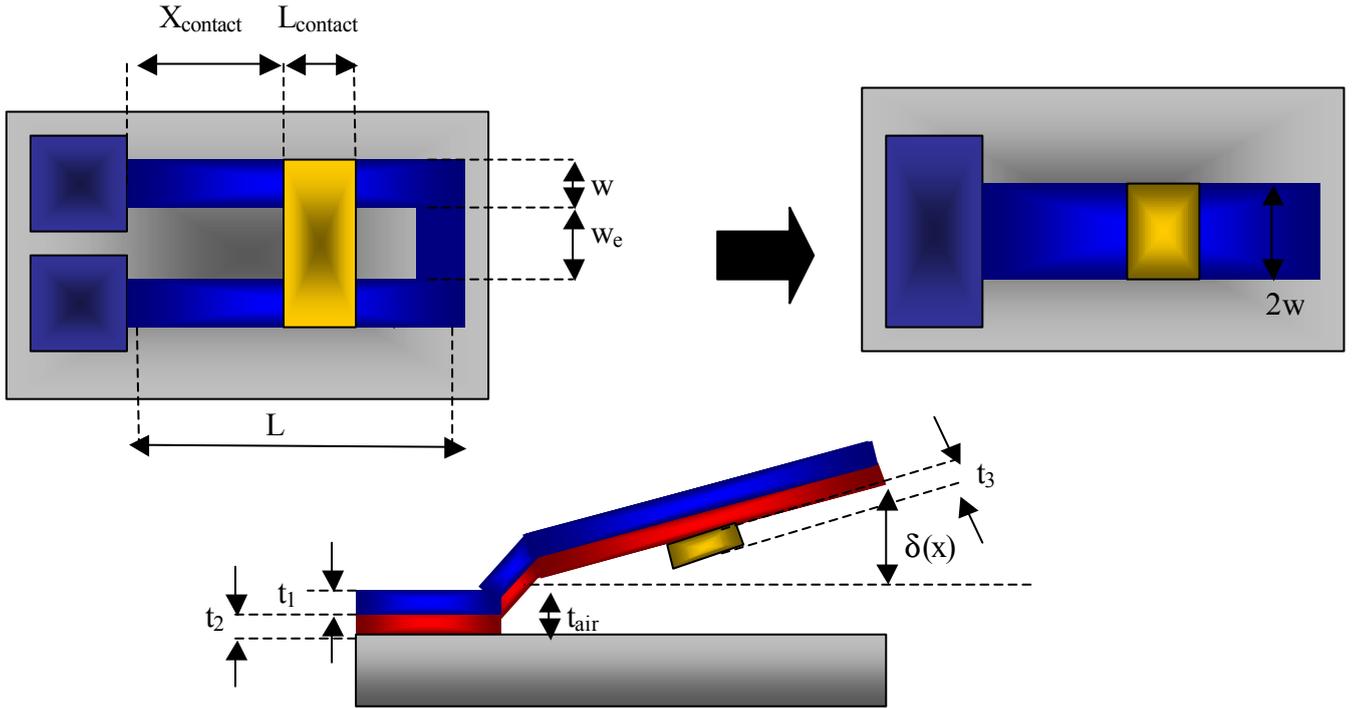


Figure III-13 : Modélisation de la structure pour une approche analytique de la déflexion initiale

Lors de l'actionnement électrothermique les contraintes thermiques générées par le chauffage doivent être réinjectées dans le modèle mécanique. La distribution de la température n'étant pas uniforme dans le dispositif actionné, elle a pour conséquence une variation de la courbure suivant l'axe x . Le nouvel allongement d'une poutre multicouche en x_0 est déterminé en reprenant l'expression (III.10) :

$$\mathbf{e}_{totali}(x_0) = \mathbf{e}_i - \left(\mathbf{a}_i + \frac{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i \mathbf{a}_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i} \right) \mathbf{q}(x_0) = \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_{thermi}(x_0) \quad (\text{III.45})$$

Le moment total induit en x_0 devient alors :

$$\text{et } M_{total} = M_{init} - \sum_{i=1}^n E_i t_i w_i \mathbf{e}_{thermi} (Y - Y_i) = M_{init} - M_{therm} \quad (\text{III.46})$$

Le rayon de courbure en x_0 a alors l'expression suivante :

$$\frac{1}{\mathbf{r}(x_0)} = \frac{M_{init} + M_{grad} - M_{therm}}{(EI)_{eq}} \quad (\text{III.47})$$

Soit en développant :

$$\frac{1}{\mathbf{r}(x_0)} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(E_i t_i w_i \left(\frac{\mathbf{s}_i}{E_i} + \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{s}_i t_i w_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i} \right) (Y - Y_i) + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n w_i t_i^2 \mathbf{s}_{1,i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{E_i w_i t_i^3}{12} + E_i w_i t_i (Y_i - Y)^2 \right]} - \frac{\sum_{i=1}^n \left(E_i t_i w_i \left(\frac{\mathbf{a}_i}{E_i} + \frac{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i \mathbf{a}_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i} \right) (Y - Y_i) \right)}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{E_i w_i t_i^3}{12} + E_i w_i t_i (Y_i - Y)^2 \right]} \mathbf{q}(x_0) \quad (\text{III.48})$$

Soit
$$\frac{1}{\mathbf{r}(x_0)} = \frac{1}{\mathbf{r}_1} - \frac{1}{\mathbf{r}_2} \mathbf{q}(x_0)$$

Avec $\mathbf{q}(x_0)$ l'augmentation de température en x_0 .

Si on se place dans l'hypothèse d'Euler Bernoulli l'expression (III.54) se réduit à :

$$\frac{1}{\mathbf{r}(x_0)} = \frac{d^2 z}{dx^2} \Big|_{x_0} \quad (\text{III.49})$$

Par intégration de l'expression (III.55) on obtient l'expression de la déflexion en x_0 d'une poutre cantilever.

$$\mathbf{d}(x_0) = \iint_{x_0} \frac{dx^2}{\mathbf{r}(x)} \quad (\text{III.50})$$

Soit en développant :

$$\mathbf{d}(x_0) = \frac{1}{\mathbf{r}_1} \iint_{x_0} dx^2 - \frac{1}{\mathbf{r}_2} \iint_{x_0} \mathbf{q}(x) dx^2 \quad (\text{III.51})$$

Notons que :

$$\int_{x_0} \mathbf{q}(x) dx = \int_{x_0} \left(\frac{B}{A^2} + C_1 e^{Ax} + C_2 e^{-Ax} \right) dx = \frac{B}{A^2} x_0 + \frac{C_1}{A} e^{Ax_0} - \frac{C_2}{A} e^{-Ax_0} + D_1 \quad (\text{III.52})$$

et que

$$\iint_{x_0} \mathbf{q}(x) dx^2 = \iint_{x_0} \left(\frac{B}{A^2} + C_1 e^{Ax} + C_2 e^{-Ax} \right) dx^2 = \frac{B}{A^2} \frac{x_0^2}{2} + \frac{C_1}{A^2} e^{Ax_0} + \frac{C_2}{A^2} e^{-Ax_0} + D_1 x_0 + D_2 \quad (\text{III.53})$$

Avec $C_1 = -\frac{B}{A^2} \left(\frac{1 - e^{-AL_T}}{e^{AL_T} - e^{-AL_T}} \right)$, $C_2 = -\frac{B}{A^2} - C_1$, $D_1 = -\left(\frac{C_1 - C_2}{A} \right)$ et $D_2 = -\left(\frac{C_1}{A^2} + \frac{C_2}{A^2} \right)$

D_1 et D_2 sont les constantes d'intégration en prenant comme hypothèse une intégrale nulle à l'origine.

L'équation (III.51) permet de déterminer la déflexion d'un cantilever composé uniformément de plusieurs couches. Cependant, le dispositif étudié se scinde en deux parties : une (voir deux) portion(s) bicouche correspondant à l'actionneur bilame et une portion tricouche correspondant à l'actionneur et le contacteur. Cette particularité lui confère un rayon de courbure variable. Pour une représentation correcte de la déflexion, il est donc impératif de prendre en considération la continuité du rayon de courbure et d'intégrer l'expression (III.48) en tenant compte de la section dans laquelle on se trouve.

Cas sans actionnement électrothermique

La déflexion de la poutre cantilever s'écrit alors sous la forme :

Pour x_0 compris entre 0 et X_{contact} :

$$\mathbf{d}(x_0) = \frac{x_0^2}{2\mathbf{r}_b} \quad (\text{III.54})$$

La notation « $_b$ » signifie que l'expression est appliquée au cas d'une poutre bicouche.

Pour x_0 compris entre X_{contact} et $X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}$:

$$\mathbf{d}(x_0) = \frac{x_0^2}{2\mathbf{r}_t} + E_1 x_0 + E_2 \quad (\text{III.55})$$

$$\text{Avec } E_1 = \left(\frac{1}{\mathbf{r}_b} - \frac{1}{\mathbf{r}_t} \right) X_{\text{contact}} \text{ et } E_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mathbf{r}_b} - \frac{1}{\mathbf{r}_t} \right) X_{\text{contact}}^2 - E_1 X_{\text{contact}}$$

La notation « $_t$ » signifie que l'expression est appliquée au cas d'une poutre tricouche.

Pour x compris entre $X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}$ et L :

$$\mathbf{d}(x_0) = \frac{x_0^2}{2\mathbf{r}_b} + E_3 x_0 + E_4 \quad (\text{III.56})$$

$$\text{Avec } E_3 = - \left(\frac{1}{\mathbf{r}_b} - \frac{1}{\mathbf{r}_t} \right) (X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}) + E_1 \text{ et}$$

$$E_4 = - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mathbf{r}_b} - \frac{1}{\mathbf{r}_t} \right) (X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}})^2 + (E_1 - E_3) (X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}) + E_2$$

Cas avec actionnement électrothermique

Dans ce cas le rayon de courbure en x_0 a pour expression :

$$\frac{1}{\mathbf{r}(x_0)} = \frac{1}{\mathbf{r}_1} - \frac{\mathbf{q}(x_0)}{\mathbf{r}_2}$$

ρ_1 correspond au rayon de courbure du cas sans actionnement et a été calculé précédemment. La déflexion de la poutre cantilever s'écrit alors sous la forme :

Pour x_0 compris entre 0 et X_{contact} :

$$\mathbf{d}(x_0) = \frac{x_0^2}{2\mathbf{r}_{1b}} - \frac{1}{\mathbf{r}_{2b}} \int_0^{x_0} \mathbf{q}(x) dx^2 \quad (\text{III.57})$$

La notation « $_b$ » signifie que l'expression est appliquée au cas d'une poutre bicouche.

Pour x_0 compris entre X_{contact} et $X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}$:

$$\mathbf{d}(x_0) = \frac{x_0^2}{2\mathbf{r}_{1t}} + E_1 x_0 + E_2 - \left\{ \frac{1}{\mathbf{r}_{2t}} \int_0^{x_0} \mathbf{q}(x) dx^2 + E_1' x_0 + E_2' \right\} \quad (\text{III.58})$$

$$\text{Avec } E_1' = \left(\frac{1}{\mathbf{r}_{2b}} - \frac{1}{\mathbf{r}_{2t}} \right) \int_{X_{\text{contact}}} \mathbf{q}(x) dx \text{ et } E_2' = \left(\frac{1}{\mathbf{r}_{2b}} - \frac{1}{\mathbf{r}_{2t}} \right) \int_0^{X_{\text{contact}}} \mathbf{q}(x) dx^2 - E_1' X_{\text{contact}}$$

La notation « $_t$ » signifie que l'expression est appliquée au cas d'une poutre tricouche.

Pour x compris entre $X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}$ et L :

$$\mathbf{d}(x_0) = \frac{x_0^2}{2\mathbf{r}_b} + E_3 x_0 + E_4 - \left\{ \frac{1}{\mathbf{r}_{2t}} \int_0^{x_0} \mathbf{q}(x) dx^2 + E_3' x_0 + E_4' \right\} \quad (\text{III.59})$$

$$\text{Avec } E_3 = - \left(\frac{1}{\mathbf{r}_b} - \frac{1}{\mathbf{r}_t} \right) (X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}) + E_1 \text{ et}$$

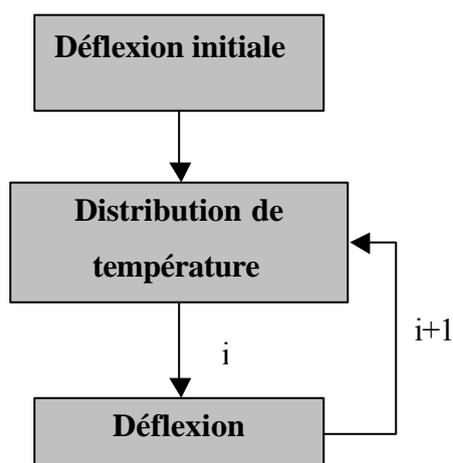
$$E_4 = - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mathbf{r}_b} - \frac{1}{\mathbf{r}_t} \right) (X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}})^2 + (E_1 - E_3) (X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}) + E_2$$

$$\text{Avec } E_3' = - \left(\frac{1}{\mathbf{r}_{2b}} - \frac{1}{\mathbf{r}_{2t}} \right) \int_{X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}} \mathbf{q}(x) dx + E_1' \text{ et}$$

$$E_4' = - \left(\frac{1}{\mathbf{r}_{2b}} - \frac{1}{\mathbf{r}_{2t}} \right) \int_0^{X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}} \mathbf{q}(x) dx^2 + (E_1' - E_3') (X_{\text{contact}} + L_{\text{contact}}) + E_2'$$

Remarque : Dans le cas de grandes déformations l'hypothèse d'Euler-Bernoulli n'est plus valable, on applique alors le modèle de Timoshenko. Dans cette hypothèse les contraintes de cisaillement sont prises en compte, car la section du cantilever n'est plus perpendiculaire à la poutre. Cependant, nous verrons par la suite, en confrontant les résultats avec la simulation par éléments finis, que les hypothèses d'Euler-Bernoulli, dans notre cas, sont acceptables.

Les équations (III.57) à (III.59) permettent de déterminer la forme finale du dispositif lorsqu'un courant le traverse et en régime statique. Cependant, cette approximation ne tient pas compte du fait que les pertes par conduction deviennent plus importantes lorsque le dispositif se rapproche du substrat. Il est donc nécessaire d'utiliser dans la résolution de l'équation une boucle itérative pour prendre en compte ce phénomène (Figure III-14). Cette boucle se traduit par une incrémentation du courant jusque sa valeur finale I .



Pour i de 0 à I courant appliquée au travers du dispositif et par pas de $1mA$

Figure III-14 : Principe de la boucle itérative dans le calcul de la déflexion

IV. Modélisation des phénomènes vibratoires et accélérations

L'une des premières phases de la modélisation des phénomènes vibratoires est de déterminer la fréquence de vibration naturelle du dispositif, car elle est à l'origine de la réponse dynamique des dispositifs. Les hypothèses sont les mêmes que pour l'étude de la déflexion (on approxime le système à une poutre de largeur $2w$ et de longueur L).

1. Calcul de la fréquence de résonance

L'expression de la fréquence naturelle de vibration d'une poutre est :

$$f_n = \frac{a_n}{2p} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{III.60})$$

k et m étant respectivement la raideur et la masse du cantilever. Dans notre cas, nous approximations la raideur du microcommutateur à celle d'un cantilever bilame de longueur L , de largeur $2w$, d'expression :

$$k = \frac{3(EI)_{eq}}{L^3} \quad (\text{III.61})$$

Et de masse totale m :

$$m = w(2L + w_e)(r_2 t_2 + r_2 t_2) + w_{contact} L_{contact} (r_{contact} t_{contact 2}) \quad (\text{III.62})$$

L'expression de la fréquence de vibration (II.26) devient alors :

$$f_n = \frac{a_n}{2p} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{a_n}{2p} \sqrt{\frac{3(EI)_{eq}}{L^3 (w(2L + w_e)(r_2 t_2 + r_2 t_2) + w_{contact} L_{contact} (r_{contact} t_{contact 2}))}} \quad (\text{III.63})$$

avec $(EI)_{eq}$ le module d'Young équivalent et d'expression :

$$(EI)_{eq} = \frac{1}{2w} \frac{t_1^3 t_2 E_1 E_2 K}{12(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \quad \text{et} \quad K = 4 + 6 \frac{t_2}{t_1} + 4 \frac{t_2^2}{t_1^2} + \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 + \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2} \quad (\text{III.64})$$

Remarque : On néglige dans ce calcul l'influence du contacteur sur la raideur du dispositif. La masse est supposée uniformément répartie sur le cantilever.

2. Coefficient de transmission

Lorsque l'on soumet un cantilever à une source de vibration, certaines vibrations sont absorbées par le cantilever, voire éliminées (notion de filtre mécanique). L'idée est alors de dimensionner le relais pour réduire l'influence des vibrations transmises sur le fonctionnement du dispositif. La fonction de transfert dépend directement de la fréquence naturelle de la poutre ainsi que de l'amortissement.

Le coefficient de transmission est défini par l'expression suivante :

$$T = \frac{1}{\left(\frac{f_d}{f_n}\right)^2 - 1} \quad (\text{III.65})$$

Où f_d représente la fréquence de vibration du support

Si on considère l'amortissement l'équation (II.65) devient :

$$T = \frac{1 + \left(2z \frac{f_d}{f_n}\right)^2}{\sqrt{\left(\left(\frac{f_d}{f_n}\right)^2 - 1\right)^2 + \left(2z \frac{f_d}{f_n}\right)^2}} \quad (\text{III.66})$$

3. Modélisation d'une accélération

Le temps nécessaire à l'établissement d'une accélération est considéré suffisamment grand pour négliger les phénomènes de chocs. On prend comme hypothèse une répartition uniforme de la masse. L'accélération peut être modélisée par une pression répartie uniformément sur le cantilever (Figure III-15). Cette pression a pour expression :

$$dF_m = Ng \frac{m}{L} \quad (\text{III.67})$$

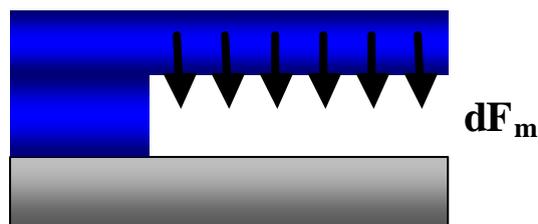


Figure III-15 : Modélisation de la structure pour une approche analytique de l'influence d'une accélération

La déflexion à l'extrémité d'une structure en U soumise à une pression uniforme dF_m est alors de :

$$\mathbf{d}_g = \frac{dF_m L^4}{8(EI)_{eq}} = \frac{(Ng) mL^3}{8(EI)_{eq}} \quad (\text{III.68})$$

Avec $m = w(2L + w_e)(\mathbf{r}_2 t_2 + \mathbf{r}_2 t_2) + w_{contact} L_{contact} (\mathbf{r}_{contact} t_{contact 2})$

$(EI)_{eq}$ le module d'Young équivalent et d'expression :

$$(EI)_{eq} = \frac{1}{2w} \frac{t_1^3 t_2 E_1 E_2 K}{12(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \quad \text{et} \quad K = 4 + 6 \frac{t_2}{t_1} + 4 \frac{t_2^2}{t_1^2} + \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 + \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2}$$

et N le nombre de g.

Remarque : On néglige dans ce calcul l'influence du contacteur sur la raideur du dispositif.

V. Modélisation de l'actionnement électrostatique

Le dispositif étudié est, au moment de l'actionnement électrostatique, déjà en contact avec le substrat. La déformation induit une tension d'effondrement difficilement modélisable analytiquement de manière simple. Nous encadrons alors la valeur de la tension d'effondrement et de décollement. En effet, nous considérons que la tension d'effondrement est inférieure à celle d'un cantilever plan soumis à un actionnement électrostatique (Figure II-2). Et que la tension de décollement est inférieure à celle d'un cantilever plan d'espace inter électrode initiale $g_0 + d_0$, d_0 étant la flèche initiale.

1. Tension d'effondrement

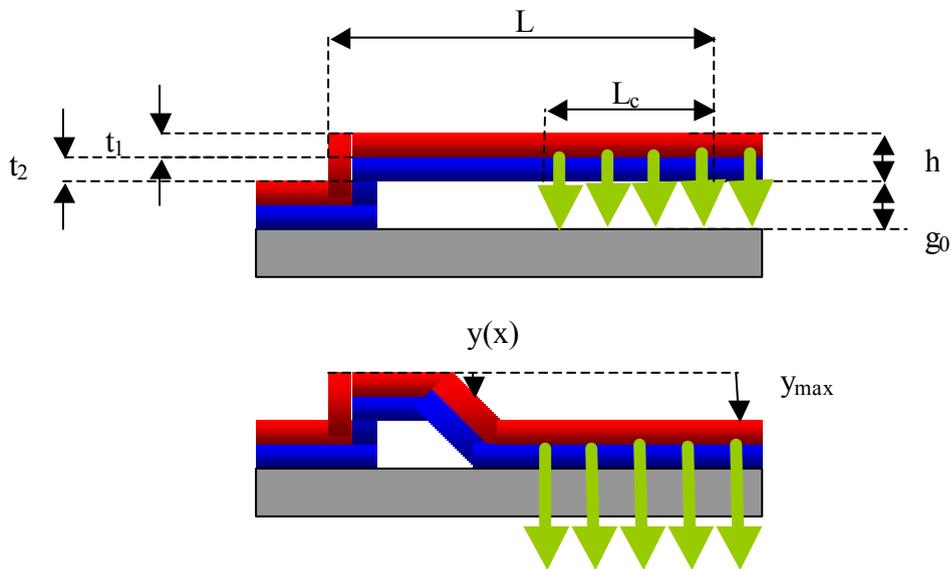


Figure III-16 : Tension d'effondrement d'une poutre encastrée libre soumise à une charge électrostatique uniforme distribuée partiellement

L'actionnement électrostatique d'une poutre encastrée libre ou bi encastrée peut être modélisée par un système à plaques parallèles moyennant une surface et une raideur effective [14].

La tension d'effondrement a alors pour expression :

$$V_{\text{effondrement}} = g_0 \sqrt{\frac{8k_{\text{eff}}}{27C_0}} \quad (\text{III.69})$$

Avec $C_0 = \epsilon_0 \frac{S_{\text{eff}}}{\left(\frac{g_0}{\epsilon_r} + \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} \right)}$ (l'épaisseur de l'isolant est prise en compte dans le calcul de la capacité).

Les expressions de la raideur et de la surface effective dans le cas d'une poutre cantilever sont données par [12]:

$$k_{eff} = 8 \frac{(EI)_{eff}}{L^3} \left[\frac{3}{8 - 6I_r + I_r^3} \right] \quad (III.70)$$

$$\text{Avec } I_r = \frac{L_c}{L}, (EI)_{eff} = \frac{1}{2w_{eff}} \frac{t_1^3 t_2 E_1 E_2 K}{12(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \text{ et } K = 4 + 6 \frac{t_2}{t_1} + 4 \frac{t_2^2}{t_1^2} + \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 + \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2}$$

La surface effective tient compte de deux effets : les effets de bord et la redistribution de charge. Les effets de bord interviennent lorsque la largeur de la poutre est faible ($w < t_{air}$). Une approximation de la largeur effective est donnée par [15] :

$$w_{eff} = w \left(1 + 0.65 \frac{(1-b)}{w} g_0 \right) \quad (III.71)$$

Où β est la déflexion maximum normalisée de la poutre dans le domaine stable.

$$b = \frac{y_{max}}{g_0} \quad (III.72)$$

Le gap (espace inter électrode) variable le long de la poutre entraîne une redistribution de charges. Cet effet résulte d'une réduction de la surface effective de l'électrode. Si on approxime la déflexion $y(x)$ a une fonction cosinus, le facteur de correction de la surface effective est donnée en résolvant l'équation :

$$\int_{L_c} \frac{1}{g_0 - y(x)} dx = \frac{a(b, I_r)}{g_0 - y_{max}} \quad (III.73)$$

$$\text{Avec } y(x) = \left(1 - \cos \left(\frac{x p}{2L} \right) \right) y_{max}$$

On obtient alors :

$$a(b, I_r) = \frac{4}{p} \frac{1-b}{\sqrt{1-2b}} \left(\arctan \left[\sqrt{1-2b} \right] - \arctan \left[\left(\sqrt{1-2b} \right) \tan \left(\frac{p}{4} (1-I_r) \right) \right] \right) \quad (III.74)$$

La surface effective est alors de :

$$S_{eff} = a(b, I_r) w_{eff}(b) L \quad (III.75)$$

La tension d'effondrement peut être déterminée si β est connu. Pour une poutre encastree libre il est de 0.45 [16] (on peut rappeler que dans le cas des plaques paralleles ce terme est egal à 1/3).

Si on considère un actionnement électrostatique uniforme sur l'ensemble de la longueur du cantilever ($L_c=L$). Et si la largeur de la poutre est supposée suffisamment importante pour négliger les effets de bord. La tension d'effondrement a pour expression :

$$V_{\text{effondrement}} = g_0 \sqrt{\frac{8 k_{\text{eff}}}{27 C_0}} \quad (\text{III.76})$$

2. Tension de décollement

Le bilan des forces, une fois que le cantilever a atteint la tension d'effondrement est de :

$$\frac{1}{2} \mathbf{e}_0 \mathbf{e}_{ox} \frac{SV^2}{t_{ox}^2} = k_{\text{eff}} g_0 \quad (\text{III.77})$$

La tension de décollement est alors de :

$$V_{\text{décollemen}} = \sqrt{\frac{2k_{\text{eff}} g_0 t_{ox}^2}{S_{\text{eff}} \mathbf{e}_0 \mathbf{e}_{ox}}} \quad (\text{III.78})$$

Cependant, la tension de décollement doit être suffisamment importante pour conserver l'électrode mobile sur le substrat même après la fin de l'actionnement électrothermique. La tension de décollement est alors inférieure à celle d'une poutre cantilever d'espace inter électrode initiale g_0+d_0 , d_0 étant la flèche initiale (Figure III-17).

$$V_{\text{décollemen}} = \sqrt{\frac{2k_{\text{eff}} (g_0 + d_0) t_{ox}^2}{S_{\text{eff}} \mathbf{e}_0 \mathbf{e}_{ox}}} \quad (\text{III.79})$$

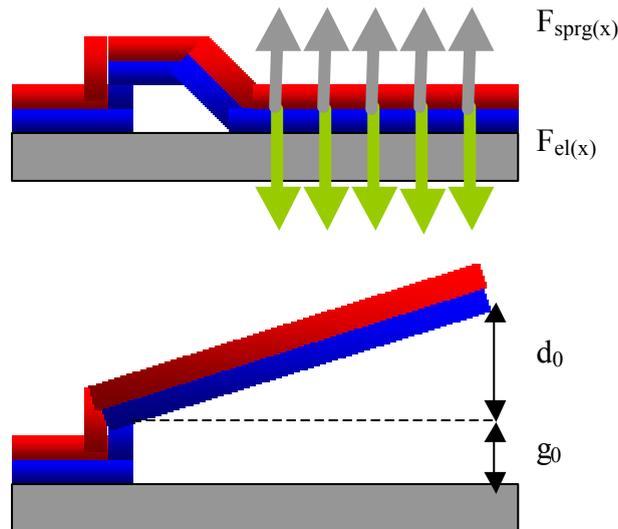


Figure III-17 : Tension de décollement d'une poutre encastrée libre soumise à une charge électrostatique

VI. Temps d'établissement

L'un des critères important d'un relais reste le temps de commutation, on l'approxime au temps d'établissement de la température car comme on le voit dans ce paragraphe il est nettement plus important que la réponse mécanique de la poutre cantilever.

Pour calculer la constante de temps thermique on néglige le terme $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ dans l'équation de chaleur et on ne considère que les variations temporelles. Cette approximation est rendue possible par le fait que le gradient de température longitudinal est plus petit que le gradient vertical ($\frac{\partial T}{\partial x} < \frac{\partial T}{\partial z}$). On notera cependant que dans cette approximation la température et la constante de temps τ , sont surestimées car les pertes par conduction le long de la structure sont négligées.

L'expression (III.21) devient alors :

$$P + P_{cond} + P_{conv} + P_{rad} = C \mathbf{r}_m w t_{metal} \Delta x \frac{\partial T}{\partial t} \quad (III.80)$$

Avec C la capacité calorifique et ρ_m la densité volumique du matériau.

On se place en $x=L$.

$$J^2 r w t_{metal} \Delta x [1 + \zeta(T - T_o)] - \frac{\mathbf{l}_\tau \mathbf{h}(L) w \Delta x (T - T_s)}{t_{air} + \mathbf{d}(L) + t_{ox}} = C \mathbf{r}_m w t_{metal} \Delta x \frac{\partial T}{\partial t} \quad (III.81)$$

Si on fait l'approximation $1 + \zeta(T - T_o)$ proche de 1

$$\frac{J^2 r t_{metal}}{\mathbf{l}_\tau \mathbf{h}} (t_{air} + t_{ox}) + T_s = \frac{C \mathbf{r}_m t_{metal}}{\mathbf{l}_\tau \mathbf{h}} (t_{air} + t_{ox}) \frac{\partial T}{\partial t} + T \quad (III.82)$$

On en déduit la constante de temps τ :

$$\tau = \frac{1}{\mathbf{h}(L)} (t_{air} + \mathbf{d}(L) + t_{ox}) C \mathbf{r}_m t_{metal} \quad (III.83)$$

Dans le cas d'une excitation de type sinusoïdale, et pour des fréquences de fonctionnement inférieures à la résonance mécanique du système, la réponse du dispositif est du premier ordre. La fonction de transfert est donnée par l'expression :

$$H(\mathbf{w}) = \frac{1}{\sqrt{\tau^2 \mathbf{w}^2 + 1}} \quad (III.84)$$

Remarque : Pour une période d'oscillation inférieure au temps d'établissement de la température, on observe une oscillation autour d'une valeur moyenne de déflexion.

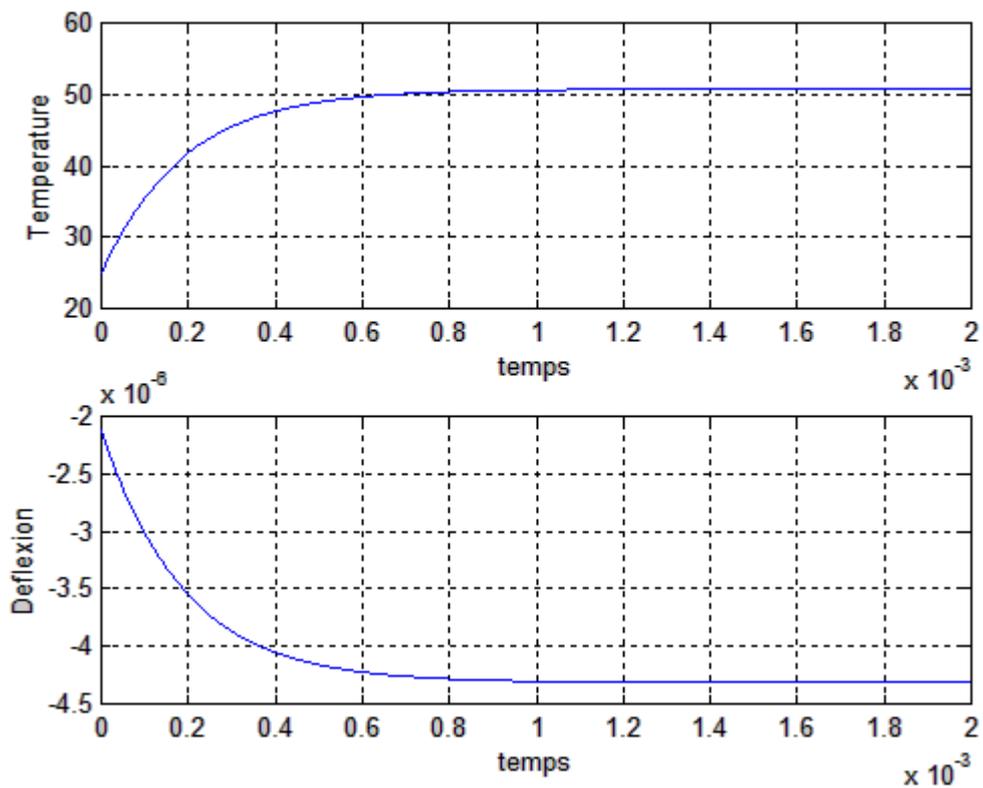


Figure III-18 : Illustration du temps d'établissement de la température et de son influence sur la déflexion.

VII. Comparaison simulation FEM et modélisation analytique

Cette partie s'intéresse à la concordance des résultats issus de la modélisation analytique en les confrontant à ceux d'une simulation FEM. Les différentes illustrations et vérifications concernent des structures bilames or/oxynitride de silicium en forme U et comprenant un contacteur en or. Les deux configurations de dispositif sont testées au repos puis actionnées de manière électrothermique.

Les propriétés physiques des matériaux utilisées dans les modélisations sont :

- Pour la couche d'oxyde de silicium une contrainte initiale de 0 MPa et un coefficient de dilatation thermique de $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
- Pour la couche d'or une contrainte initiale en tension de +100 MPa en tension, un coefficient de dilatation thermique de $14,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ et une résistivité de $2,2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

Les dimensions du dispositif modélisé sont :

- Une longueur de bras L de 150 μm .
- Une largeur de bras w de 20 μm .
- Un espacement entre les bras w_e de 20 μm .
- Une longueur de contacteur $L_{contact}$ de 20 μm situé à une distance de l'ancrage $X_{contact}$ de respectivement 90 et 130 μm (dispositif de type2 et 1).
- Une épaisseur de 0,5 μm pour le contacteur en or, 1 μm pour la couche d'oxynitride de silicium et 0,5 μm pour la couche d'or du bilame.

La distance initiale séparant l'élément mobile du substrat est fixée à 2 μm .

1. Actionnement électrothermique

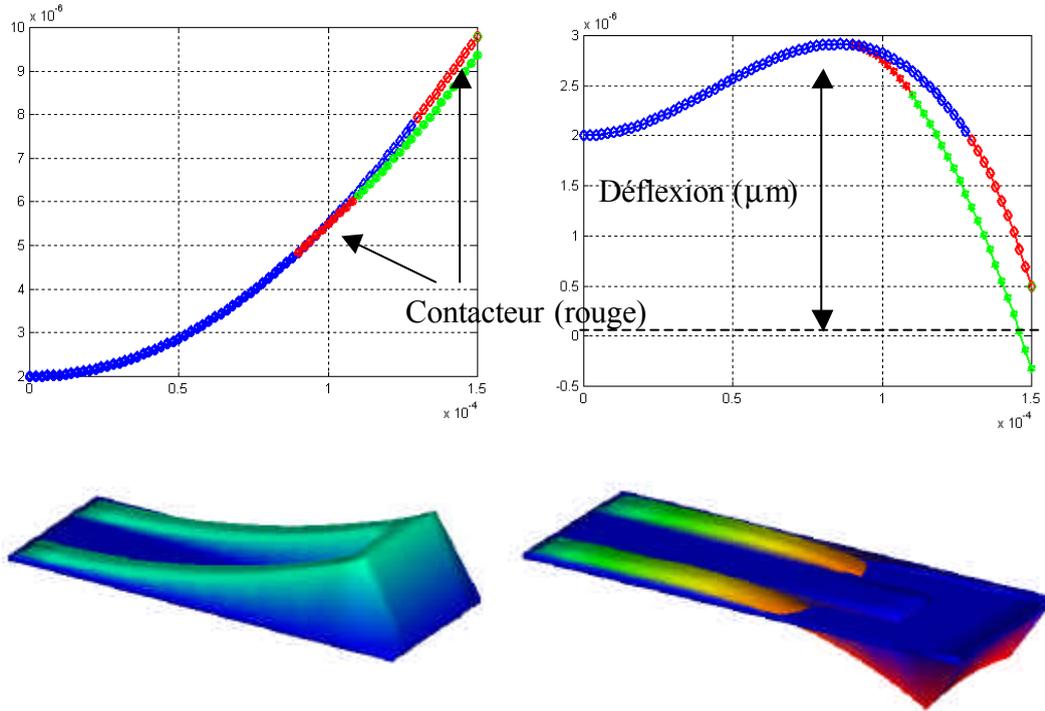


Figure III-19 : Illustration des modélisations analytiques et FEM concernant l'influence du contacteur.

Les tableaux III-1 et III-2 illustrent les résultats de simulation (déflexion et variation maximale de la température) des dispositifs pour configurations d'environnement.

Spécifications	Analytique	FEM	Erreur
Ta=-40°C, I=0 mA	19,79	19,07	3,64%
Ta=25°C, I=0 mA	12,39	10,53	15,01%
Ta=100°C, I=0 mA	3,84	3,83	0,26%
Ta=-40°C, I=200 mA	15,20	14,49	4,67%
Ta=25°C, I=200 mA	8,02	6,09	24,06%
Ta=100°C, I=200 mA	1,12	-1,77	258,04%

Tableau III-1 : Déflexion lue à l'extrémité du dispositif de type1 (contacteur à l'extrémité)

Spécifications	Analytique	FEM	Erreur
Ta=-40°C, I=0 mA	18,82	18,77	0,27%
Ta=25°C, I=0 mA	11,82	9,88	16,41%
Ta=100°C, I=0 mA	3,74	3,5	6,42%
Ta=-40°C, I=200 mA	14,17	15,47	9,17%
Ta=25°C, I=200 mA	7,41	7,32	1,21%
Ta=100°C, I=200 mA	1,03	-1,92	286,41%

Tableau III-2 : Déflexion lue à l'extrémité du dispositif de type2 (contacteur en retrait)

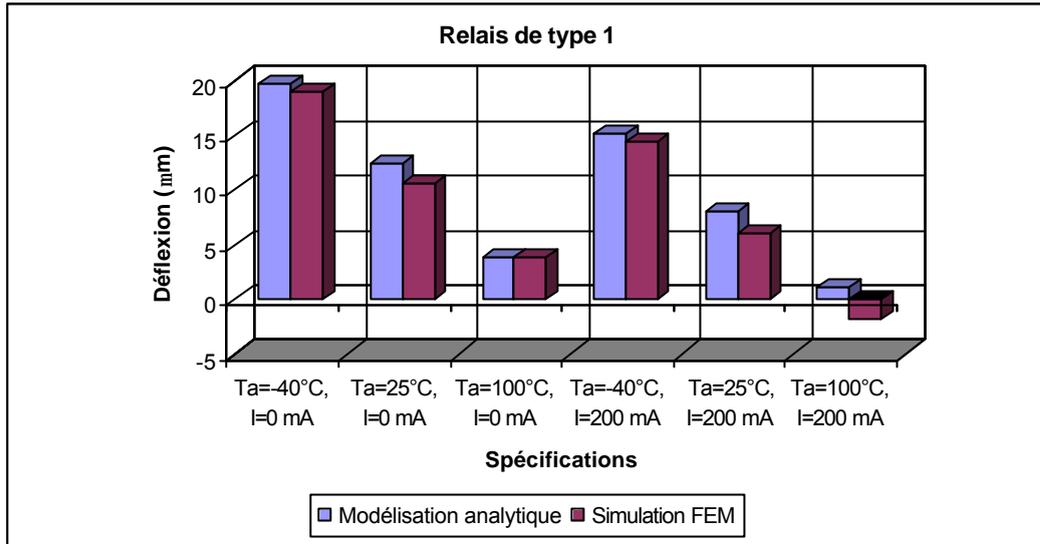


Figure III-20 : Comparaison des modèles (étude de la déflexion)

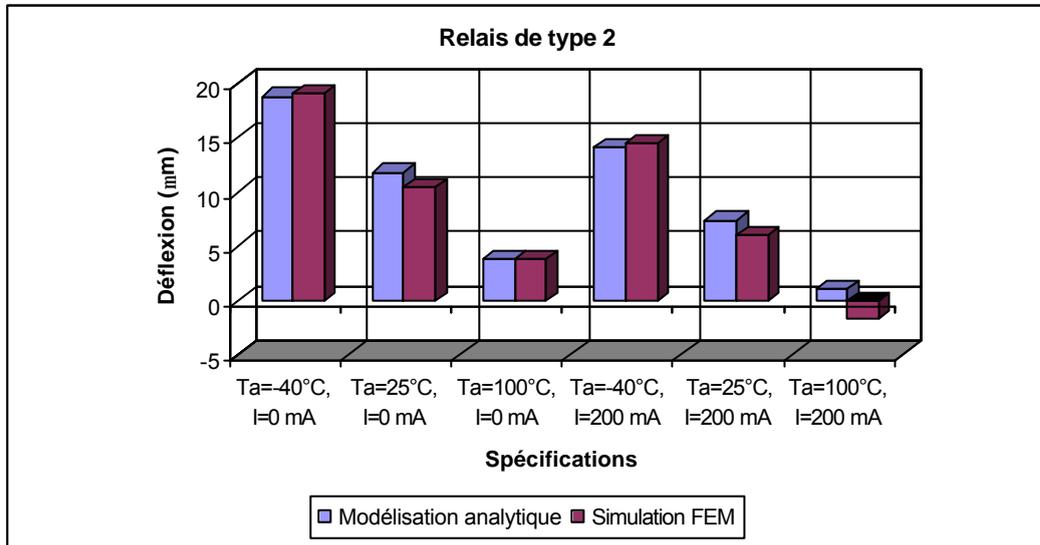


Figure III-21 : Comparaison des modèles (étude de la déflexion)

Spécifications	Analytique	FEM	Erreur
Ta=-40°C, I=200 mA	81,27	82	0,90%
Ta=25°C, I=200 mA	77,08	82	6,38%
Ta=100°C, I=200 mA	46,35	82	76,91%

Tableau III-3 : Variation maximale de température pour un dispositif de type1 (contacteur à l'extrémité)

Spécifications	Analytique	FEM	Erreur
Ta=-40°C, I=200 mA	80,91	82	1,35%
Ta=25°C, I=200 mA	76,44	82	7,27%
Ta=100°C, I=200 mA	44,69	82	83,49%

Tableau III-4 : Variation maximale de température pour un dispositif de type2 (contacteur en retrait)

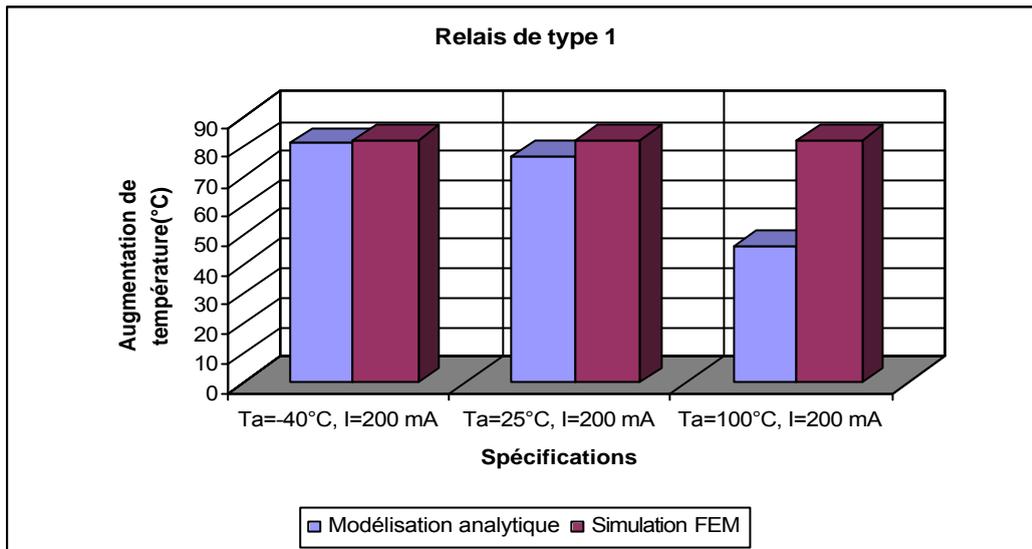


Figure III-22 : Comparaison des modèles (étude de la variation de température)

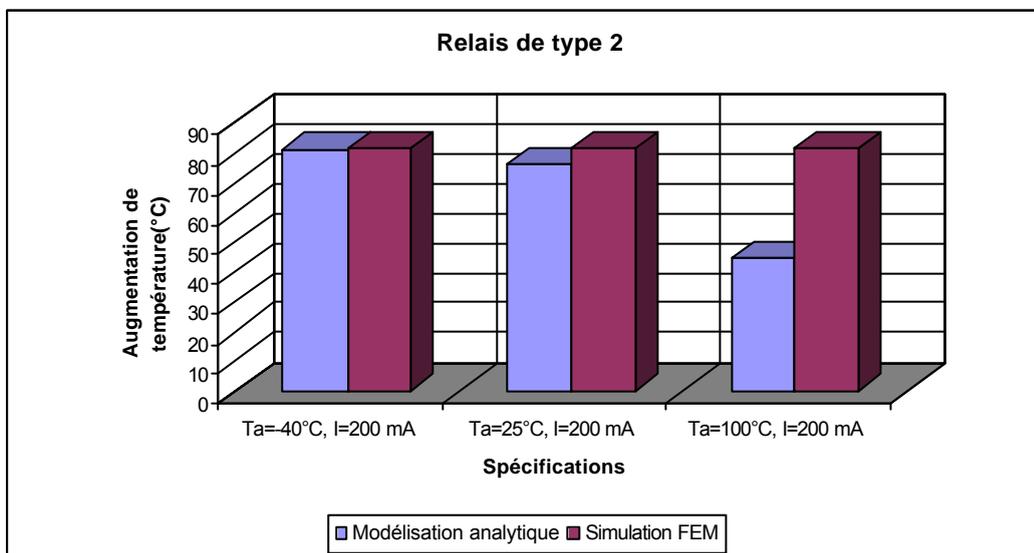


Figure III-23 : Comparaison des modèles (étude de la variation de température)

Conclusion : On constate que l'erreur, entre la modélisation analytique et la simulation FEM (Figure III-20 et Figure III-21), n'excède pas 15% pour la déflexion initiale des dispositifs (i.e. en l'absence d'actionnement). Cependant, lors de l'actionnement électrothermique l'erreur augmente fortement. Plusieurs raisons sont à l'origine de cette différence. Tout d'abord, la simulation FEM telle qu'elle a été entreprise ne prend pas en considération la déflexion initiale dans le calcul du chauffage par effet Joule. Suivant le même raisonnement, l'augmentation des pertes par conduction, à mesure que le dispositif se rapproche du substrat, n'est également pas prise en compte.

Remarque : Il est possible, dans le simulateur par éléments finis, de prendre en considération ces phénomènes, sous réserve d'augmenter de manière importante le temps de simulation et de compliquer lourdement la démarche de conception. La modélisation devant servir à un paramétrage rapide des dispositifs, ce point n'a pas été approfondi. De plus, les principes de base de l'actionnement électrothermique (déflexion et chauffage par effet Joule) ayant été validés séparément, on peut s'attendre à obtenir une erreur raisonnable.

2. Phénomènes vibratoires et accélération

Le tableau III-3 illustre les résultats de simulation (fréquence de résonance, et déflexion) des dispositifs.

	Analytique	FEM type1	FEM type2
Fréquence de résonance (kHz)	30,29	33,43	34,05
Déflexion sous 330g (mm)	0,2078	0,2112	0,2134

Tableau III-5 : Déflexion et fréquence de résonance

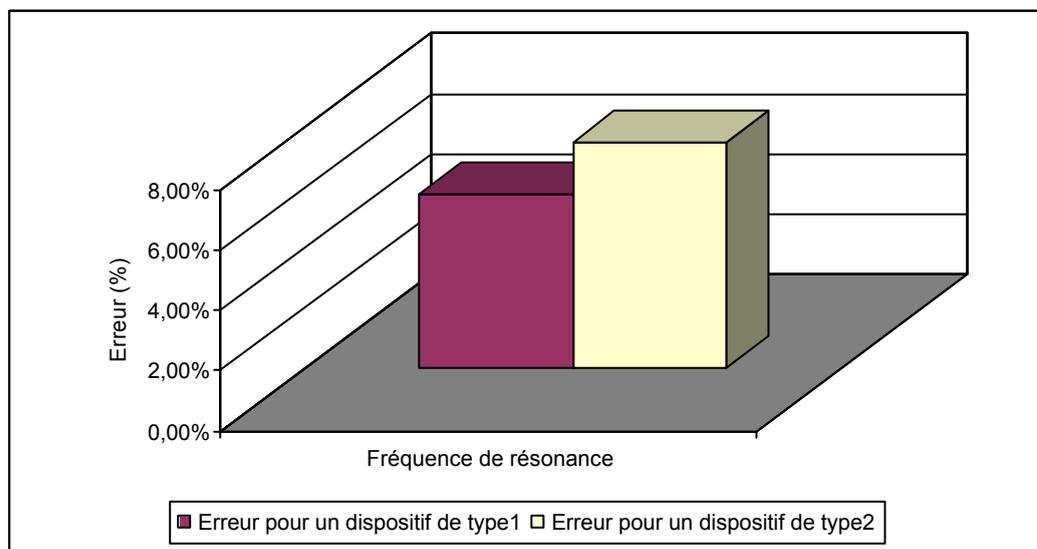


Figure III-24 : Comparaison des modèles (étude de la fréquence de résonance)

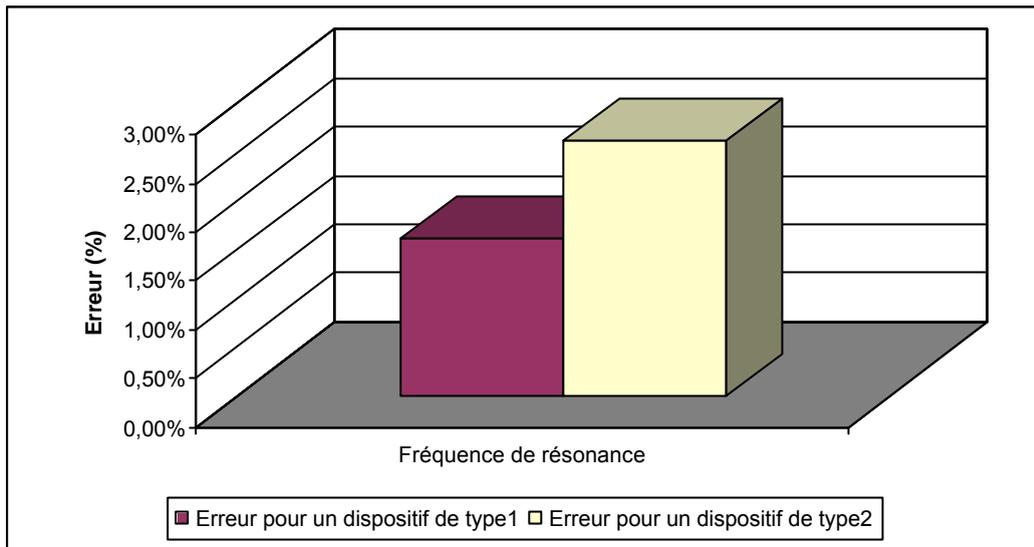


Figure III-25 : Comparaison des modèles (étude de l'accélération)

Conclusion : On constate une faible erreur (inférieure à 10% pour la fréquence de résonance et à 5% pour la déflexion sous accélération) entre la modélisation analytique et la simulation FEM (Figure III-24 et Figure III-25). Ce qui nous conforte dans les hypothèses prises lors des modélisations analytiques.

3. Actionnement électrostatique

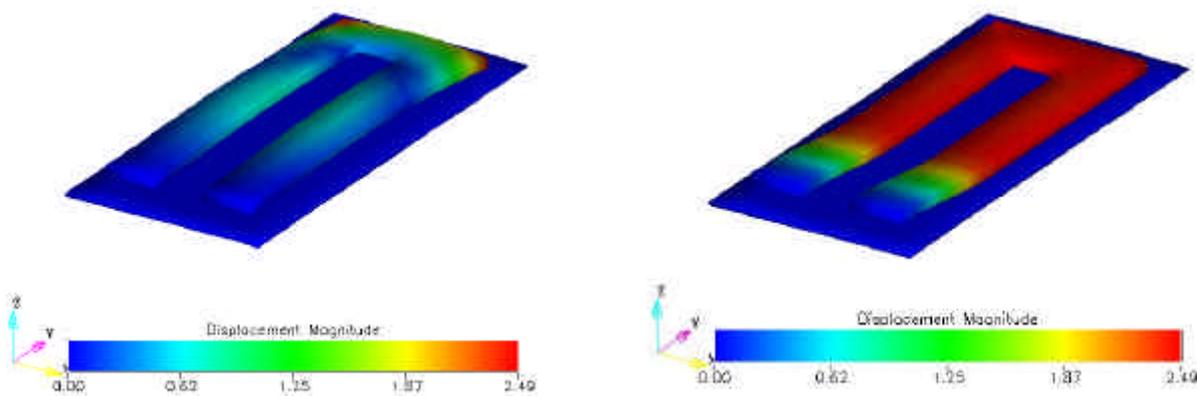


Figure III-26 : Illustration de l'actionnement électrostatique sous Coventor ware (Dispositif avec un actionnement électrothermique et une différence de potentiel de 0V puis 60V)

Le Tableau III-6 et la Figure III-27 illustrent les résultats de simulation (tension d'effondrement et tension de décollement) des dispositifs. On rappelle que les simulations analytiques encadrent uniquement la valeur de tension.

	Analytique (cantilever plan)	FEM (cantilever plan)	FEM (cas réel)
Tension d'effondrement (V)	17,85 (gap d_0)	21 (gap d_0)	52
Tension de décollement (V)	24,04 (gap d_{max})	31 (gap d_{max})	28

Tableau III-6 : Tension d'effondrement et de décollement d'une structure de longueur

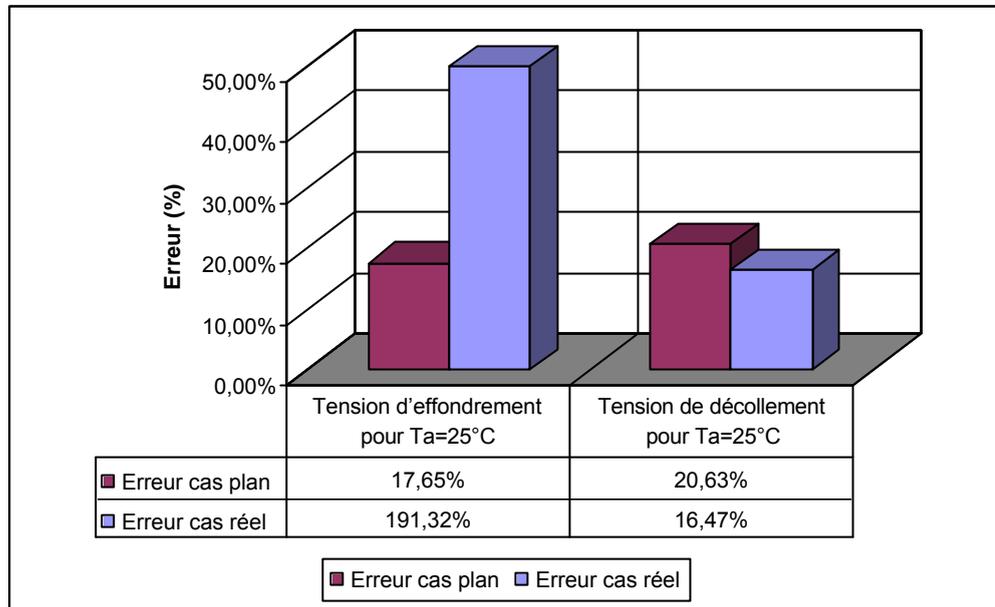


Figure III-27 : Erreur sur l'évaluation de la tension d'effondrement et de décollement

Conclusion : On constate une erreur importante sur l'évaluation de la tension d'effondrement (plus de 100% !). Ceci s'explique par la déformée du dispositif au moment de la simulation et des hypothèses de contact du simulateur (encastrement). En effet, le contact est simulé sans degré de liberté (pas de glissement), alors que l'on a supposé un effet « zip » du dispositif. De plus, la valeur qui nous intéresse réellement est la tension de décollement, celle-ci a une erreur inférieure à 20% ce qui reste raisonnable pour continuer l'étape de conception.

VIII. Conclusion

Nous avons mis en lumière dans les paragraphes précédents les divers mécanismes intervenant sur le fonctionnement du microrelais : actionnement, environnement, contact. Par ailleurs, nous avons vérifié la cohérence de ces résultats par des simulations FEM avec Coventorware®. L'étape suivante consiste à relier les différents mécanismes entre eux afin de définir une procédure, mise à la disposition du concepteur pour lui faciliter la tâche. Cette approche est résumée brièvement dans la Figure III-28. Celle-ci développe un modèle comportemental incluant l'influence de l'environnement. Au final, les divers résultats sont assemblés pour obtenir une description réaliste du comportement du dispositif.

La procédure débute par l'évaluation de la déflexion initiale. Cette valeur caractérisée, il est alors possible de connaître la distribution de température le long de la structure et par conséquent la déflexion du cantilever soumis à un actionnement thermique. La déflexion finale ainsi obtenue permet alors d'évaluer la tension de décollement nécessaire à l'écrasement du contact sur la ligne à commuter.

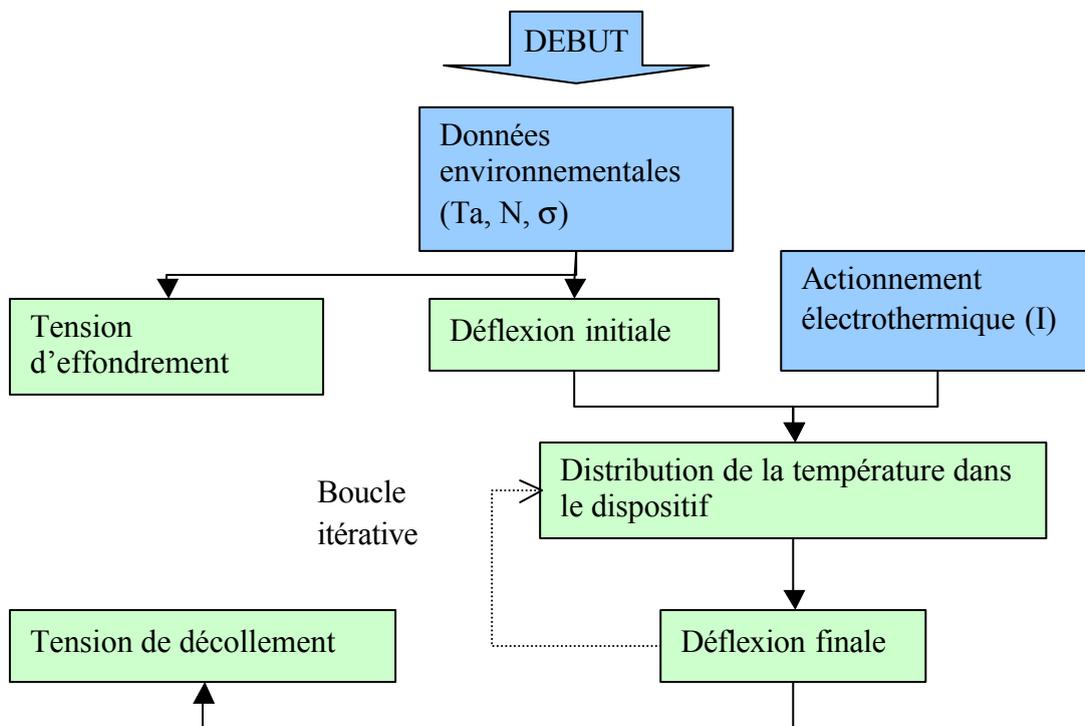


Figure III-28 : Schéma de principe de la modélisation

De nombreuses approximations ont été réalisées, du fait que le dispositif dépend fortement de certains paramètres (propriétés physiques des matériaux et géométrie). Ces approximations peuvent diminuer la précision des résultats. Cependant, le but de la simulation est de pouvoir rendre compte, rapidement et avec une précision raisonnable, du comportement de la structure considérée, cet objectif a donc été atteint.

IX. Références

- [1] Site Internet : <http://www.mathworks.com>
- [2] Site Internet : <http://www.ansys.com>
- [3] Site Internet : <http://www.coventor.com>
- [4] Site Internet : <http://www.memscap.com>
- [5] J.A. Thornton, D.W Hoffman, 1989, "Stress-related effects in thin film Thin Solid Films", Thin Solid Films, p171.5-171.31.
- [6] G. Zheng and W. Carr, 1994, "Internal stress of thin bimorph microengineered structure", Proc. Charac. For VLSI, p498
- [7] W-H. Chu, M. Mehregany, 1993, "A study of residual stress distribution through the thickness of p+ silicon films", IEEE Trans. on Electron Devices p1245–1250
- [8] Fang, W. and Wickert, J. A., 1996, "Determining Mean and Gradient Residual Stresses in Thin Films Using Micromachined Cantilevers," J. of Micromech. Microeng. Vol. 6, p. 301.
- [9] R.J. Roark, 1989, "Roark's Formulas for Stress and Strain", 6th ed., McGraw-Hill, p117
- [10] S.P. Timoshenko, 1972, "Mechanics of materials"
- [11] S.P. Timoshenko, 1925, "Analysis of bi-metal thermostats", *J. Opt. Soc. Am.*, 11, 233
- [12] L. Lin and M. Chiao, "Electrothermal response of lineshape microstructures" Sensors and Actuators, vol. A (55), p35-41
- [13] E. Cretu, 2003, "Inertiel MEMS devices : Modeling, Design and Applications", Acco Leuven, p236-248.
- [14] S. Majumder, N.E. McGruyer, P.M. Zavracky, G.G. Adams, R.H. Morrison, J. Krim, 1997, "Measurement and modelling of surface micromachined, electrostatically actuated microswitches", Transducers 97, p 1145-1148.
- [15] S. Pamidighantam, R. Puers, K. Baert, H. Tilmans, 2002, "Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed-fixed and fixed-free conditions", J. of Micromech. Microeng. Vol. 12, p. 458-464.

- [16] Gupta, R. K., 1997, "Electrostatic Pull-In Test Structure Design For In-Situ Mechanical Property Measurement of MEMS," Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Chapitre IV : CONCEPTION DU MICRO COMMUTATEUR

Cette partie s'intéresse à la phase de conception et d'optimisation des dispositifs de commutation. Elle définit le procédé de fabrication et dimensionne les dispositifs à partir des équations analytiques développées précédemment.

I.	Introduction	102
II.	Définition des contraintes de fabrication	103
III.	Contraintes fonctionnelles.....	108
IV.	Fabrication.....	117
V.	Structure de test in situ	124
VI.	Conclusion	134
VII.	Références.....	136

I. Introduction

Le processus de conception est un procédé itératif, obligeant de rectifier systématiquement les dimensions de structure, de couche, et de modifier des étapes technologiques. Il se fait à partir des résultats des simulations dans un premier temps puis de ceux observés lors de la fabrication et du test (Figure IV-1). Le processus de conception se termine par la génération des masques permettant la réalisation technologique du système à l'aide d'outils de CAO comme CADENCE.

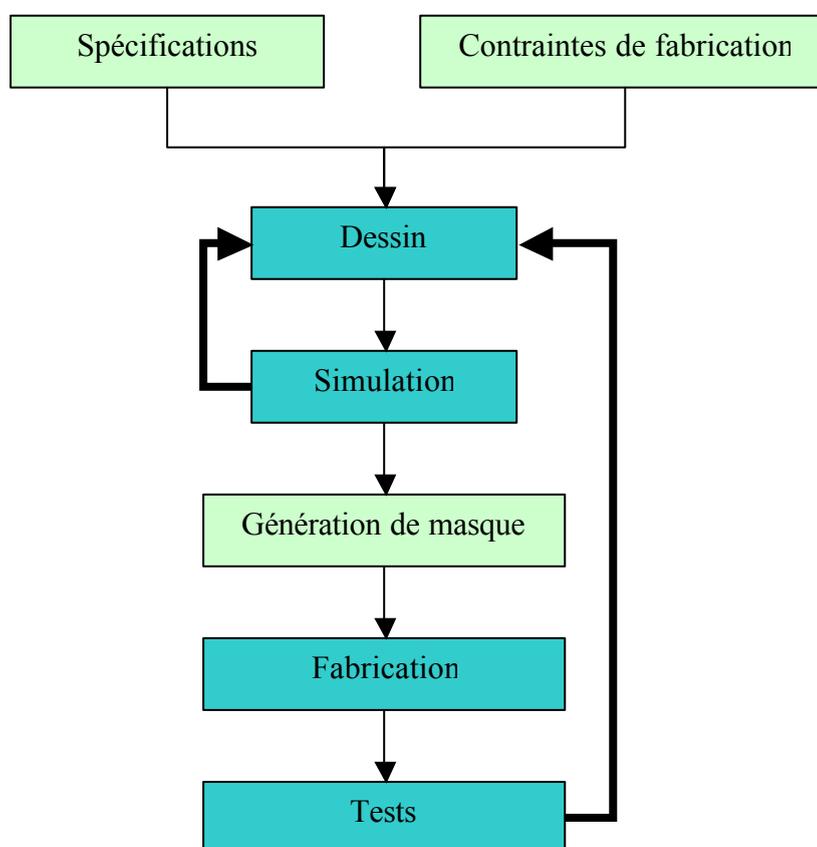


Figure IV-1 : Principales étapes de conception

II. Définition des contraintes de fabrication

Afin de déterminer les contraintes de fabrication, il est impératif de passer en revue les différents matériaux et les procédés de fabrication disponibles dans la centrale technologique de l'IEMN. La technologie employée est basée sur le micro usinage de surface. Elle consiste à usiner les différentes couches déposées pour ensuite, grâce à une gravure sélective de la couche sacrificielle, libérer certaines parties du microsysteme. Cette opération permet le déplacement de ces dernières.

1. Principaux moyens technologiques

a) Pulvérisation cathodique

La déposition par pulvérisation cathodique consiste en un bombardement, dans une chambre à vide, par un flux d'ions inertes (Argon, Helium) d'une cible constituée du matériau à déposer. Les particules éjectées du matériau sont alors déposées sur le substrat. Cette méthode est souvent utilisée pour la fabrication de microsystemes, car elle permet des dépôts à basse température ($< 150^{\circ}\text{C}$) de films métalliques fins comme l'aluminium, le titane, le chrome ou encore des oxydes de silicium voire des matériaux piézo-électriques. Les épaisseurs déposées sont rarement supérieures à $1\mu\text{m}$.

b) Evaporation

La déposition par évaporation fait appel au chauffage local d'une cible constituée du matériau à évaporer. Ceci dans le but d'obtenir une génération de vapeur se condensant sur le substrat. Le matériau à évaporer est placé dans un creuset en graphite refroidi par eau et bombardé par un faisceau d'électrons de 1 à 10 keV. Les sources d'évaporation par bombardement électronique, les plus couramment utilisées, comportent un filament en tungstène chauffé à haute température (de 2500°C à 2800°C) qui, de ce fait, émet des électrons. Ces électrons sont accélérés par un champ électrique de quelques kV/cm créé par une anode. Celle-ci percée d'un trou pour laisser échapper le faisceau d'électrons est placée devant le creuset. La déflexion du faisceau est contrôlée grâce à des bobines magnétiques qui permettent un balayage de la surface du creuset. La conformité du dépôt le rend particulièrement intéressant lors des procédés de lift-off. Les épaisseurs déposées sont généralement inférieures à $0,5\mu\text{m}$.

c) Dépôts chimiques

Le principe des dépôts chimiques est d'initier une réaction chimique, dans une chambre à vide, en déposant une espèce réactive sur un substrat porté à température. On trouve à l'IEMN deux types de dépôt chimique :

- les dépôts à basse pression (LPCVD pour Low Pressure Chemical Vapor Deposition),
- les dépôts à l'aide de gaz ionisé ou plasma (PECVD pour Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition).

On notera que les températures de dépôt en PECVD sont de l'ordre de 300°C, tandis que pour les dépôts LPCVD les températures sont de l'ordre de 700°C.

d) Lithographie

La lithographie consiste en un procédé photographique, permettant d'imprimer des images sur des couches de matériaux photosensibles. Ces dessins sont généralement utilisés par la suite comme masque de protection, lors d'une étape de gravure ou comme élément sacrificiel, dans une étape de lift-off.

La lithographie implique la séquence des trois étapes suivantes

- Application d'une résine photosensible,
- Exposition optique pour imprimer l'image du masque sur la résine,
- Immersion du substrat dans une solution aqueuse de développement, pour dissoudre la résine exposée, et rendre ainsi visible l'image latente.

e) La gravure

Les étapes de gravure sont de deux types : humide ou sèche. Elles permettent de supprimer de manière sélective un matériau, de façon isotrope ou anisotrope. La gravure isotrope grave dans toutes les directions, par opposition, une gravure de type anisotrope grave selon une direction privilégiée. La gravure humide s'effectue par immersion des substrats dans une solution chimique réactive. Une gravure sèche s'effectue en utilisant un réacteur et un plasma.

2. Recherche des matériaux utilisables

La conception du dispositif se fait sur une plaquette de silicium recouverte d'un nitrure de silicium pour l'isolation. Cinq couches entrent dans la composition des dispositifs (Figure IV-2).

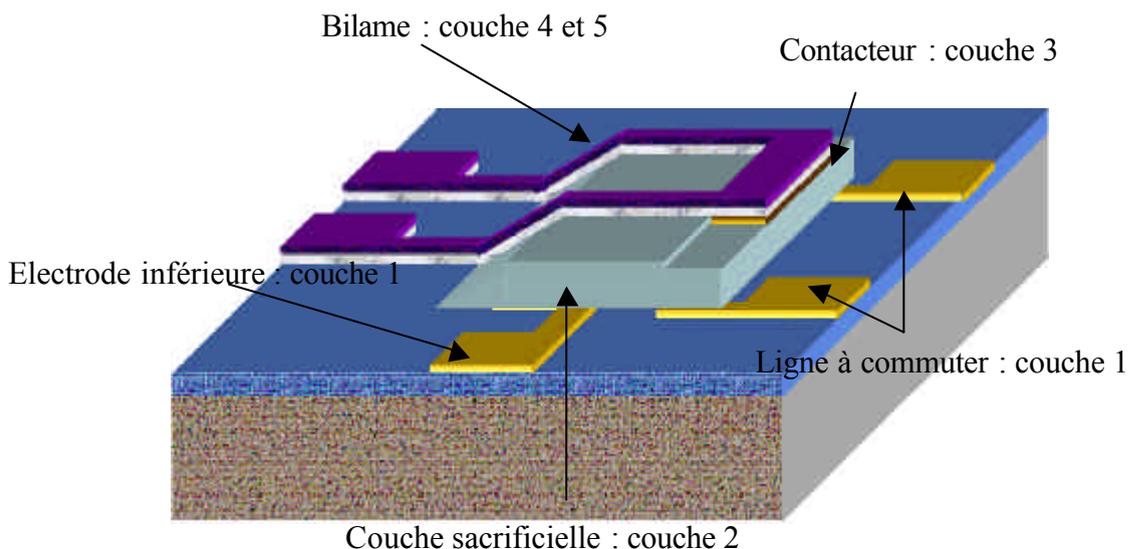


Figure IV-2: Description des différentes couches constituant le microrelais

a) Ligne à commuter et électrode enterrée

La ligne à commuter transporte le signal, il est donc préférable d'utiliser un matériau de faible résistivité et bon conducteur thermique pour éviter un échauffement trop important du contact. Pour des raisons de compatibilité technologique et de par sa nature noble, le choix s'est porté sur l'or.

Remarque : L'utilisation d'une couche métallique (pour les lignes d'accès) dans les toutes premières phases de fabrication impose, pour la suite du procédé, l'usage de dépôt basse température ($<300^{\circ}\text{C}$). Ceci restreint la gamme des matériaux disponibles pour la suite du procédé aux métaux, résines et oxydes (ou nitrures) de silicium déposés par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition).

b) Couche sacrificielle

La couche sacrificielle est destinée à être gravée entièrement à la fin du procédé de fabrication. Le matériau employé doit être facile à mettre en place et le plus neutre possible (sélectivité, lors de son attaque, entre les autres matériaux devant être excellente). Plusieurs solutions sont envisageables :

- Une couche sacrificielle en métal (procédé délicat à employer à cause des sélectivités d'attaque chimique entre matériaux, des contraintes et des contaminations possibles).

- Une couche sacrificielle en résine (le principal problème étant la faible température du procédé de fabrication qu'elle impose).

Au vu des sélectivités et des épaisseurs pouvant être utilisées l'emploi d'une résine (PMGI SF11) est préféré pour la composition de la couche sacrificielle.

c) Contacteur

Le contacteur est isolé électriquement des différents éléments d'actionnement (électrodes électrostatiques, et élément chauffant) par la couche inférieure du bilame. Les propriétés, qui nous intéressent ici, sont la résistivité électrique. En effet, tout comme la ligne à commuter, le contacteur sert à transporter le signal une fois la commutation établie : un matériau de faible résistivité est donc recommandé. Pour les mêmes raisons que précédemment le choix se porte sur l'or.

d) Bilame

La composition du bilame demande plus de réflexion, car il est l'élément principal de l'actionnement. La couche supérieure doit servir à la fois d'élément chauffant et de couche de forte dilatation thermique pour l'effet bilame. Les couches susceptibles de convenir sont l'aluminium et l'or. Concernant la couche inférieure, celle-ci doit assurer le rôle d'isolant électrique et de couche de faible dilatation thermique.

e) Propriétés des matériaux

Les tableaux ci-dessous (IV-1 à IV-4) présentent les caractéristiques de matériaux envisageables pour le procédé de fabrication. Les valeurs présentées sont des valeurs théoriques issues de la littérature [1]. Les tableaux IV-1 et IV-4 présentent également les valeurs de contraintes et résistivités des matériaux déposés à l'IEMN et mesurées après une première phase de fabrication.

Matériaux	Mode de dépôt	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'Young (GPa)	Contrainte résiduelle théorique (MPa)	Contrainte résiduelle mesurée (MPa)	Gradient de contrainte mesurée (MPa)
Aluminium	Pulvérisation	2,70	77	+45	+150	+250
Or	Pulvérisation	19,30	73	+100	+300	+300
Si _x N _y O _z	PECVD	2,15	70	+0	-25	+0
SiO ₂	PECVD	2,15	70	-400	-400	+0

Tableau IV-1 : Propriétés mécaniques des matériaux employés

Matériaux	Conductivité thermique W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Coefficient d'expansion thermique 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Capacité Calorifique J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Point de fusion °C
Aluminium	237	23,6	908	660
Or	296	14,2	129	1064
Si _x N _y O _z	1,4	0,6	750	-
SiO ₂	0,2	0,6	750	-

Tableau IV-2 : Propriétés thermiques des matériaux employés

Matériaux	Résistivité électrique Ohm.m théorique	Résistivité électrique Ohm.m mesurée
Aluminium	2,8.10 ⁻⁸	4.10 ⁻⁸
Or	2,2.10 ⁻⁸	5.10 ⁻⁸

Tableau IV-3 : Propriétés électriques des matériaux employés

Matériaux	Gravure chimique	Gravure physique	Remarques
Aluminium	HNO ₃ /HF/Bases	ionique	Oxydation rapide
Or	KI	ionique	Sous gravure chimique importante
Si _x N _y O _z	HF	RIE (CF ₄ -CHF ₃)	-
SiO ₂	HF	RIE (CF ₄ -CHF ₃)	-

Tableau IV-4 : Méthodes de gravure des matériaux employés

III. Contraintes fonctionnelles

1. Rappels

Afin d'aider à la compréhension de la phase de conception, les spécifications environnementales et fonctionnelles sont rappelées dans le Tableau IV-5 et le Tableau IV-6.

Température de fonctionnement	Entre -40°C et +100°C
Vibrations	.04g ² /Hz, 20 à 2000Hz, 10g rms, 30g max. (3σ)
Choc	300g

Tableau IV-5 : Spécifications environnementales

Courant à commuter	>100mA
Consommation	>100mA
Tension autorisée	+/- 15V

Tableau IV-6 : Spécifications fonctionnelles

Le but de cette partie est de fournir les principales caractéristiques géométriques (longueur, largeur et épaisseur de couche) des différentes parties constituant le microrelais (actionneur et contact). La méthode utilisée pour déterminer les dimensions du dispositif est une analyse paramétrée de la structure. Cette étape consiste à faire varier automatiquement différents paramètres pour en étudier les conséquences sur le comportement de la structure. Le résultat de ces simulations permet de définir pour chaque variable une fourchette de valeurs autorisant ou non le bon fonctionnement du dispositif.

2. Dimensionnement de l'actionneur

La phase d'actionnement se scinde en deux : la première électrothermique et la seconde électrostatique, la priorité étant donnée à l'actionnement électrothermique. Ce sont les besoins et les effets (thermique et mécanique) de ces différents actionnements qui imposent les principales restrictions géométriques au dispositif.

Considérations préliminaires

La conception de l'actionneur thermique doit prendre en compte le fait que le cantilever doit être suffisamment large pour être peu sensible au déplacement dans le plan.

Le cantilever devra aussi être assez grand pour disposer d'une surface de contact importante. Il doit cependant comprendre une surface totale raisonnable pour éviter les phénomènes de stiction et de collage avec le substrat.

La largeur des bras du dispositif est fixée à 20 μm . Une largeur inférieure risque de diminuer la consommation (en effet, le dispositif doit consommer du courant) et une largeur supérieure voit l'apparition de problèmes liés aux contraintes (flambages et déformations latérales).

Il apparaît également que des concentrations de contraintes (liées à l'actionnement électrothermique) (Figure IV-3) sont importantes au niveau des angles droits. Afin de répartir ces contraintes de manière plus uniforme et ainsi diminuer les risques d'apparition de fissures les angles aigus sont éliminés.

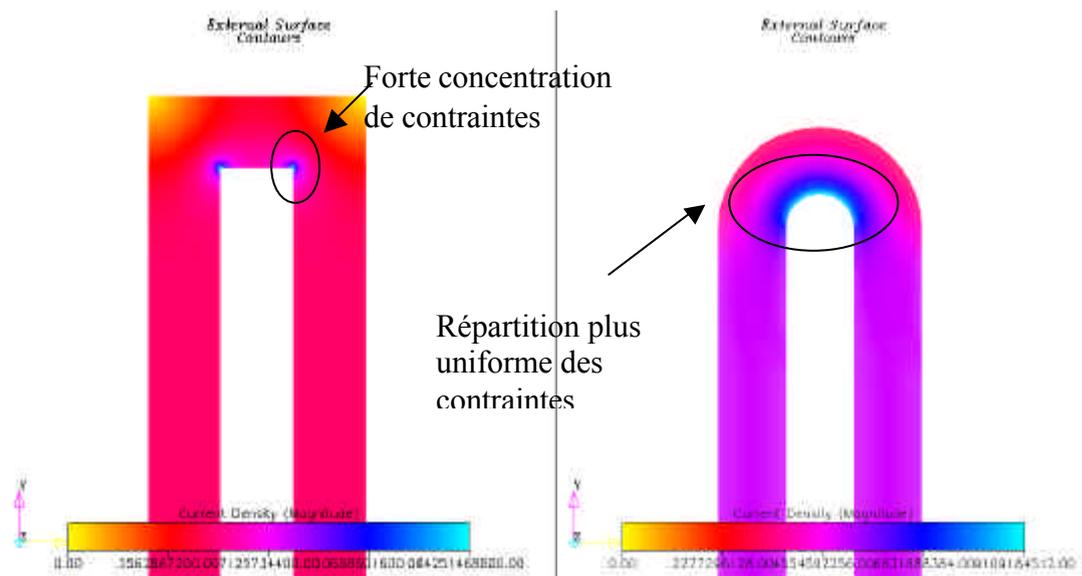


Figure IV-3 : Répartition de la densité de courant

Accélération

La Figure IV-4 présente la déflexion de l'apex du dispositif lors d'une accélération de 330g. Les résultats se caractérisent par l'observation d'une faible flèche (inférieure à 5% de la longueur du dispositif) générée par l'accélération.

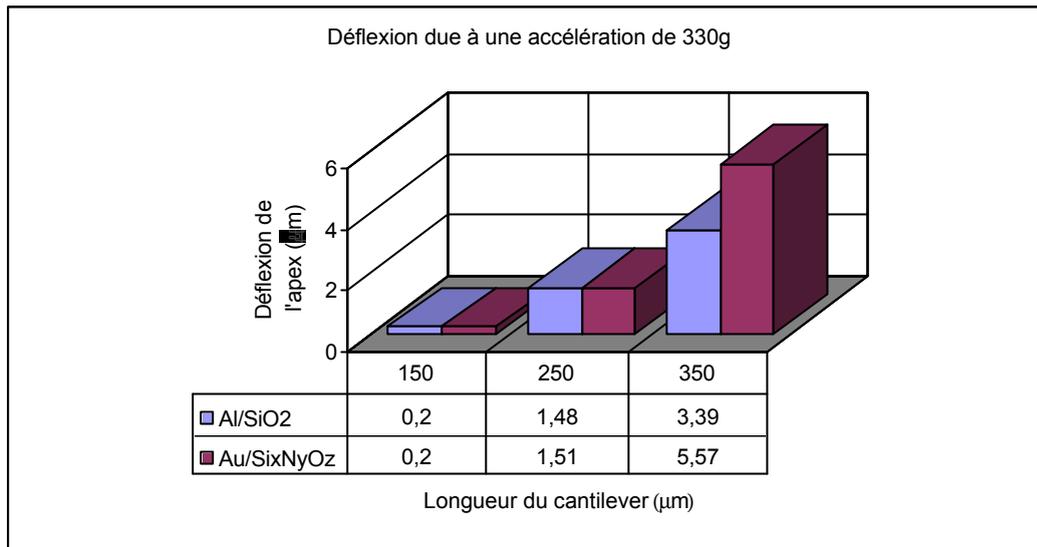


Figure IV-4 : Déflexion pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 150 μm de longueur et 20 μm de largeur de bras.

Vibrations

La Figure IV-5 présente la fréquence de résonance pour plusieurs longueurs de dispositifs. On observe une fréquence de résonance supérieure (5 à 15 fois plus importante) à la gamme de fréquence des vibrations (0-2000Hz). On peut alors approximer le coefficient de transmissibilité comme sensiblement égal à 1

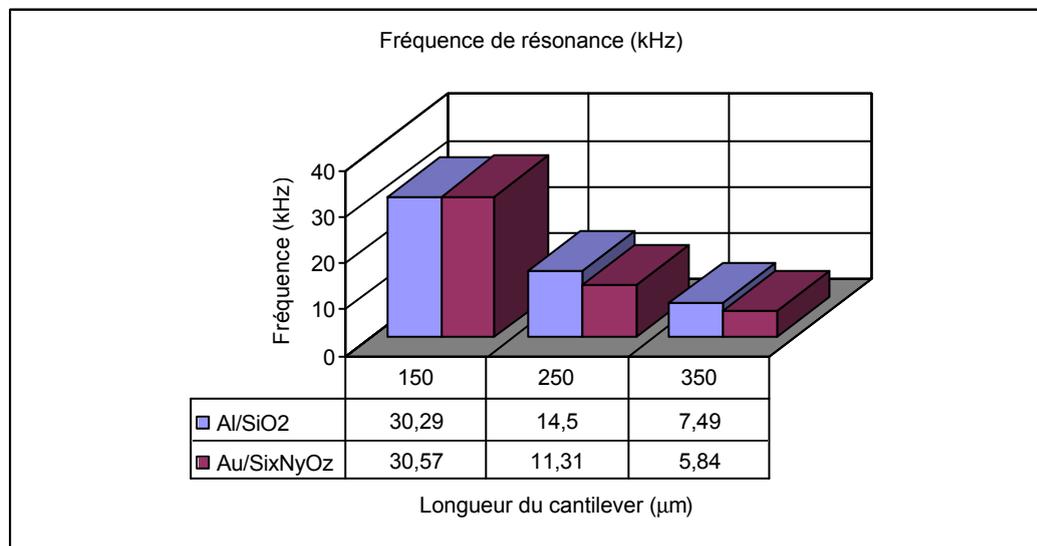


Figure IV-5 : Fréquence de résonance pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 150 μm de longueur et 20 μm de largeur de bras.

Actionnement électrothermique

L'épaisseur de l'isolant est fixé à 1 μm, ce qui est technologiquement le plus prudent (une épaisseur inférieure risque de fragiliser la structure et une épaisseur supérieure la rend moins sensible à l'actionnement électrostatique). L'épaisseur de la couche

métallique est définie en fonction des caractéristiques demandées. C'est-à-dire conserver une déflexion positive malgré une température ambiante de 100°C , une accélération de 330g et un actionnement électrothermique de 100mA .

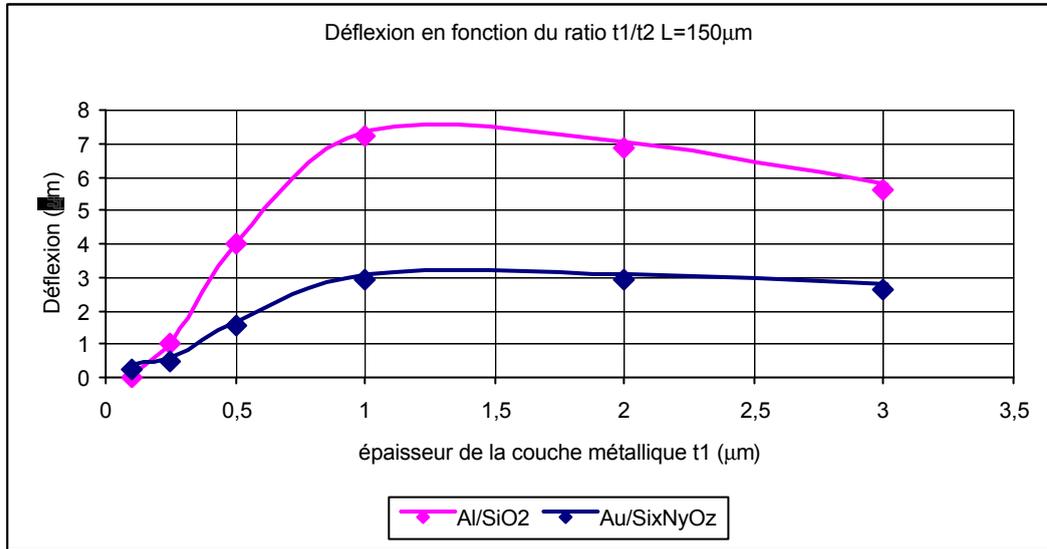


Figure IV-6 : Déflexion pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 150 mm de longueur et 20 mm de largeur de bras.

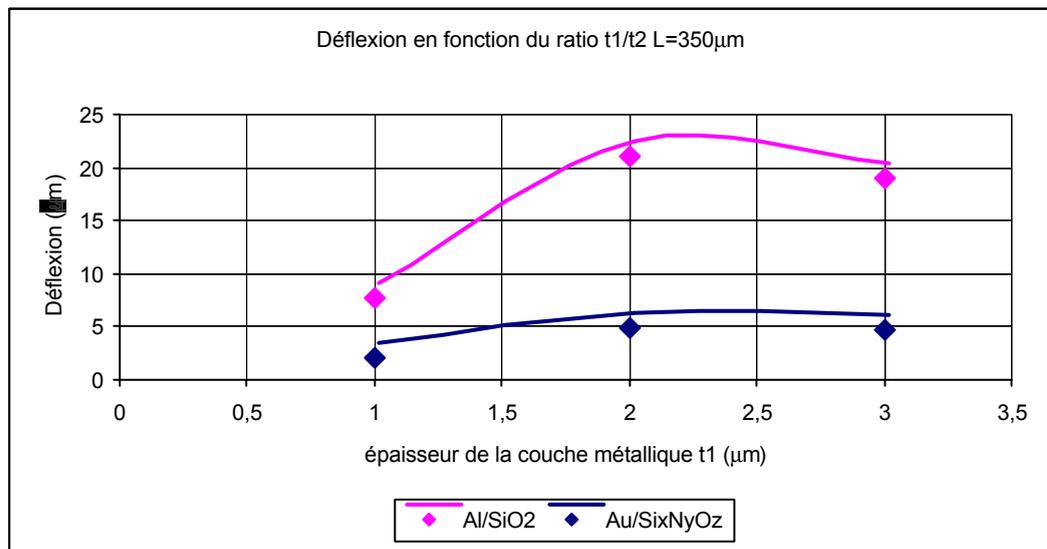


Figure IV-7 : Déflexion pour des conditions critiques d'utilisation (100°C et 100mA) pour un dispositif de 350 mm de longueur et 20 mm de largeur de bras.

La Figure IV-6 et la Figure IV-7 montrent la déflexion de l'apex d'un dispositif pour différentes longueurs et bilames. A l'issue de cette modélisation l'épaisseur de la couche supérieure est fixée à $1\ \mu\text{m}$ pour permettre l'utilisation de dispositifs d'une

longueur supérieure à 350 μm . Une épaisseur supérieure pose des problèmes d'ordre technologique (épaisseur à déposer et problème si lift-off de la couche).

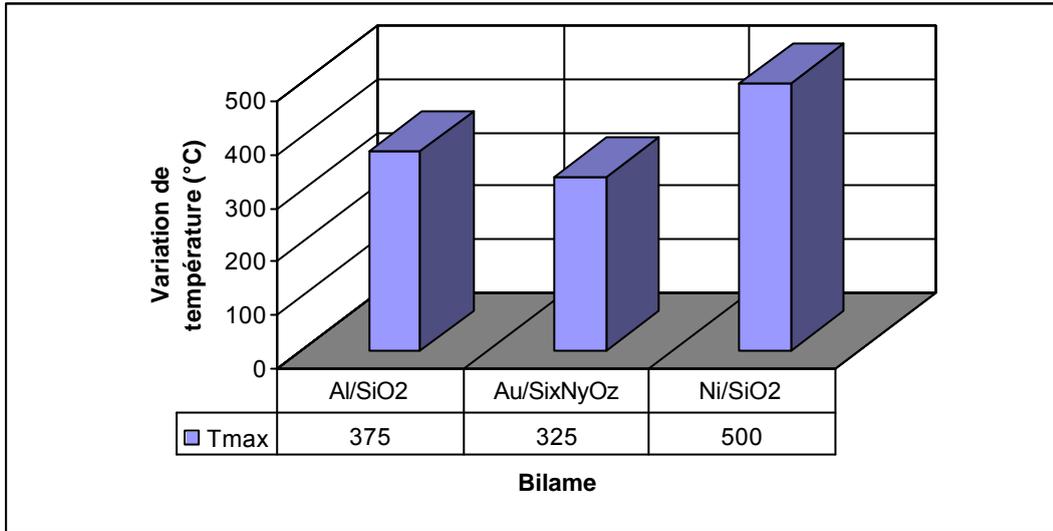


Figure IV-8 : Variation maximale de température pour effectuer un contact en fonction du bilame utilisé et de la longueur pour une température ambiante de -40°C .

La Figure IV-8 indique la variation maximale de température (valeur approchée) nécessaire pour effectuer un contact dans le cas d'une température ambiante de -40°C . La forte température atteinte par le bilame nickel/oxyde de silicium (supérieur à 500°C) a conduit à sa non utilisation. En effet, des températures de fonctionnement trop importantes font sortir les propriétés des matériaux du domaine de linéarité, et génèrent des déformations irréversibles (domaine plastique). De plus, on rencontre également des problèmes au niveau de la commutation du signal liés à un contact « chaud ».

Actionnement électrostatique

Le verrouillage électrostatique doit permettre de conserver le contact en l'absence de l'actionnement électrothermique. La tension appliquée doit donc être supérieure à la tension de décollement et d'effondrement. La Figure IV-9 et Figure IV-10 présentent les limites (définies dans le chapitre trois) des tensions d'effondrement et de décollement, en fonction de la longueur des dispositifs.

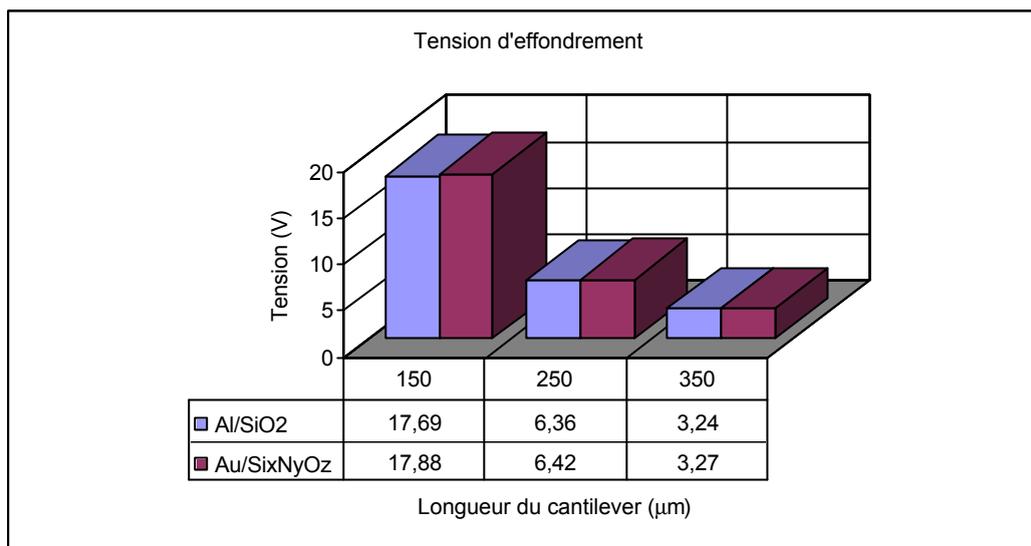


Figure IV-9 : Tension d'effondrement pour différentes configuration de bilame

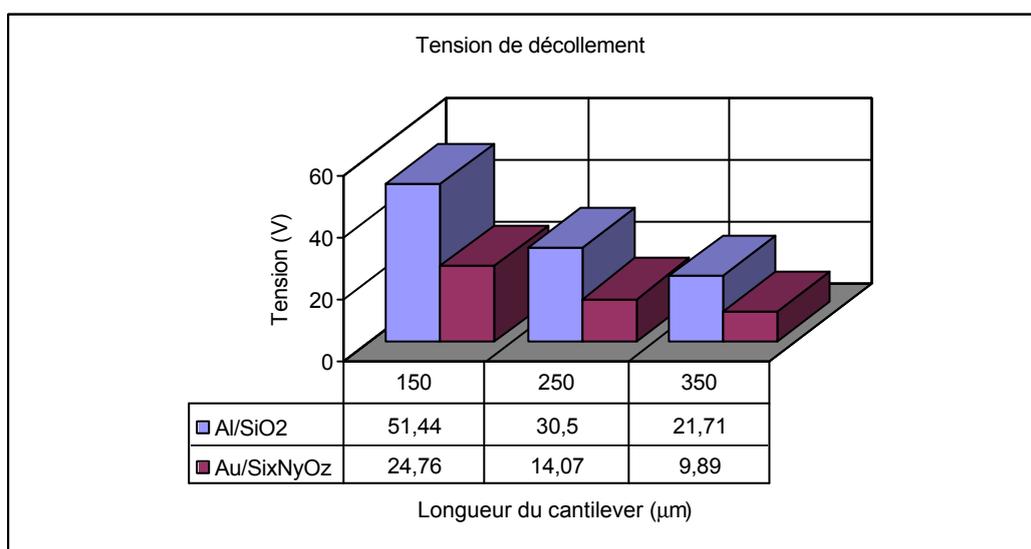


Figure IV-10 : Tension de décollement pour différentes configuration de bilame

Le cahier des charges autorise l'utilisation d'une différence de potentiel de l'ordre de 30V. L'ensemble des dispositifs modélisés respecte ces spécifications, sauf pour le bilame aluminium/oxyde de silicium d'une longueur de 150 μm où la tension de décollement est supérieure à 50V.

3. Dimensionnement du contact

Pour des raisons technologiques l'épaisseur du contacteur est fixée à 0,5 μm . La longueur choisie pour le contacteur est de 40 μm . Ce qui correspond à la largeur des lignes à commuter. Les modélisations analytiques montrent pour ces dimensions une

faible différence (inférieure à 10%) entre un dispositif actionné sans contacteur et un dispositif actionné avec contacteur (Figure IV-11).

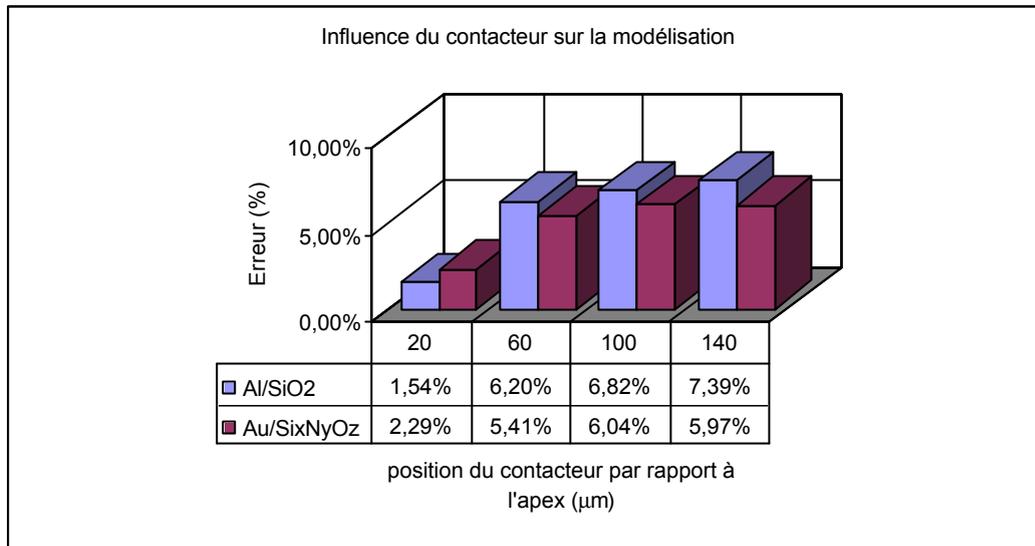


Figure IV-11 : Erreur par rapport à un dispositif sans contacteur ($L=150\text{mm}$ et $I=150\text{mA}$)

4. Synthèse

A l'issue de cette étape de conception les dispositifs fabriqués sont des bilames *aluminium/oxyde de silicium* et *or/ oxynitride de silicium*. Les couches du bilame ont une épaisseur de $1\ \mu\text{m}$.

Le contacteur, les lignes d'accès, et l'électrode fixe sont formés d'une couche d'or d'épaisseur $0,5\ \mu\text{m}$. Pour obtenir une surface de contact suffisante, la largeur du contacteur est fixée à $40\ \mu\text{m}$.

Concernant les dimensions, les longueurs testées seront 150 , 250 et $350\ \mu\text{m}$, les largeurs de bras $20\ \mu\text{m}$ et $40\ \mu\text{m}$, et l'espacement 20 , 40 , 60 et $80\ \mu\text{m}$.

Deux types de dispositif sont testés (Figure IV-12 et Figure IV-13). Dans la géométrie de type 1 la barre de contact est située à $50\ \mu\text{m}$ de l'extrémité du cantilever. Dans la géométrie de type 2 la barre de contact (trapézoïdal) est située à l'extrémité du cantilever.

Les dispositifs sont disposés à l'intérieur d'un réticule (Figure IV-14) permettant des mesures individuelles (chaque structure est déconnectée des autres). Un réticule est une zone élémentaire d'environ 1cm² sur une tranche de silicium qui contient un certain nombre de structures. Il est également entouré d'un certain nombre de plots de contacts pour permettre par la suite une mise en boîtier. A l'intérieur de ce réticule certains motifs de tests pour mesure *in situ* sont intégrés dans le but de caractériser les matériaux déposés.

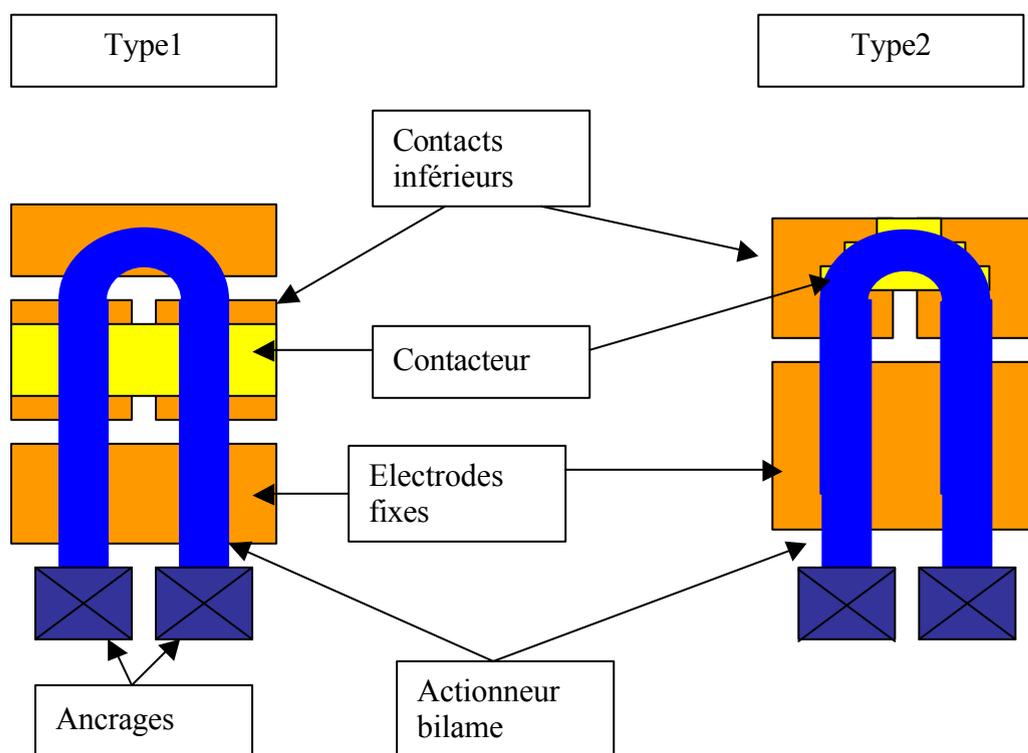


Figure IV-12 : Désignation des parties fonctionnelles des dispositifs

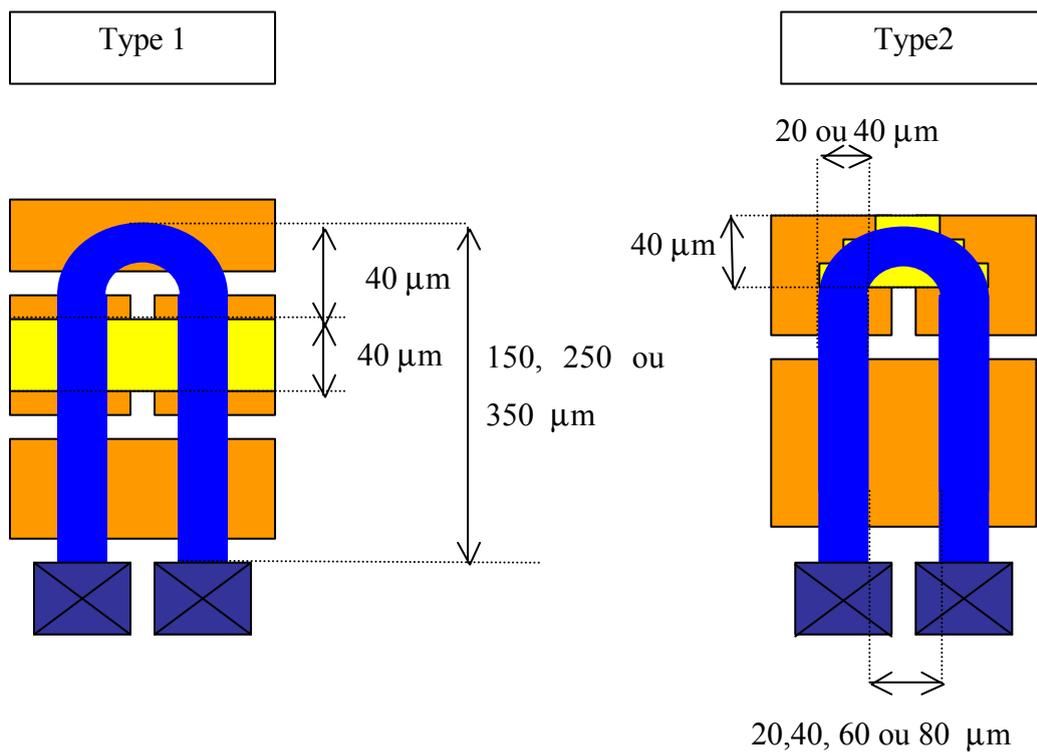


Figure IV-13 : Dimension des dispositifs

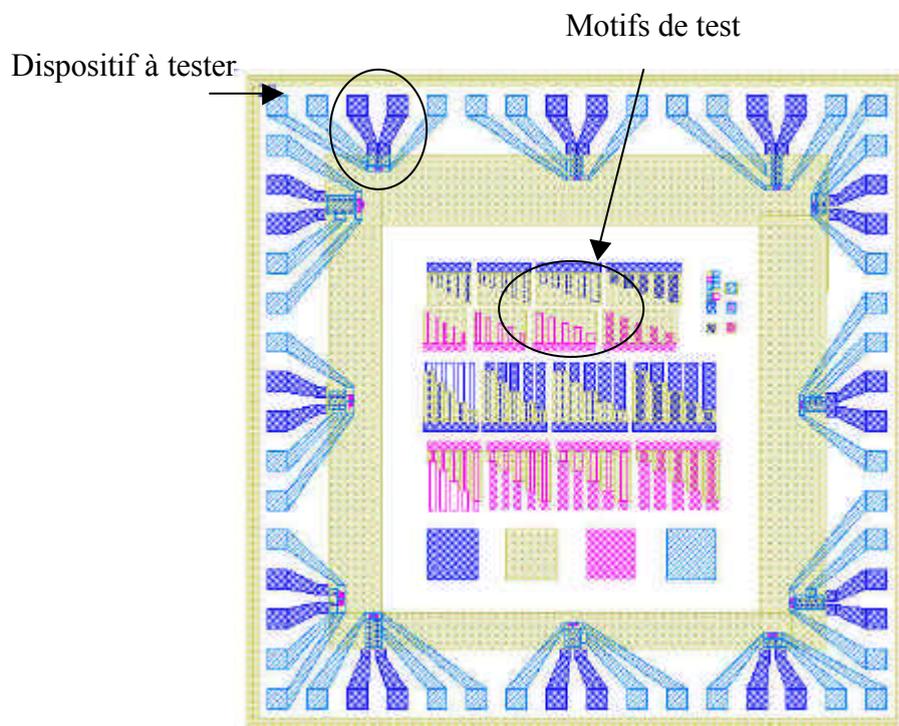


Figure IV-14 : Exemple de dessin de masque

IV. Fabrication

Les principales caractéristiques du procédé de fabrication sont :

- Un nombre de masques réduits, dont le but est de simplifier au maximum la fabrication. Cette simplification permet d'identifier facilement les modes de panne dans une analyse des modes de défaillance. La géométrie des dispositifs permet également de pouvoir se reposer facilement sur les modèles analytiques développés précédemment.
- Une température de fabrication réduite ($<300^{\circ}\text{C}$) pour permettre l'utilisation de métaux dans les toutes premières étapes de fabrication, cette faible température permet également l'utilisation d'une couche sacrificielle en résine.

Les difficultés rencontrées lors des réalisations technologiques ont eu pour conséquence une évolution du procédé de fabrication.

Etape 1 : Isolation du substrat

La fabrication débute avec la croissance, sur un substrat silicium (100), d'une couche de nitrure de silicium par LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) d'une épaisseur de 3500\AA . Cette couche isole électriquement les dispositifs du substrat.

Etape 2 : Définition des plots de contact (Figure IV-15)

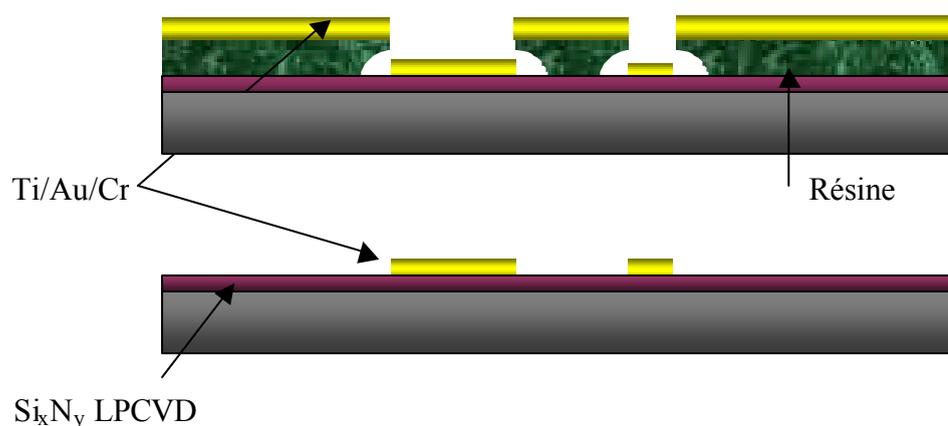


Figure IV-15 : Définition des plots contacts inférieurs et électrode fixe

La seconde étape de la fabrication concerne la définition des plots de contact et des électrodes par la technique de « lift-off ».

Ce premier niveau métallique est composé d'un tricouche de titane/or/chrome déposé par évaporation et pulvérisation d'épaisseurs respectives 250 Å /5000 Å /250Å. La couche de titane sert de couche d'accroche sur le substrat et la couche de chrome sert de couche sacrificielle complémentaire.

Etape 3 : Dépôt de la couche sacrificielle et planarisation (Figure IV-16)

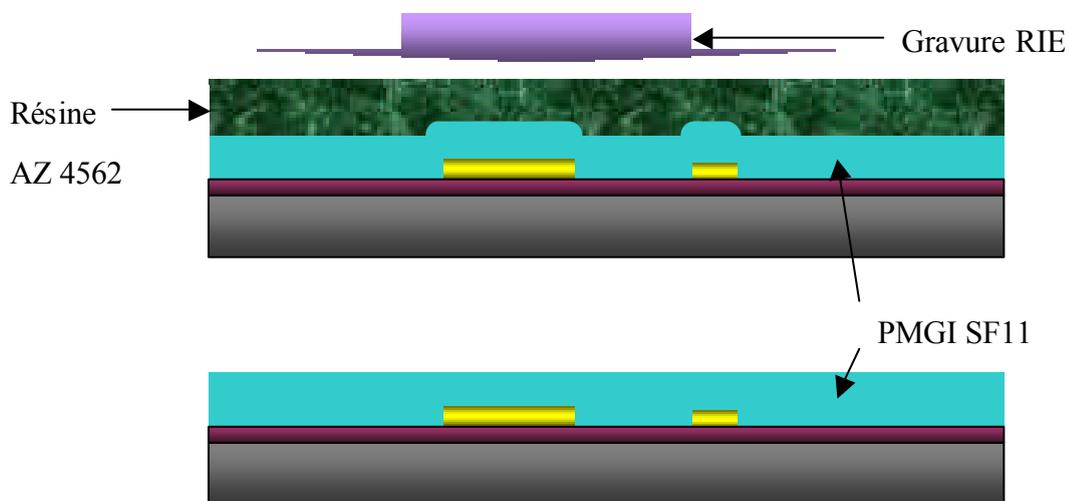
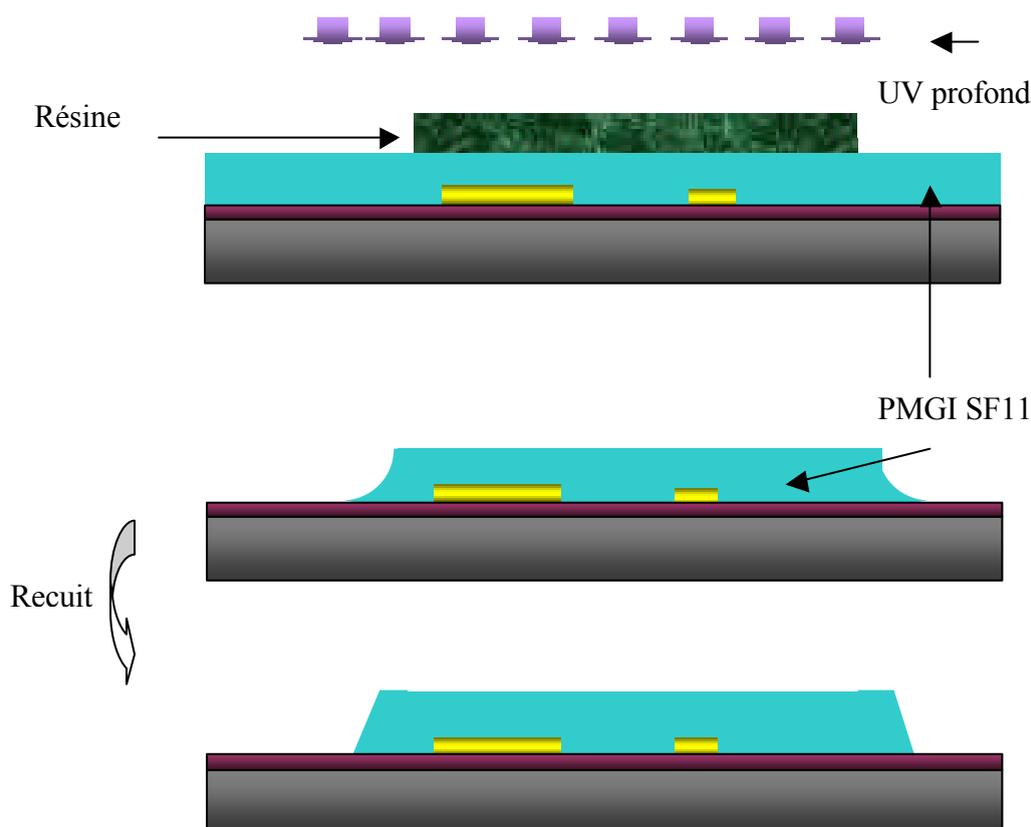


Figure IV-16 : Planarisation de la couche sacrificielle

Cette étape débute par l'enduction sur le substrat d'une couche de 3 μm de PMGI SF11. Cette résine va servir de couche sacrificielle, sa principale caractéristique est de pouvoir supporter une température supérieure à 250°C permettant un dépôt PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Ce dépôt est suivi d'une étape de planarisation. Elle consiste en une enduction d'une résine épaisse (ici l'AZ4562) d'une épaisseur totale de 7 μm . La viscosité de la résine permet, après un temps de repos suffisant (5 min) d'obtenir une surface plane. Puis, à l'aide d'une gravure RIE (Reactive Ion Etching), on vient graver la résine AZ4562 jusqu'à la PMGI SF11. La vitesse de gravure de la PMGI et de l'AZ4562 étant sensiblement la même, on obtient une couche sacrificielle exempte de reliefs.

Remarque : Cette étape ne nécessite pas l'utilisation de masque.

Etape 4 : Définition des plots de couche sacrificielle (Figure IV-17)**Figure IV-17 : Définition de la couche sacrificielle**

L'étape de planarisation est suivie de la définition de la couche sacrificielle. Dans cette étape, un masque de résine, réalisé par lithographie classique, sert à protéger la PMGI lorsque le wafer est exposé aux UV profonds. La révélation fait alors apparaître les plots de couche sacrificielle. En agissant sur le temps d'exposition, le temps de révélation et la température de recuit, on parvient à obtenir des flancs d'un angle supérieur à 45° . Ces flancs sont nécessaires dans la suite du procédé de fabrication.

Remarque : La résine ayant servi de masque est enlevée par le révélateur de la PMGI.

Etape 5 : Définition du bushing (Figure IV-18)

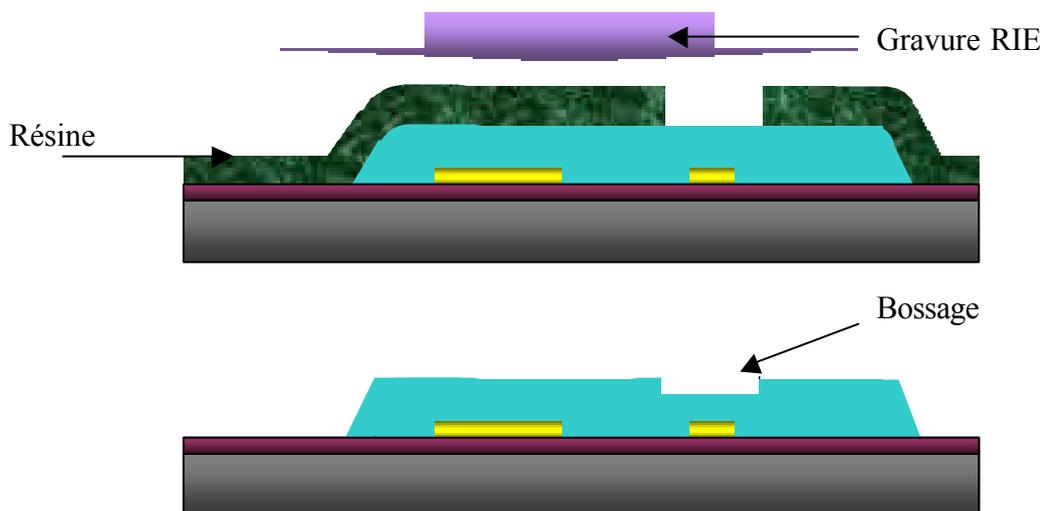
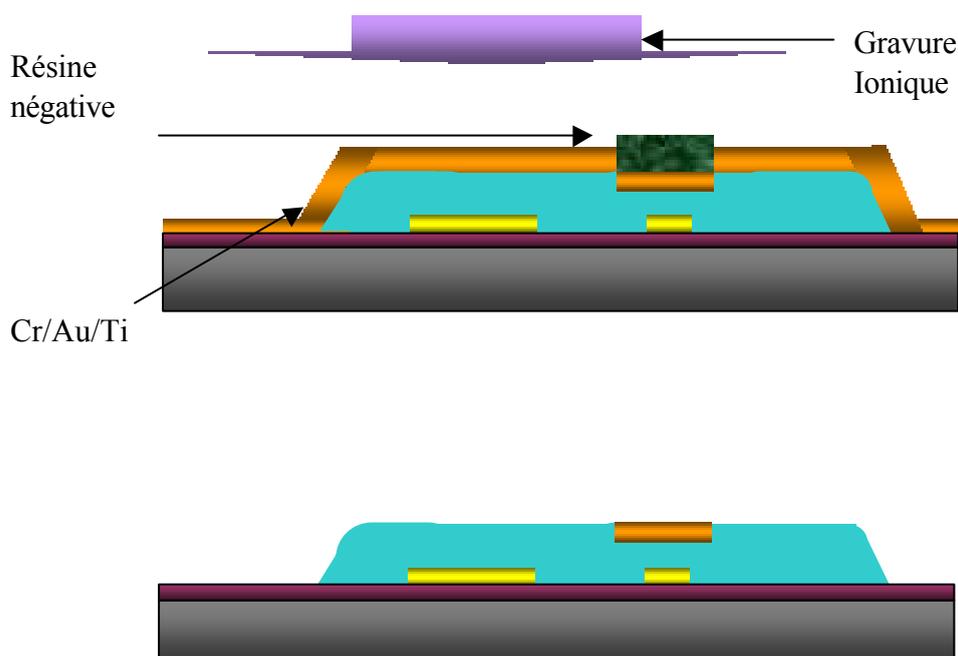


Figure IV-18 : Définition du bushing

Cette étape intervient avant la définition du contact, elle consiste en une lithographie et une gravure RIE. Cette gravure permet la création d'un bossage de profondeur 5000Å dont le but est double : Augmenter d'une part la pression exercée au niveau du contact, et d'autre part diminuer le relief. La résine, utilisée comme masque, est enlevée par un nettoyage à l'acétone et alcool isopropylique.

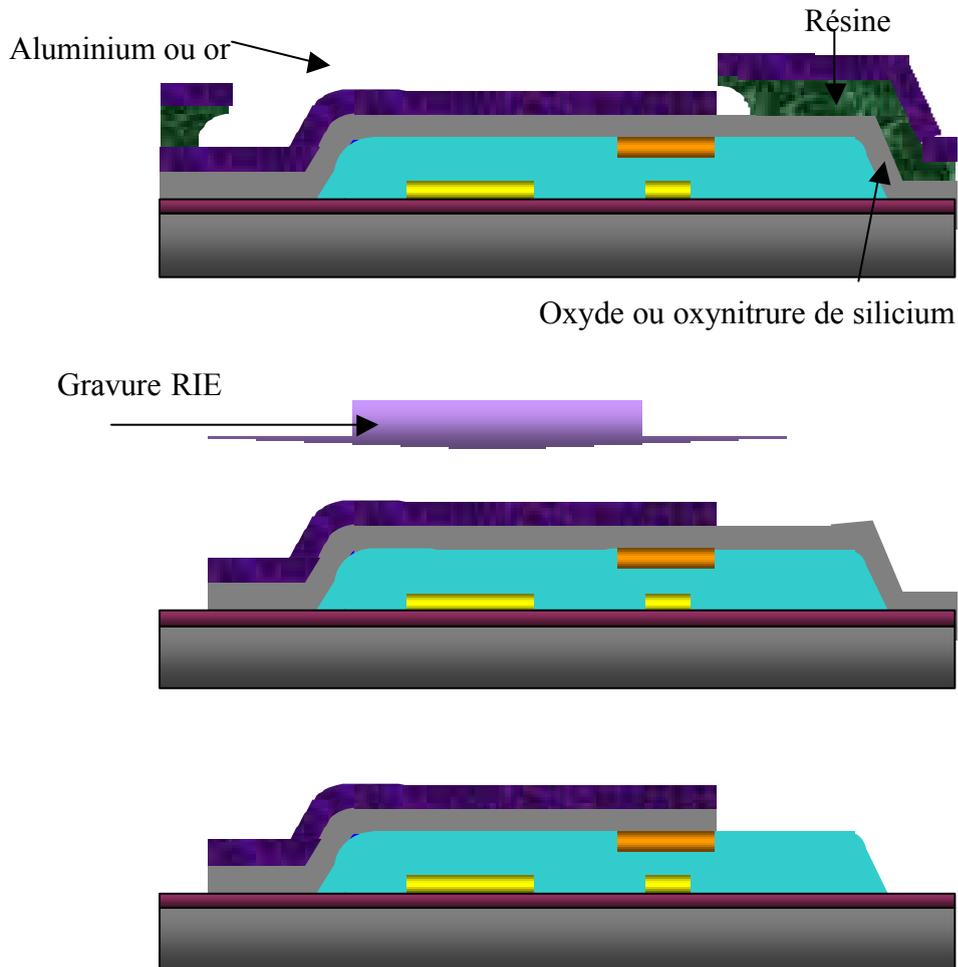
Remarque : On utilise le même masque pour la définition des contacts supérieurs (masque N°3).

Etape 6 : Définition du contacteur (Figure IV-19)**Figure IV-19 : Définition du contacteur**

Cette étape débute en déposant par pulvérisation et évaporation une couche de chrome (250Å), suivie de celle d'une couche d'or (5000Å) puis de titane (250Å). Ce dépôt est suivi d'une lithographie utilisant une résine négative (afin d'utiliser le même masque que dans l'étape précédente).

La lithographie est suivie d'une gravure ionique de la couche métallique pour définir le contacteur jusqu'à la couche de chrome. Ensuite, la résine utilisée est enlevée par un nettoyage RIE (la PMGI étant protégée par la couche de chrome), la dernière phase consiste en une gravure chimique du chrome restant.

Remarque : Le nettoyage de la résine ne peut pas se faire par le procédé classique (acétone et isopropanol) car la couche sacrificielle (en résine également) se fait attaquer suffisamment par l'acétone pour que les risques de décollement du contacteur soient importants.

Etape 7 : Définition du bilame (Figure IV-20)**Figure IV-20 : Définition du bilame**

Une fois le contacteur réalisé, l'étape suivante consiste à définir l'actionneur bilame. Cette étape débute par un dépôt d'oxyde (ou oxynitride) de silicium par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Il est suivi d'une lithographie pour définir par «lift-off» la couche supérieure de l'actionneur bilame (aluminium ou or). Ce dernier niveau composé d'une couche métallique est également employé comme masque pour une gravure RIE de (l'oxyde ou nitrure) de silicium déposé précédemment.

Remarque : Les dépôts PECVD ont l'inconvénient de n'être pas conforme (l'épaisseur déposée sur les flancs est moins importante que l'épaisseur déposée horizontalement). Ce problème nous a incité à créer, pour la couche sacrificielle, des flancs comportant un angle important ($>45^\circ$) à l'étape 4.

Etape 8 : Libération

La fabrication se termine avec l'attaque des différentes couches sacrificielles. Tout d'abord la PMGI SF11, se fait graver par une attaque chimique à l'EBRPG. Ensuite le chrome se fait graver par une solution commerciale. Le séchage des dispositifs se fait dans un bâti de séchage au CO₂ supercritique, il permet d'éliminer les problèmes de collage, par forces d'adhésion, des cantilevers.

Remarque : On observe parfois des résidus de PMGI sur les contacts même après l'attaque à l'EBRPG. Dans ce cas, le chrome intervient comme couche sacrificielle complémentaire pour enlever ces résidus (l'aluminium et l'or n'étant pas sensible à l'attaque chimique du chrome).

Différentes plaquettes ont été réalisées avec succès, incluant des dispositifs de commutation, mais aussi des structures de test *in situ*.

V. Structure de test in situ

Les propriétés des matériaux dépendent de manière étroite des conditions de dépôt. Ces caractéristiques (contraintes résiduelles, résistivités, etc.) interviennent directement sur les performances du dispositif. La connaissance de ces propriétés est donc indispensable d'une part pour effectuer une rétrosimulation fiable et d'autre part afin d'estimer la fiabilité à long terme des dispositifs.

Les moyens de caractérisation des matériaux sont nombreux, on peut citer pour l'évaluation des contraintes : la diffraction de rayon X [1] et l'ellipsométrie [2]. Cependant, ces techniques se pratiquent sur des échantillons différents de ceux incluant les dispositifs. De ce fait, elles ne considèrent pas l'évolution des propriétés durant la fabrication et le stockage.

Une technique de mesure intéressante est alors l'utilisation de structures *in situ*, fabriquées en même temps et sur le même échantillon que les microrelais. Ces structures de test permettent une analyse ciblée des propriétés physiques des matériaux. Le mode de fabrication des structures de tests permet de les intégrer durant la fabrication de nos dispositifs. Les propriétés mécaniques et électriques des films déposés sont ainsi déterminées en parallèle à la réalisation des dispositifs, par des jauges de différentes géométries. La suite de ce paragraphe décrit, dans un premier temps, les principes des jauges utilisées, puis présente et interprète les résultats obtenus.

On observe une excellente répétitivité des mesures. Elles ont été réalisées à partir de deux réticules de test, issus de deux substrats différents (soit plus de quatre mesures différentes par jauges). Les résultats présentés correspondent à des valeurs moyennes. Les mesures sont effectuées pour une épaisseur de couche déposée de 1 μm .

1. Rappel sur les contraintes

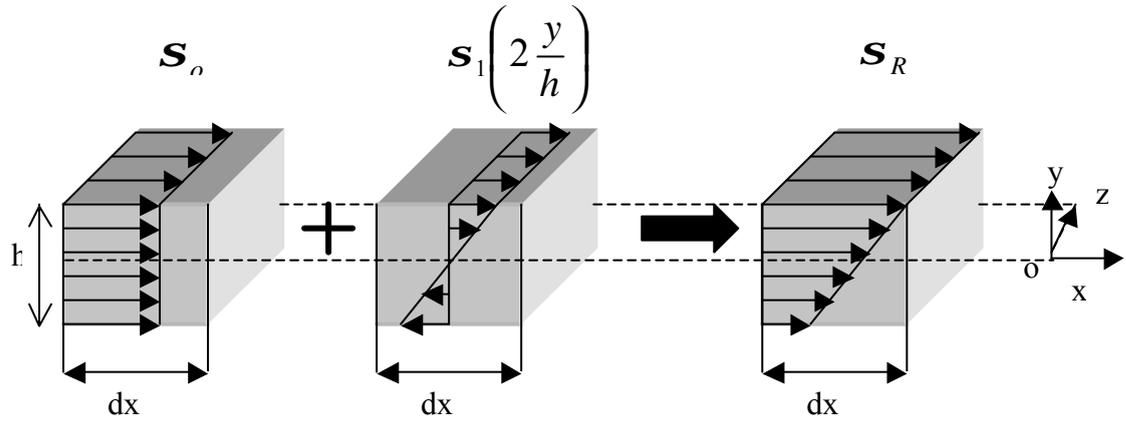


Figure IV-21 : Représentation schématique des contraintes dans un film mince

On a vu précédemment (dans le troisième chapitre) que les contraintes d'un film mince peuvent s'approximer à une composante fixe et un gradient (Figure IV-21). La contrainte résiduelle totale d'un film mince est donnée par l'expression polynomiale suivante :

$$\mathbf{s}_R = \mathbf{s}_o + \mathbf{s}_1 \left(2 \frac{y}{h} \right) \quad (\text{IV.1})$$

Où h est l'épaisseur du film. L'origine des coordonnées est choisie au milieu du film, de telle sorte que $y \in [-h/2, h/2]$.

2. Poutre cantilever monocouche : estimation du gradient de contrainte [3]

L'évaluation du gradient de contrainte se fait assez facilement en utilisant un cantilever constitué du matériau à caractériser (Figure IV-22). Le gradient de contrainte crée une déflexion soit négative soit positive selon qu'elle soit d'origine compressive ou non.

La formule donnant l'expression du gradient de contrainte en fonction de la déflexion du cantilever est :

$$\mathbf{s}_1 = \frac{Eh}{L^2} \mathbf{d} \quad (\text{IV.2})$$

Où δ représente la déflexion, h l'épaisseur de la couche L la longueur du cantilever.

Le Tableau IV-7 et le Tableau IV-8 donnent les valeurs de la déflexion et du gradient de contrainte d'un film d'aluminium, puis pour un film d'or, déposés par pulvérisation. L'épaisseur utilisée est de 1 μm . La couche d'aluminium entre dans la composition du bilame et l'or dans celle du plot de contact supérieur.

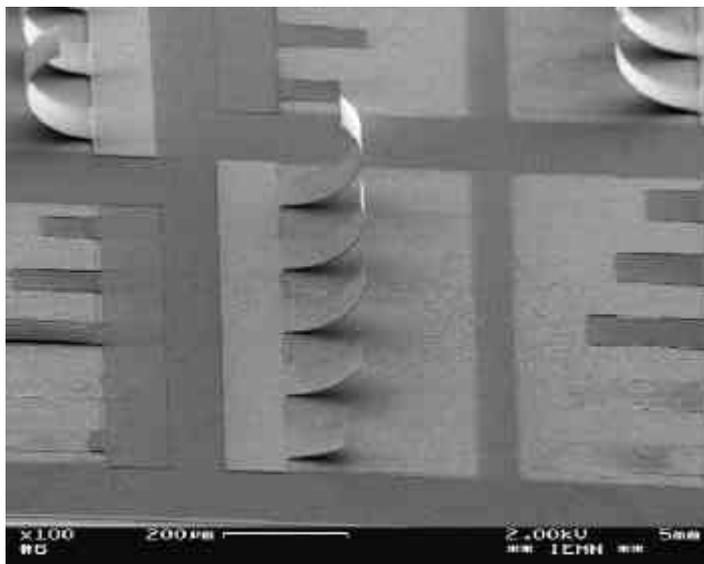


Figure IV-22 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage de poutres cantilevers pour la mesure de gradient de contrainte

Longueur du cantilever (mm)	100	150	200	250	300
<i>Déflexion (mm)</i>	33	65	130	200	300
<i>Gradient (MPa)</i>	254,1	222,4	250,25	246,4	256,6

Tableau IV-7: Mesure de la déflexion et du gradient de contrainte d'une couche d'aluminium déposé par pulvérisation (1mm)

Longueur du cantilever (mm)	100	150	200	250	300
<i>Déflexion (mm)</i>	40	79	150	240	340
<i>Gradient (MPa)</i>	320	280,8	300	307,2	302,2

Tableau IV-8 : Mesure de la déflexion et du gradient de contrainte d'une couche d'or déposé par pulvérisation (1mm)

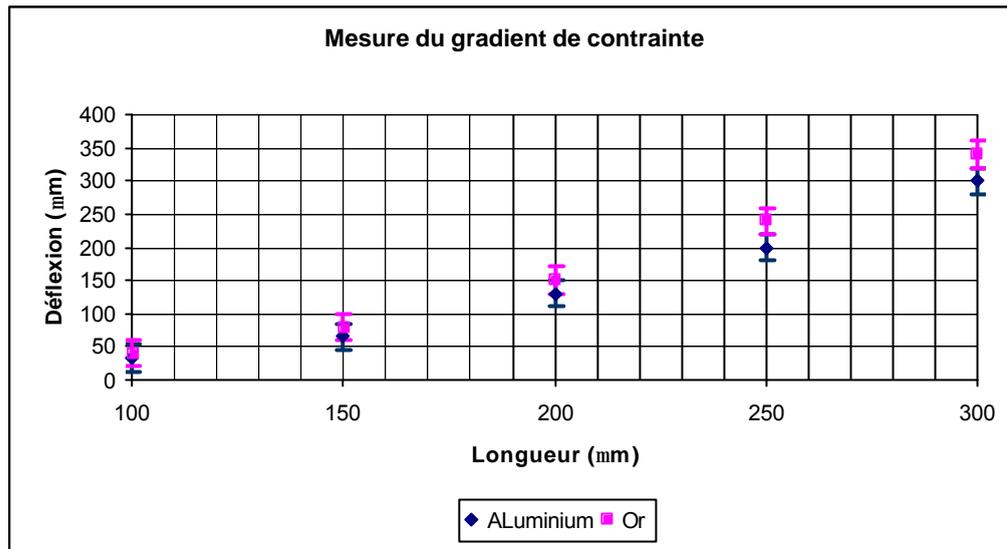


Figure IV-23 : Déflexion initiale mesurée pour différentes longueurs de poutre

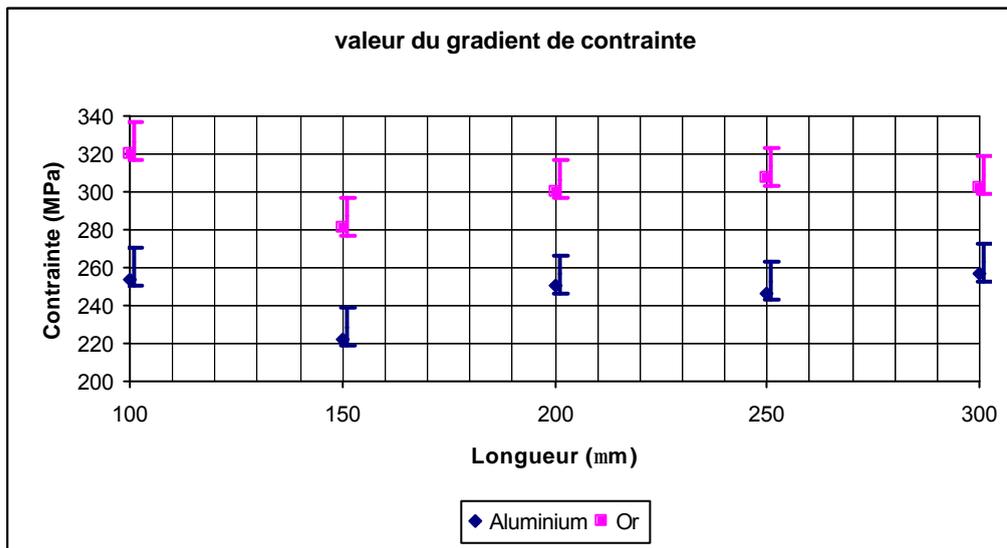


Figure IV-24 : Gradient de contrainte mesuré pour différentes longueurs de poutre

Conclusion : A l'issue des mesures, la valeur du gradient de contrainte utilisée pour l'aluminium est de 250MPa, et de 300MPa pour l'or.

3. Poutre bi-encastée : estimation des contraintes fixes en compression [4]

L'évaluation de la composante fixe des contraintes se fait en déterminant la longueur à partir de laquelle une poutre bi-encastée flambe. Celle-ci est appelée longueur « critique » de flambement. Le flambement de la poutre dépend du niveau de contrainte dans le matériau. En utilisant une série de poutres de longueurs différentes il est

possible de trouver cette longueur critique et par conséquent le niveau de contrainte. L'expression de l'équation permettant le calcul de cette contrainte est :

$$s_o = n^2 \frac{p^2 h^2 E}{3L^2} \quad (\text{IV.3})$$

où h est l'épaisseur de la poutre, L la longueur critique de flambage, et n=1,2 ou 3 selon le mode de flambement.

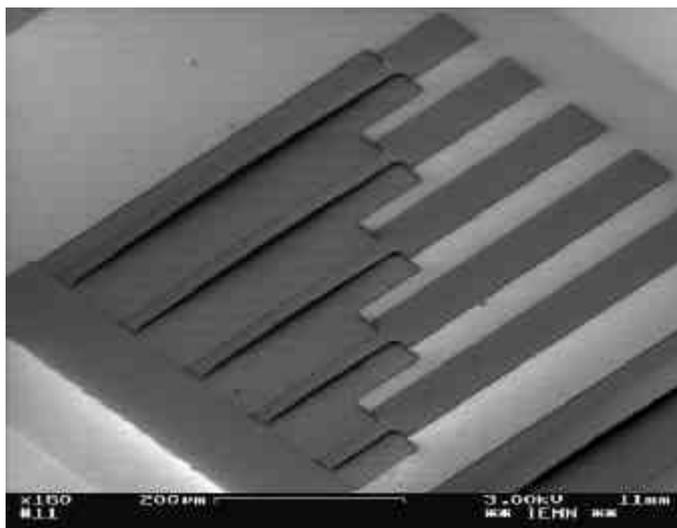


Figure IV-25 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage de poutres bi-encastées pour mesure la de contrainte en compression (1mm)

Conclusion : On observe un flambement significatif pour l'oxynitride de silicium à partir d'une longueur de 200 µm, ce qui correspond à une contrainte moyenne de 25 MPa en compression. Toutefois, ces résultats sont à pondérer, à cause de la précision modeste de la méthode de mesure. Concernant l'oxyde de silicium le flambement s'observe dès 50 µm. Un troisième mode est observé vers 100 µm, ce qui correspond a une contrainte proche de 300 MPa.

4. Anneau dynamométrique : estimation des contraintes fixes en tension [4]

Basé sur le même principe que la poutre bi-encastée, l'anneau dynamométrique est utilisé dans le cas d'un matériau en tension.

Une poutre se trouve dans un anneau attaché au substrat par deux points d'ancrage opposés à la direction de la poutre. Comme la poutre au centre de l'anneau n'est plus

attaché au substrat et que sous l'effet des contraintes l'anneau a se contracte, la poutre est soumise a une charge compressive. L'équation qui régit cette charge critique est :

$$s_o = \frac{p^2 h^2 E}{12 g(R) R^2} \quad (\text{IV.4})$$

où h est l'épaisseur du film mince, R le rayon de l'anneau, et g(R) le coefficient de conversion (<0.918). Ce coefficient est fonction de la largeur de l'anneau. L'épaisseur des couches déposées est de 1 µm.

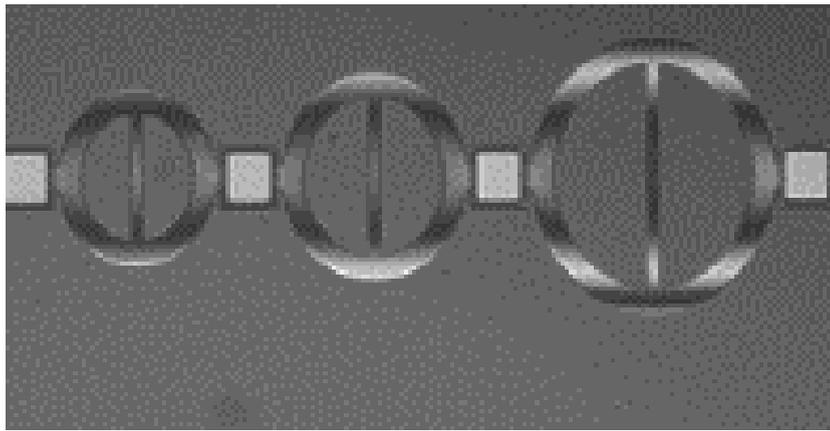


Figure IV-26 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage d'anneaux dynamométriques pour la mesure de contrainte en tension (1mm)

Conclusion : Le flambement des poutres s'observe pour l'aluminium à partir d'une longueur de 60 µm et de 30 µm pour l'or, un second mode est observé pour une longueur respectivement de 130 µm et 60 µm. On en déduit une contrainte moyenne de 150 MPa en tension pour l'aluminium et 300 MPa en tension pour l'or. Cependant, la faible reproductibilité des résultats, ainsi que la marge d'erreur importante nous oblige de vérifier les mesures en utilisant des jauges bilames décrites ci-dessous.

5. Poutre cantilever bilame : estimation des contraintes et coefficients de dilatation thermique [5]

La dernière méthode de mesure utilisée concerne les coefficients de dilatation thermique des matériaux et consiste à employer une poutre cantilever bicouche et une charge thermique (Figure IV-27).

Le rapport entre les coefficients de dilatation thermique est obtenu en étudiant le rapport entre les déflexions. Cela se traduit par l'expression suivante :

$$(\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1) = \frac{t_1^2 K}{3(t_1 + t_2) \Delta T L^2} (\mathbf{d}_{init} - \mathbf{d}) \quad (\text{IV.5})$$

Avec $K = 4 + 6 \frac{t_2}{t_1} + 4 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 + \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 + \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2}$ et δ_{init} la valeur de la déflexion avant

l'application de la charge thermique.

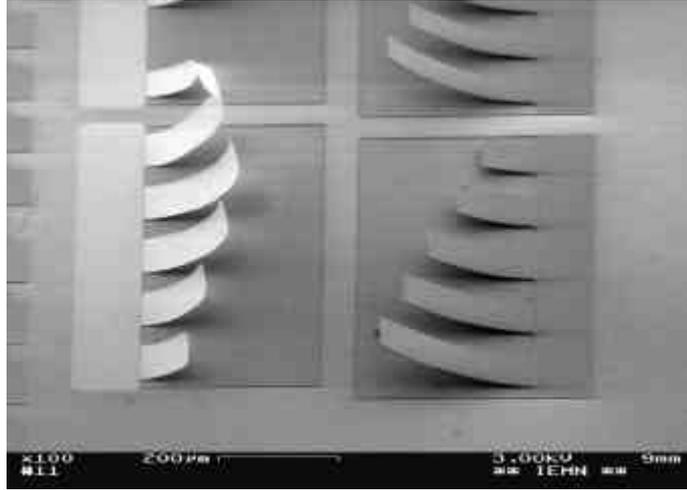


Figure IV-27 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage de poutres cantilevers bilames pour la mesure de coefficient de dilatation thermique (1mm)

Cette méthode permet également de vérifier les valeurs des contraintes calculées précédemment car, à température ambiante, la charge thermique est nulle et la déflexion ne dépend que des contraintes intrinsèques. L'épaisseur des couches déposées est de 1 μm . Les mesures sont effectuées après quelques minutes, le temps que la température se stabilise. Ensuite, les modélisations analytiques sont effectuées en utilisant comme propriétés des matériaux celles du Tableau IV-9.

Coefficient de dilatation thermique de l'aluminium (K^{-1}) a_{al}	20.10^{-6}
Coefficient de dilatation thermique de l'oxynitride de silicium (K^{-1}) $a_{\text{Si}_3\text{N}_4\text{O}_2}$	$0,5.10^{-6}$
Contraintes moyennes de l'aluminium (MPa) S_{0al}	150
Contraintes moyennes de l'oxynitride de silicium (MPa) $S_{0\text{Si}_3\text{N}_4\text{O}_2}$	-25
Gradient de contraintes de l'aluminium (MPa) S_{1al}	250
Gradient de contraintes de l'oxynitride de silicium (MPa) $S_{1\text{Si}_3\text{N}_4\text{O}_2}$	0

Tableau IV-9 : Propriétés des matériaux utilisés dans le modèle analytique

Longueur (mm)	100	150	200	250	300
<i>Déflexion mesurée à l'extrémité du cantilever pour une température ambiante de 25°C</i>	5	23	45	75	100
<i>Déflexion mesurée à l'extrémité du cantilever pour une température ambiante de 75°C</i>	4	19	39	58	87
<i>Déflexion mesurée à l'extrémité du cantilever pour une température ambiante de 125°C</i>	2	4	16	27	35

Tableau IV-10 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxy-nitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante

Longueur (mm)	100	150	200	250	300
<i>Déflexion modélisée à l'extrémité du cantilever pour une température ambiante de 25°C</i>	12,5	26,2	45	69	100
<i>Déflexion modélisée à l'extrémité du cantilever pour une température ambiante de 75°C</i>	9,1	18	30	46	66
<i>Déflexion modélisée à l'extrémité du cantilever pour une température ambiante de 125°C</i>	5,4	9,7	15,6	23	33,1

Tableau IV-11 : Modélisation analytique de la déflexion d'un bilame aluminium/oxy-nitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante avec un CET de $20 \cdot 10^{-6}$ pour l'aluminium et $0,5 \cdot 10^{-6}$ pour l'oxy-nitride de silicium.

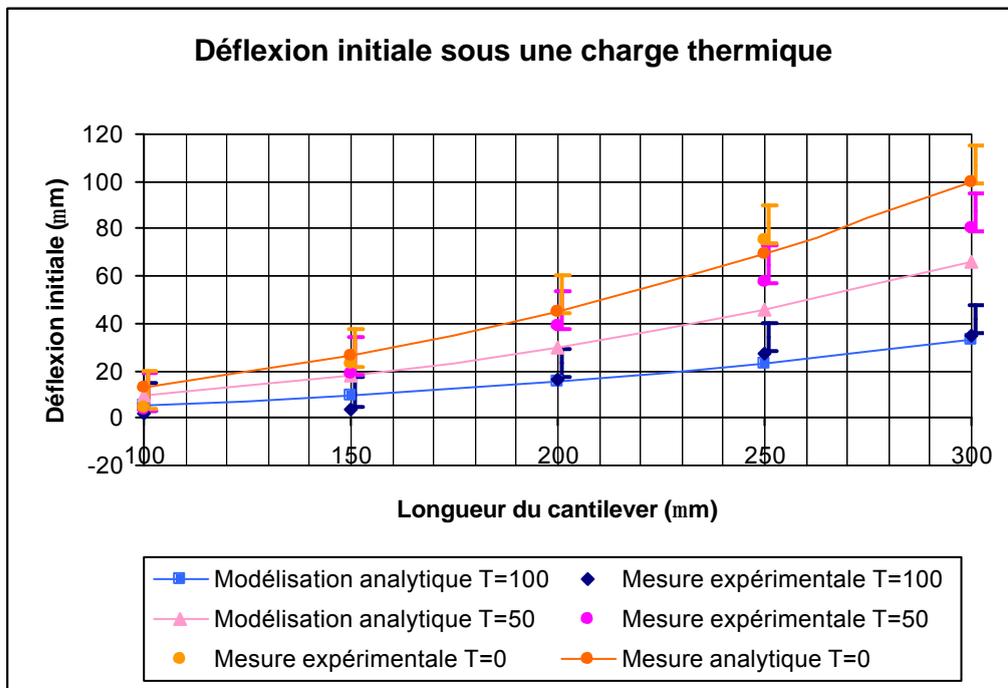


Figure IV-28 : Déflexion initiale sous une charge thermique de 0°C, 50°C et 100°C pour plusieurs longueurs de cantilever

Conclusion : On observe une bonne correspondance entre les modélisations analytiques et les résultats expérimentaux ce qui confirme notre choix de matériaux dans les modèles (contraintes et coefficients de dilatation thermique). On remarque également que les cantilevers ne reviennent pas à leurs positions initiales après application de la charge thermique, cet aspect sera abordé au chapitre six.

6. Estimation de la résistivité

Pour la mesure de résistivité, des motifs de Hall ont été employés. La forme des motifs utilisée est indiquée sur la Figure IV-29. Les mesures sont effectuées sous pointes. Un courant constant est imposé entre les plots 1 et 2 et la tension mesurée entre les plots 3 et 4. La chute de tension correspond sur le schéma à la résistance R de la partie active (grisée). Connaissant la géométrie de la partie active (largeur w et longueur L) et son épaisseur h on en déduit facilement la résistivité r donnée par :

$$r = \frac{wh}{L}R \quad (\text{IV.6})$$

Le courant est imposée quelles que soient les résistances de contact des plots 1 et 2 et l'impédance d'entrée du voltmètre (en général $10 \text{ M}\Omega$) fait que les résistances de contact des plots 3 et 4 ne provoquent qu'une chute de tension négligeable.

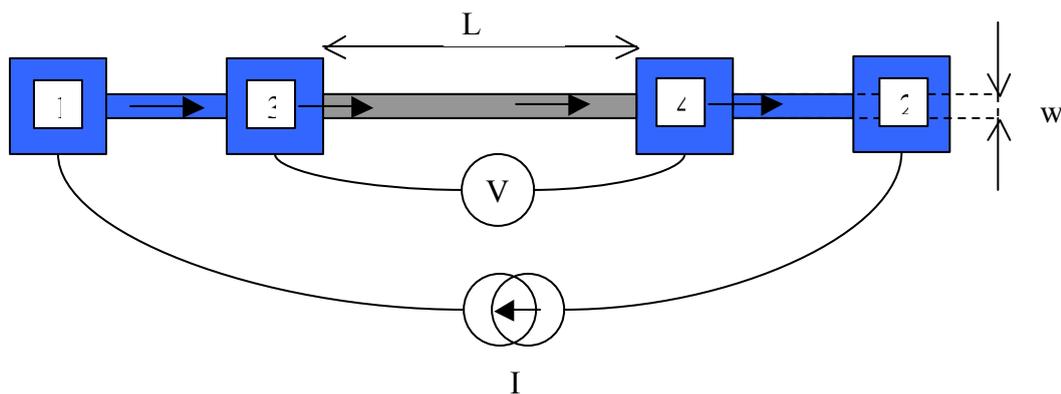


Figure IV-29 : Motif de Hall

Conclusion : La résistivité mesurée pour l'aluminium est de $4.10^{-8} \Omega.m$ (contre une valeur théorique de $2,8.10^{-8} \Omega.m$ pour un matériau massif) et de $5.10^{-8} \Omega.m$ pour l'or déposé en pulvérisation et $3,8.10^{-8} \Omega.m$ pour l'or déposé en évaporation (contre une valeur théorique de $2,2.10^{-8} \Omega.m$ pour un matériau massif). L'écart important observé

entre les résistivités théoriques et celles mesurées peuvent s'expliquer par le dépôt non parfait et à optimiser (état de la couche granuleux).

VI. Conclusion

Suite à l'observation des différentes propriétés des matériaux (contraintes et résistivités) une nouvelle phase de conception est entreprise. A l'issue de cette étape, la principale caractéristique de ces nouveaux dispositifs est un actionneur bilame composé d'une couche d'aluminium et d'oxynitride de silicium d'épaisseur respectives 0,5 et 1 μm . L'épaisseur de la couche métallique a été réduite afin d'augmenter la sensibilité du bilame pour atteindre une température maximale de fonctionnement plus faible. (400°C au lieu de 450°C pour une couche de 1 μm). Cette diminution d'épaisseur a comme conséquence une consommation inférieure à 100mA, dans le cas d'un contact en conditions extrêmes (100°C et 330g). Mais aussi une flèche initiale importante (supérieure à 100 μm pour un dispositif de longueur 350 μm).

Nous observons un bon rendement (plus de 90% des structures sortent indemnes de la fabrication, fracture et stiction comprises) ainsi qu'une excellente répétitivité des performances (déflexion initiale, et actionnement). Les Figure IV-30 à Figure IV-32 sont les photos de différents dispositifs pris au MEB (Microscope Electronique à Balayage).

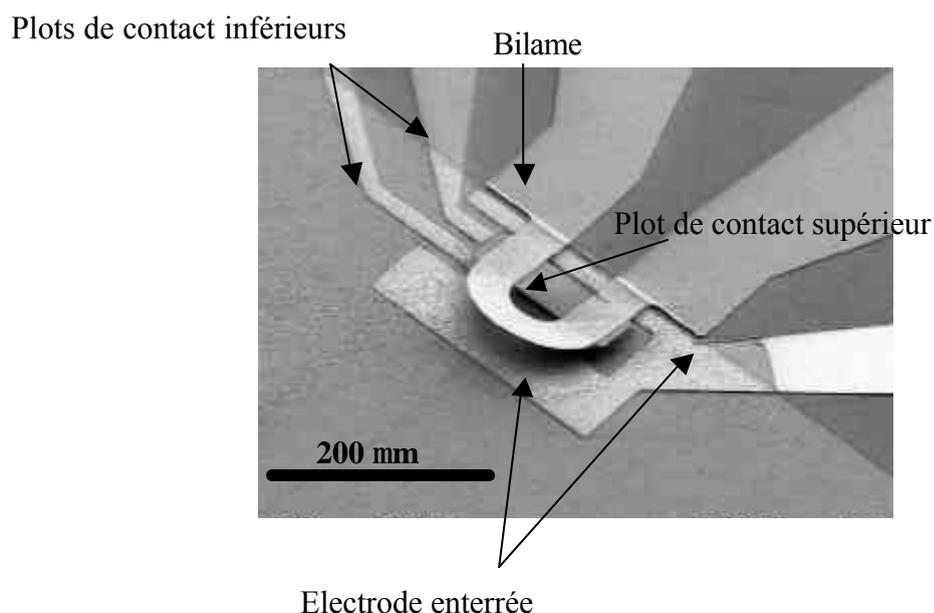


Figure IV-30 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage d'un microrelais de type 1 (contact central)

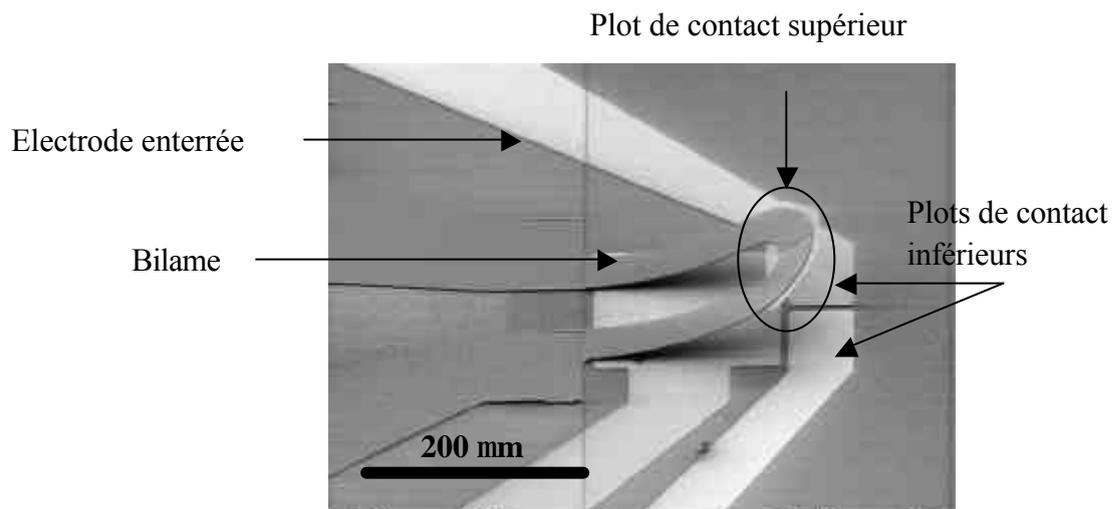


Figure IV-31 : Image obtenue par microscopie électronique à balayage d'un microrelais de type 2 (contact à l'extrémité)

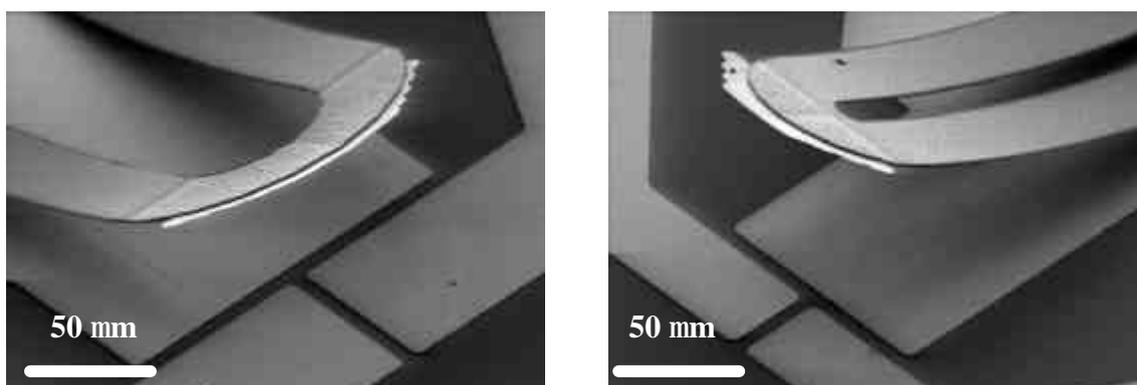


Figure IV-32 : Détail d'un microrelais, image obtenue par microscopie électronique à balayage

VII. Références

- [1] R. Jenkins et R. L. Snyder, 1996, "Introduction to X-ray powder diffractometry", in *Chemical Analysis: A series of monographs on analytical chemistry and its applications* (J. D. Winefordner editor) éd. Wiley Interscience, vol. 138.
- [2] Muller, R. H., 1969, "Definitions and Conventions in Ellipsometry" *Surface Science*, 16, p14-33.
- [3] W Fang. and J. A. Wickert, 1996, "Determining Mean and Gradient Residual Stresses in Thin Films Using Micromachined Cantilevers" *J. of Micromech Microeng.* Vol. 6, p301.
- [4] B. P van Drieënhuizen, J. F. L Goosen, P. J. French, and R. F. Wolffenbuttel, 1993, "Comparison of Techniques for Measuring Both Compressive and Tensile Stress in Thin Films" *Sensors and Actuators A*, Vol. 37-38, p756.
- [5] Y.B. Gianchandani and K. Najafi, 1996, "Bent-Beam Strain Sensors" *J. of Micromech Syst.*, Vol. 5, No. 1, p42.

Chapitre V : ASSEMBLAGE, PACKAGING ET TEST

Cette partie s'intéresse à la phase de test des dispositifs de commutation. Elle compare les résultats expérimentaux aux modélisations réalisées précédemment et conclue quant à la validité de celles-ci.

I.	Introduction	138
II.	Assemblage et mise en boîtier.....	139
III.	Moyens de caractérisation	141
IV.	Mesures expérimentales portant sur les dispositifs.....	144
V.	Temps de commutation électrothermique	170
VI.	Conclusion	171
VII.	Références.....	172

I. Introduction

Le chapitre précédent a concerné la fabrication des dispositifs et la technologie dite « front end ». Dans ce chapitre nous nous concentrons sur les technologies dites « back end » telles que l'assemblage, le packaging et les moyens de caractérisation. Comparées à la technologie « front end » ces étapes peuvent paraître plus élémentaires, cependant la mise en boîtier des puces peut être l'une des étapes de fabrication les plus critiques d'un point de vue coût et fiabilité. Ce chapitre se décompose en quatre parties. La première décrit l'assemblage et les contraintes inhérentes à la mise en boîtier, la deuxième partie présente les moyens de caractérisation, la troisième détaille les protocoles opératoires utilisés. Enfin, la dernière concerne l'analyse des résultats expérimentaux.

II. Assemblage et mise en boîtier

La préparation du wafer commence par le découpage en réticules élémentaires. Le wafer est monté sur un film adhésif puis découpé à l'aide d'une scie à lame diamantée (Figure V-1). Le réticule ainsi découpé est ensuite collé dans un boîtier pour le protéger des contaminants, de la corrosion et des chocs mécaniques. La mise en boîtier permet d'intégrer les puces sur une carte électronique grâce un socle prévu à cet effet et facilitant ainsi la mise en place des tests (Figure V-2). Le boîtier employé dans cette étude est un boîtier de type JLLC 68 broches.

Une fois le réticule packagé, on procède à la réalisation des connexions entre le réticule et le boîtier. La méthode utilisée est le « wire bonding », par ultrasons. Pour permettre certaines mesures et la visualisation de l'actionnement, le capot de certains boîtiers a été remplacé par un couvercle transparent. Les dimensions du réticule permettent d'insérer un nombre important de dispositifs sur une seule puce (jusqu'à douze dispositifs disponibles sur un même réticule). Il est important de noter que la mise en boîtier ajoute quelques contraintes supplémentaires comme l'addition d'une colle époxy sous la puce afin de la fixer sur le boîtier. Cette étape nécessite également un recuit de 125°C durant 30 min lors de la polymérisation de la colle, ce recuit peut concourir à une modification des propriétés du dispositif comme on le verra par la suite.

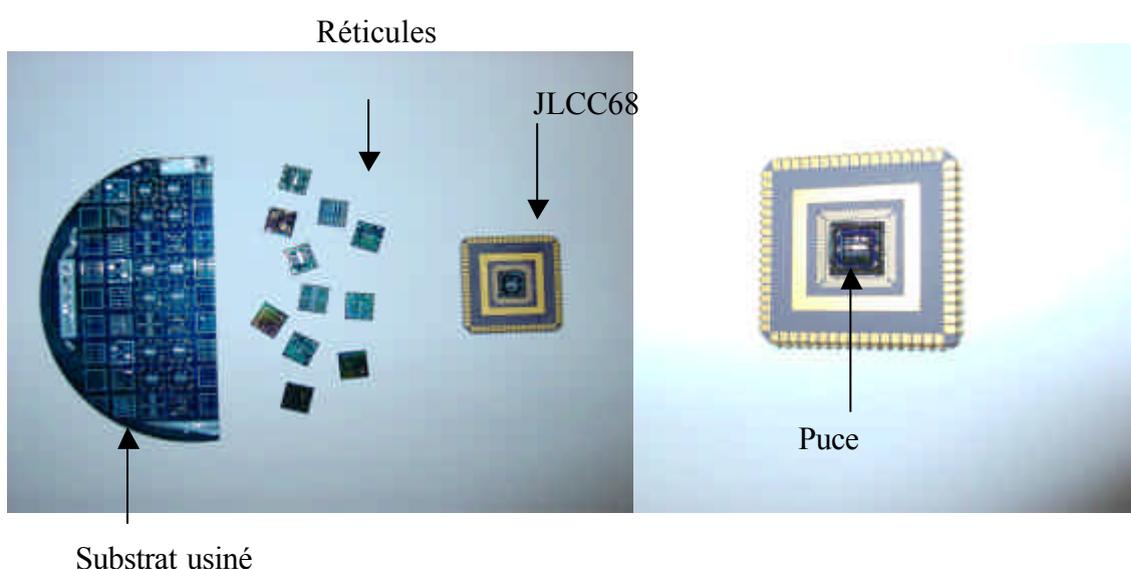


Figure V-1 : Réticule de test découpé puis mis en boîtier

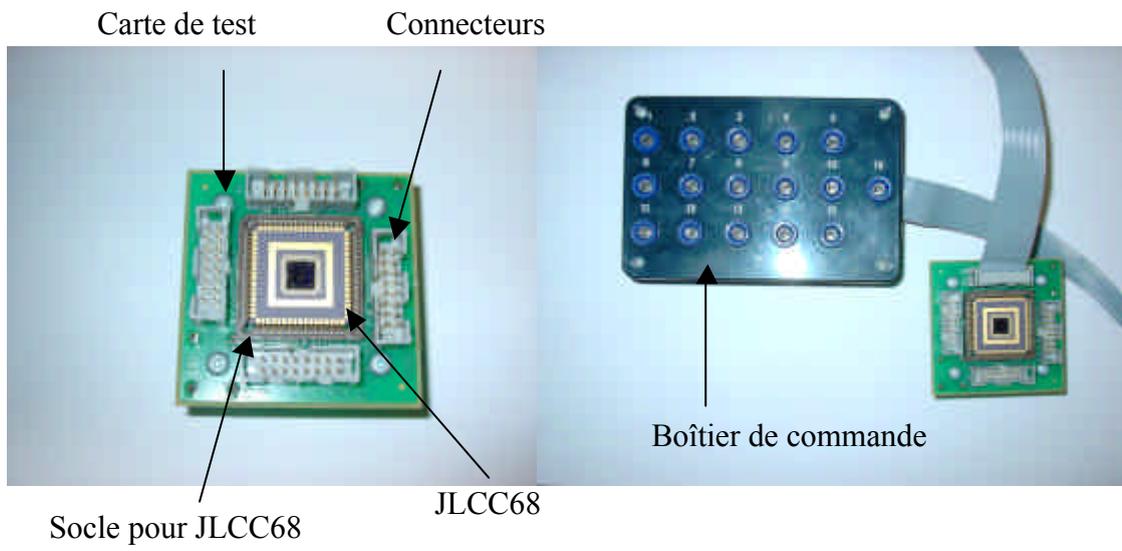


Figure V-2 : Carte et boîtier de test

III. Moyens de caractérisation

Dans le but de vérifier que les dispositifs répondent bien aux spécifications requises, il est indispensable de pouvoir reproduire le plus précisément possible les conditions d'utilisation des dispositifs. Cette reproduction est rendue possible par l'utilisation de divers moyens mis à disposition et décrits dans les paragraphes suivants.

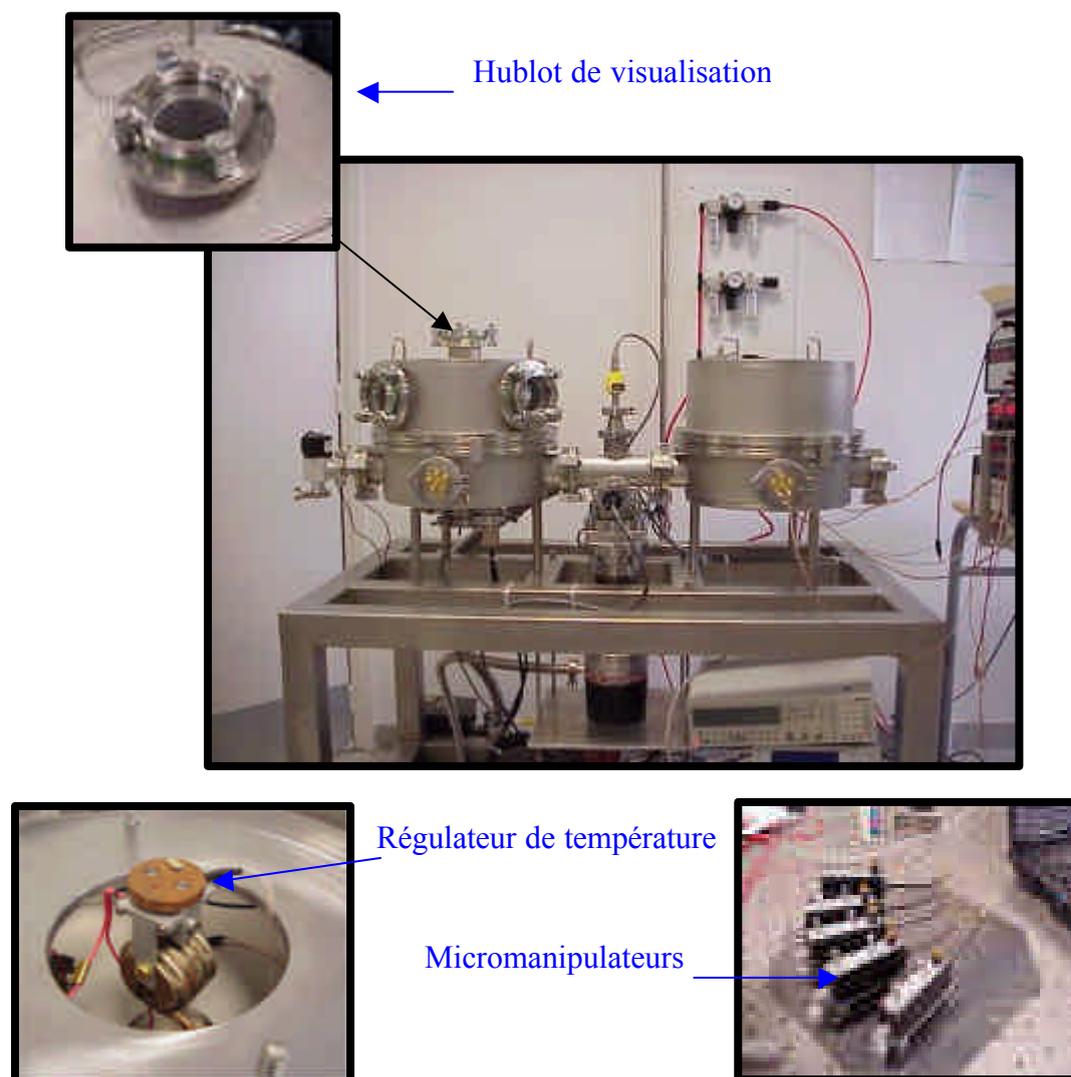


Figure V-3 : Bâti de test

Le moyen de caractérisation utilisé est un bâti de test (Figure V-3), il est composé de deux enceintes et permet de tester les dispositifs dans des conditions de température variant de -100°C à $+150^{\circ}\text{C}$. Il permet également de simuler des conditions de vide

allant de 10^{-6} à 760 Torr. Des mesures optiques sont rendues possibles par la présence de hublots. Il est possible d'effectuer des tests, sur des composants non mis en boîtier, en venant contacter les dispositifs au moyen de pointes montées sur des micromanipulateurs.

Les autres moyens disponibles, concernent l'environnement vibratoire et les chocs. Les systèmes mis à disposition sont des pots vibrants. Le protocole expérimental ne permet cependant pas de procéder à une analyse visuelle des dispositifs lors du test, de plus elle nécessite la mise en boîtier du dispositif pour le test. Une inspection visuelle est possible après les tests pour observer certains mécanismes de défaillance.

La caractérisation de la déformation de l'actionneur bilame se fait par le biais d'un système de vibrométrie interférométrique (Figure V-4 et Figure V-5) [1]. Cet appareil permet une reconstitution 3D du dispositif observé, mais aussi de mesurer les fréquences de résonance mécanique en appliquant une stimulation par l'intermédiaire d'une céramique piézoélectrique sous le dispositif. La mesure est basée sur le principe de l'interférométrie optique dynamique et permet de réaliser l'étude modale d'objets excités en vibration. Cependant, à cause du rayon de courbure important des dispositifs réalisés et de la conception de l'appareil, il n'est pas possible d'obtenir une reproduction complète du relief du dispositif. La mesure de la déflexion est complétée à l'aide d'un microscope optique. En effet, la variation du plan focal permet de déterminer la distance parcourue par le cantilever.



Figure V-4 : Système de vibrométrie interférométrique

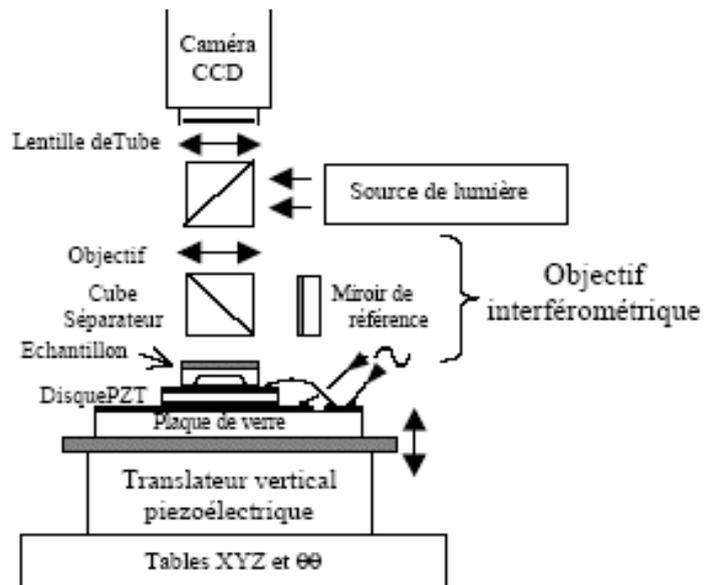


Figure V-5 : Configuration optique du système

IV. Mesures expérimentales portant sur les dispositifs

On rappelle que les dispositifs fabriqués sont composés d'un bicouche aluminium/oxynitride de silicium d'une épaisseur respective de 0,5 et 1 μm . Ils comprennent un contacteur en or d'une épaisseur de 0,5 μm positionné à deux endroits différents (dispositifs de type 1 et 2). La longueur des dispositifs varie entre 150 et 350 μm , la largeur des bras est de 20 μm ou 40 μm et l'espace entre les bras de 20 à 80 μm par pas de 20 μm .

Des mesures préliminaires ont permis de démontrer que l'espacement entre les bras et la largeur de ceux-ci, n'influencent que légèrement le comportement mécanique du dispositif (moins de 5%). On retiendra uniquement les mesures des dispositifs d'une largeur de bras de 20 μm et d'un espacement de 20 μm , afin de simplifier l'interprétation des résultats.

Les mesures ont été réalisées sur deux lots de deux réticules de type1 et de deux réticules de type2 (Tableau V-1). Chaque réticule comprend trois longueurs de dispositif (150, 250 et 350 μm), soit quatre mesures par dispositif, a priori, identique.

Substrat 1				Substrat 2			
Type1		Type2		Type1		Type2	
Réticule1	Réticule2	Réticule3	Réticule4	Réticule5	Réticule6	Réticule7	Réticule8

Tableau V-1 : Nombre de réticules mesurés

Les résultats présentés dans les tableaux suivants correspondent à des valeurs caractéristiques. Ceux obtenus sous charge thermique concernent des réticules non mis en boîtier. Ceux obtenus actionnés sont quant à eux mis en boîtier, ils subissent donc recuit à 125°C pendant 30 min, ce qui provoque une relaxation de contraintes expliquée par la suite.

1. Comportement sous charge thermique

Ce paragraphe s'intéresse à la déflexion sous une charge thermique.

Charge thermique appliquée (°C)	0	50	100
<i>Résultats issus de la modélisation analytique (mm)</i>	143	90,1	36,7
<i>Dispositif de type 1 (contact au centre) (mm)</i>	122	86	52
<i>Dispositif de type 2 (contact à l'extrémité) (mm)</i>	158	103	29

Tableau V-2 : Mesure de la déflexion d'un bilame de 350 mm de longueur et pour différentes configurations de contact.

Charge thermique appliquée (°C)	0	50	100
<i>Résultats issus de la modélisation analytique (mm)</i>	75,2	47,7	19,9
<i>Dispositif de type 1 (contact au centre) (mm)</i>	66	45	23
<i>Dispositif de type 2 (contact à l'extrémité) (mm)</i>	88	50	17

Tableau V-3 : Mesure de la déflexion d'un bilame de 250 mm de longueur et pour différentes configurations de contact.

Charge thermique appliquée (°C)	0	50	100
<i>Résultats issus de la modélisation analytique (mm)</i>	28,28	18,37	8,45
<i>Dispositif de type 1 (contact au centre) (mm)</i>	20	17	12
<i>Dispositif de type 2 (contact à l'extrémité) (mm)</i>	35	22	7

Tableau V-4 : Mesure de la déflexion d'un bilame de 150 mm de longueur et pour différentes configurations de contact.

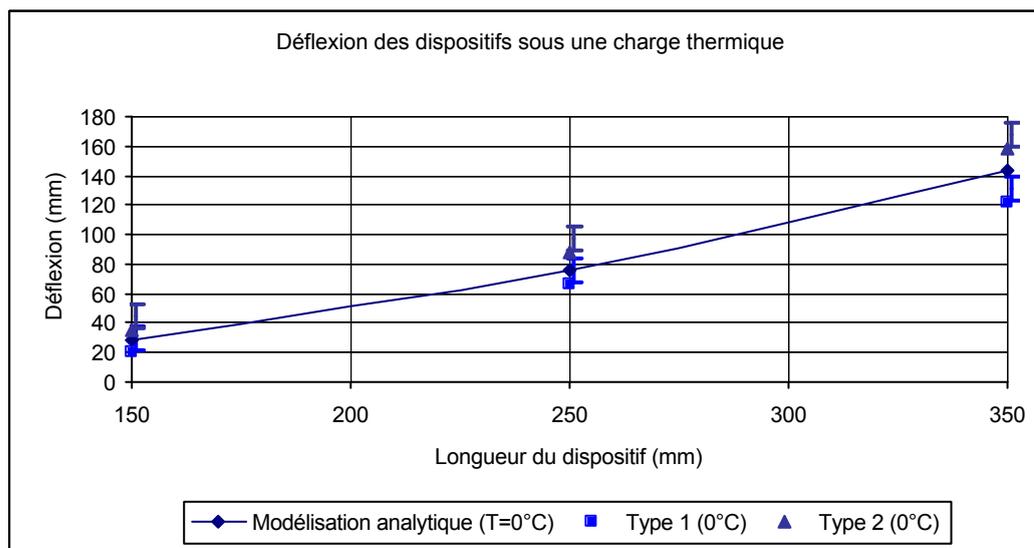


Figure V-6 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de température ambiante.

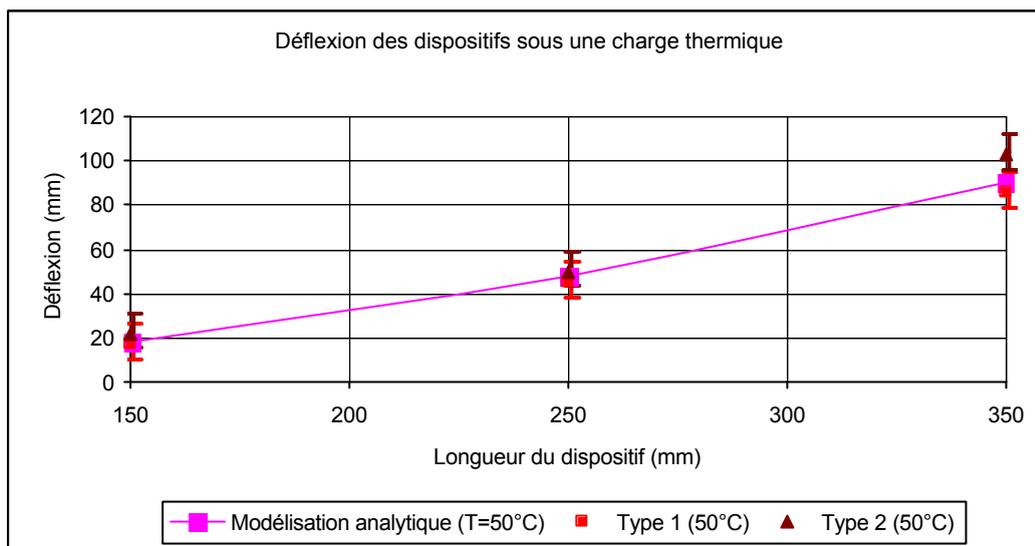


Figure V-7 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitruure de silicium pour différentes valeurs de température ambiante.

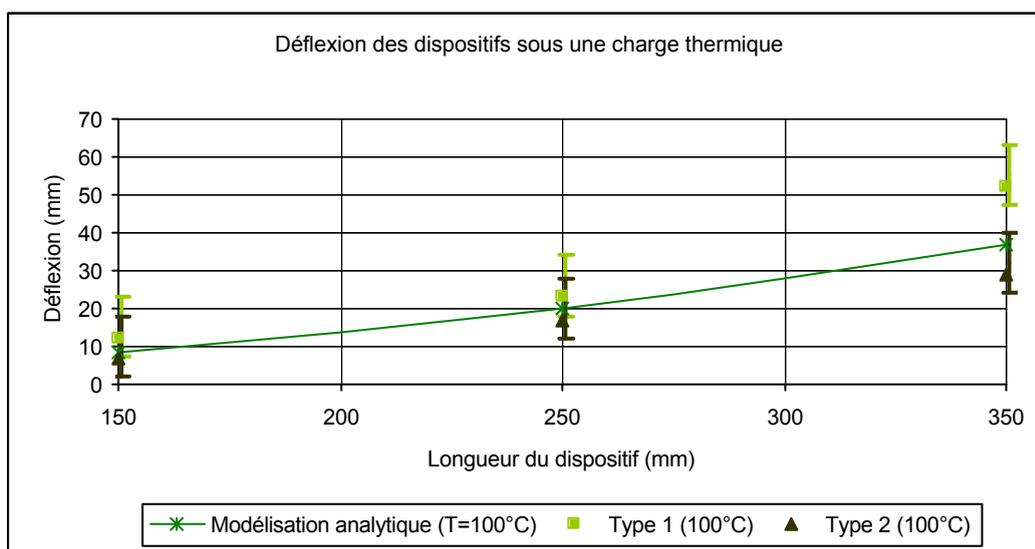


Figure V-8 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitruure de silicium pour différentes valeurs de température ambiante.

Conclusion : Nous remarquons (Figure V-6 à Figure V-8) une faible variation de la déflexion par rapport à la modélisation analytique (inférieure à 15%). De plus on ne note pas d'influence notable du contacteur sur la déflexion. Ces résultats nous confortent donc avec les hypothèses prises dans le modèle analytique.

2. Comportement sous actionnement électrothermique

Ce paragraphe s'intéresse à la déflexion sous actionnement électrothermique. La résistance mesurée intègre la résistance d'accès (environ 4 Ω). Cette résistance est

insérée dans le modèle analytique. Le recuit nécessaire à la polymérisation de la colle époxy lors de la mise en boîtier a comme conséquence une relaxation des contraintes. L'hypothèse la plus plausible est une réduction (Tableau V-5) des gradients de contrainte existants au préalable dans les couches minces. En accord avec cette hypothèse les tableaux suivants (Tableau V-6 à Tableau V-8) incluent la modélisation de la déflexion avec l'absence de gradient de contrainte.

<i>Ecart de déflexion modélisé pour un dispositif de longueur 150 mm (mm)</i>	-2,9
<i>Ecart de déflexion modélisé pour un dispositif de longueur 250 mm (mm)</i>	-8
<i>Ecart de déflexion modélisé pour un dispositif de longueur 350 mm (mm)</i>	-15,5

Tableau V-5 : Ecart modélisé entre la déflexion avec et sans gradient de contrainte

L=350 mm*Contact type1 au centre*

Courant d'entrée (mA)	0	25	40	50	60
<i>Puissance d'entrée (mW)</i>	0	2,68	7,2	13,75	20,88
<i>Résistance du dispositif (W)</i>	3,7	4,3	4,5	5,5	5,8
<i>Déflexion initiale (mm)</i>	113	103	74	27	8

Contact type2 à l'extrémité

Courant d'entrée (mA)	0	25	40	50	60
<i>Puissance d'entrée (mW)</i>	0	2,55	7,44	13,85	21,24
<i>Résistance du dispositif (W)</i>	3,6	4,08	4,65	5,54	5,9
<i>Déflexion initiale (mm)</i>	120	109	75	30	7

Modélisation Analytique

Courant d'entrée (mA)	0	25	40	50	60
<i>Puissance d'entrée (mW)</i>	0	2,5375	7,776	13,325	20,988
<i>Résistance du dispositif (W)</i>	3,6	4,06	4,86	5,33	5,83
<i>Ecart de température maximal théorique (°C)</i>	0	33	105	200	250
<i>Déflexion initiale (mm)</i>	129	111	73	31	5

Tableau V-6 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxy-nitride de silicium pour différentes configurations de contact.

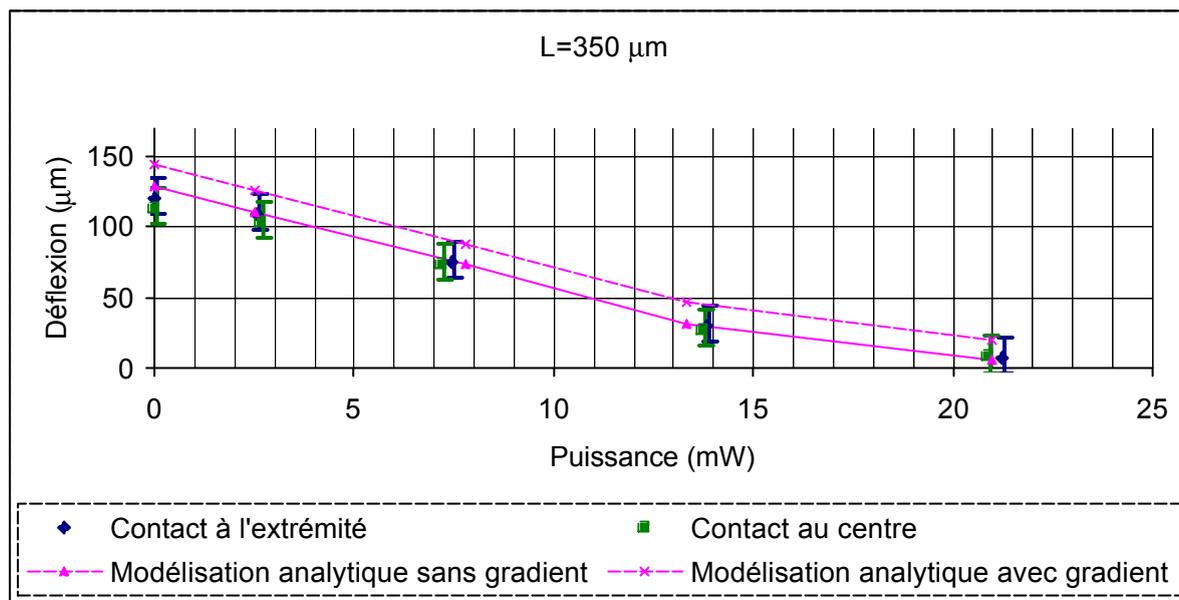


Figure V-9 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxy-nitride de silicium pour différentes valeurs de puissance.

$L=250 \text{ mm}$

Contact type1 au centre

Courant d'entrée (mA)	0	25	50	60	75
Puissance d'entrée (mW)	0	1,68	9	14,58	23,62
Résistance du dispositif (W)	2,5	2,7	3,6	4,05	4,2
Déflexion initiale (mm)	63,5	60	25	14	contact

Contact type2 à l'extrémité

Courant d'entrée (mA)	0	25	50	60	75
Puissance d'entrée (mW)	0	1,93	10,25	15,48	25,65
Résistance du dispositif (W)	2,5	3,1	4,1	4,3	4,56
Déflexion initiale (mm)	68	64	35	15	contact

Modélisation Analytique

Courant d'entrée (mA)	0	25	50	60	75
Puissance d'entrée (mW)	0	1,76	8,8	13,68	23,62
Résistance du dispositif (W)	2,6	2,82	3,52	3,8	4,2
Ecart de température maximal théorique (°C)	0	23	120	212	250
Déflexion (mm)	67,12	60,8	36,15	18	contact

Tableau V-7 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxy-nitride de silicium pour différentes configurations de contact.

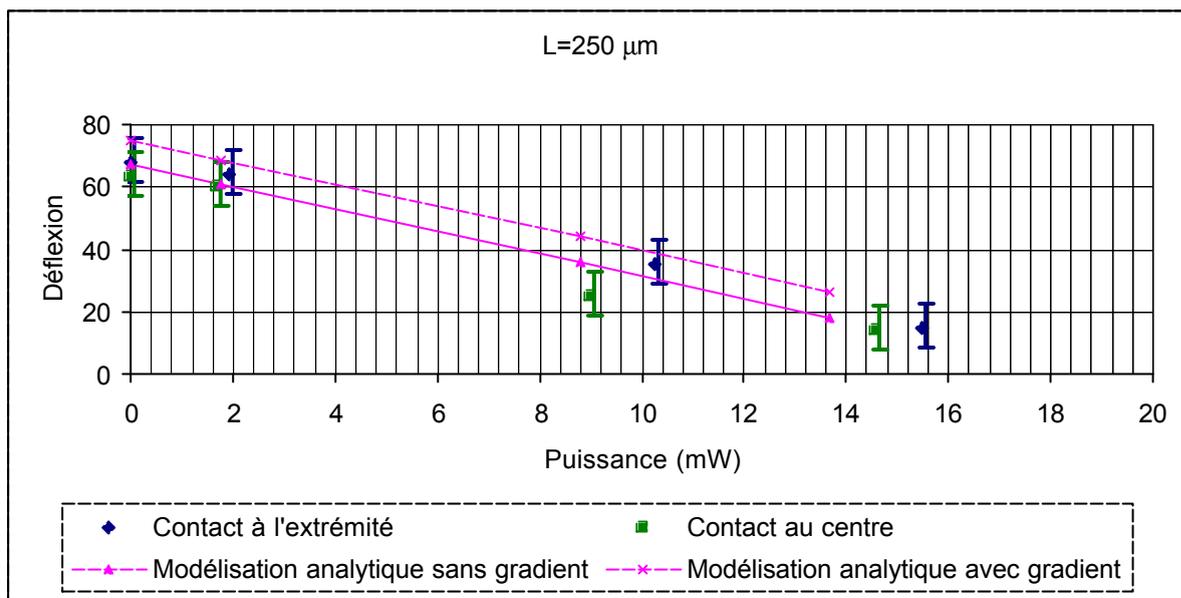


Figure V-10 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxy-nitride de silicium pour différentes valeurs de puissance.

$L=150 \text{ mm}$

Contact type1 au centre

Courant d'entrée (mA)	0	25	50	75	100
<i>Puissance d'entrée (mW)</i>	0	0,9	4,6	12,54375	24,9
<i>Résistance du dispositif (W)</i>	1,4	1,44	1,84	2,23	2,49
<i>Déflexion initiale (mm)</i>	26	24	19	10	7

Contact type2 à l'extrémité

Courant d'entrée (mA)	0	25	50	75	100
<i>Puissance d'entrée (mW)</i>	0	0,9375	4,375	11,8125	25
<i>Résistance du dispositif (W)</i>	1,4	1,5	1,75	2,1	2,5
<i>Déflexion initiale (mm)</i>	30	29	25	14	8

Modélisation Analytique

Courant d'entrée (mA)	0	25	50	75	100
<i>Puissance d'entrée (mW)</i>	0	1,0375	4,65	11,8125	27
<i>Résistance du dispositif (W)</i>	1,6	1,66	1,86	2,1	2,7
<i>Ecart de température maximal théorique (°C)</i>	0	7	50	136	250
<i>Déflexion (mm)</i>	25,4	24,7	20,15	12,85	4,7

Tableau V-8 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxy-nitride de silicium pour différentes configurations de contact.

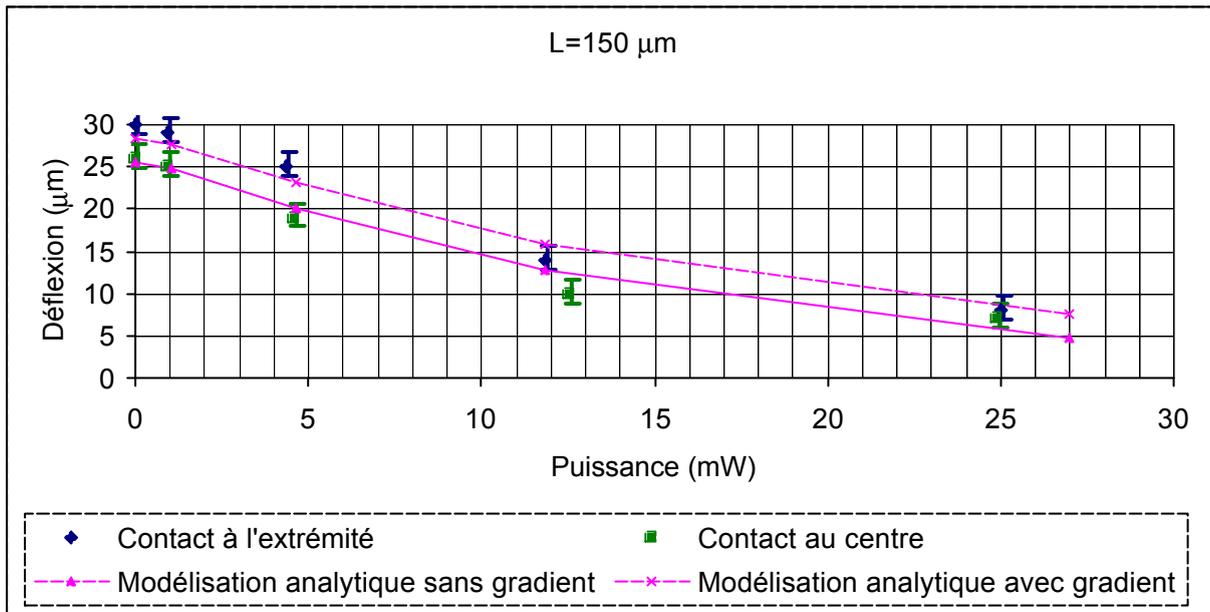


Figure V-11 : Mesure de la déflexion d'un bilame aluminium/oxynitride de silicium pour différentes valeurs de puissance.

Conclusion : On observe une assez bonne correspondance entre les modélisations analytiques et les résultats expérimentaux. Cependant, plus la structure est petite plus la divergence entre modélisation et pratique s'accroît. Cela peut s'expliquer par la présence du contacteur qui couvre, pour le dispositif de 150 μm , plus de 25% de la surface totale. Cette couche, étant fortement en tension, elle tend à réduire la valeur déflexion finale.

3. Analyse de la température et courant de fonctionnement en fonction de la température ambiante

Les courbes suivantes montrent l'évolution de la température et du courant de fonctionnement pour atteindre une certaine valeur de déflexion (8 μm en l'occurrence).

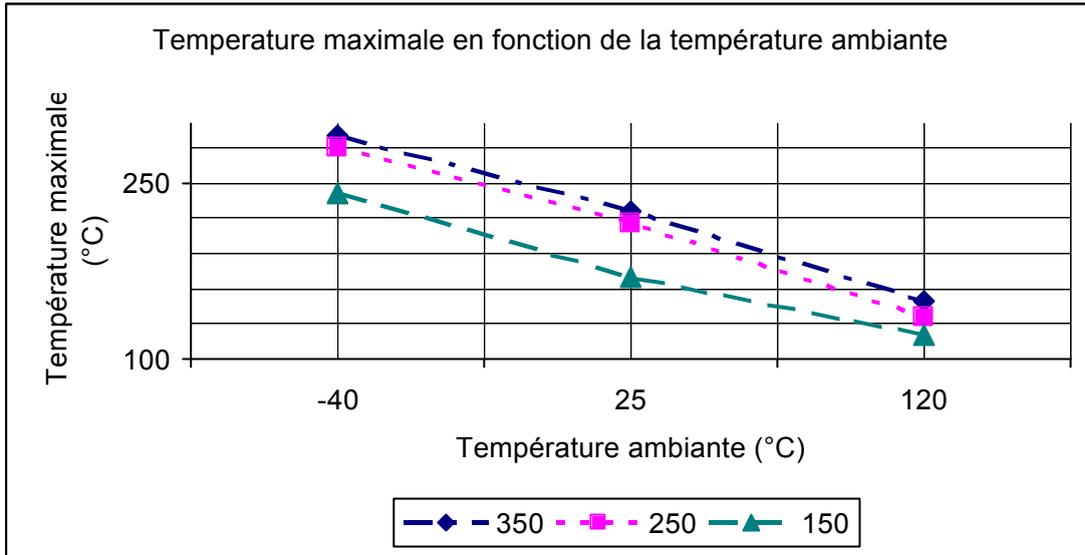


Figure V-12 : Evolution de la température maximale en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif

Longueur du dispositif (mm)	150	250	350
Température ambiante de -40°C	240	280	290
Température ambiante de 25°C	170	215	225
Température ambiante de 120°C	120	135	150

Tableau V-9 : Evolution de la température maximale en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif

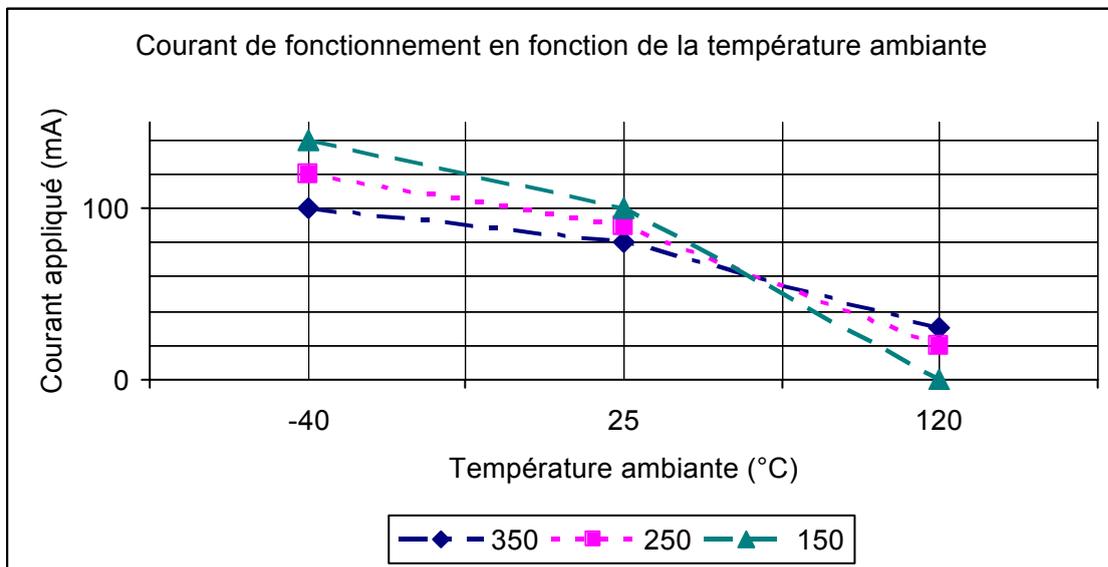


Figure V-13 : Evolution du courant de fonctionnement en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif

Longueur du dispositif (mm)	150	250	350
Température ambiante de -40°C	140	120	100
Température ambiante de 25°C	100	90	80
Température ambiante de 120°C	0	20	30

Tableau V-10 : Evolution du courant de fonctionnement en fonction de la température ambiante et de la longueur du dispositif

Conclusion : On observe assez logiquement une diminution de la température maximale de fonctionnement lorsque la température ambiante augmente. De même le courant nécessaire pour atteindre la déflexion prévue diminue de manière importante.

4. Déformation

Ce paragraphe s'intéresse à la caractérisation de la déformation du dispositif lorsqu'il est soumis à un actionnement électrothermique. Ce travail consiste à déterminer l'angle de contact, ainsi que la hauteur maximale observée lorsque le contact est réalisé. La caractérisation se fait par microscopie interférométrique (Figure V-14 et Figure V-16). Cependant, l'importante déformation de certaines structures ne permet pas une mesure complète, la mesure est alors complétée par une mesure par microscopie classique.

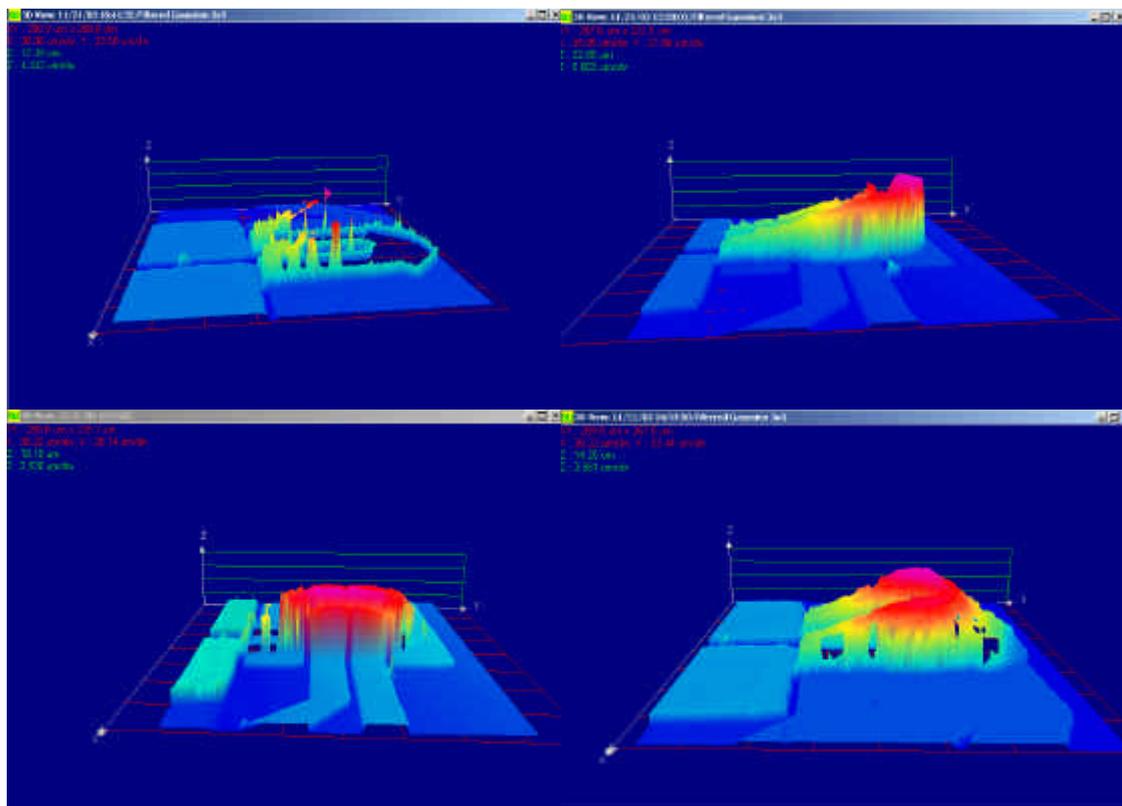


Figure V-14 : Image obtenue par microscopie interférométrique de la déformation d'un microrelais sous actionnement thermique (0, 25, 75 et 100 mA)



Figure V-15 : Image obtenue sous binoculaire de la déformation d'un microrelais sous actionnement thermique (0, 50 et 100 mA)

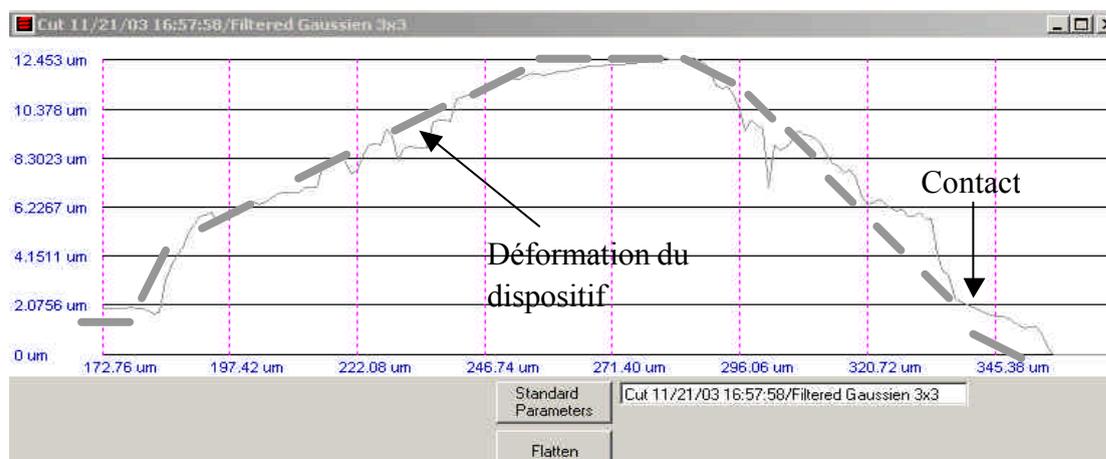


Figure V-16 : Vue en coupe de la déformation d'un microrelais, de 150mm de long, actionné électrothermiquement (image obtenue par microscopie interférométrique)

Longueur du dispositif	150	250	350
Déflexion maximale issue de la modélisation analytique (mm)	4,5	12,4	19
Déflexion maximale issue de la modélisation FEM (mm)	5	7	11
Déflexion maximale mesurée (mm)	12,5	21,6	28,3
Angle de contact mesuré	9°	9,8°	9,2°

Tableau V-11 : Mesure de la déformation

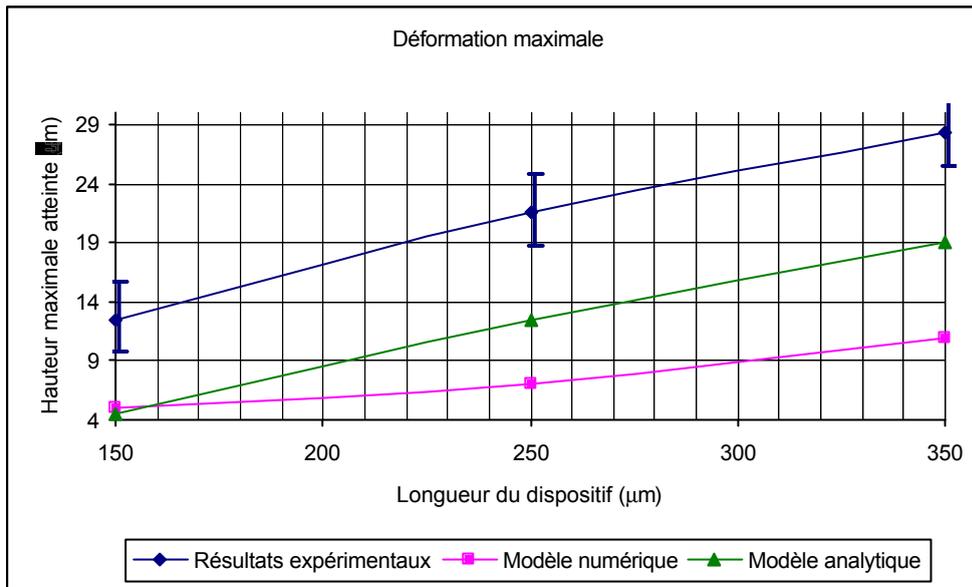


Figure V-17 : Mesure de la déformation

Conclusion : Le dispositif adopte un comportement de poutre bi-encastree (Figure V-18), le premier point d'ancrage étant celui du cantilever et le second étant formé par le contact entre le cantilever et le substrat. Ce comportement de poutre bi-encastree provoque l'accentuation de la déformation lorsque la température augmente. On observe alors une déformation nettement plus importante que celle prévue par les modélisations. Cela s'explique par le fait suivant : lorsque la structure est en contact avec le substrat la force de frottement est importante, celle-ci empêche le glissement du dispositif (Figure V-19).

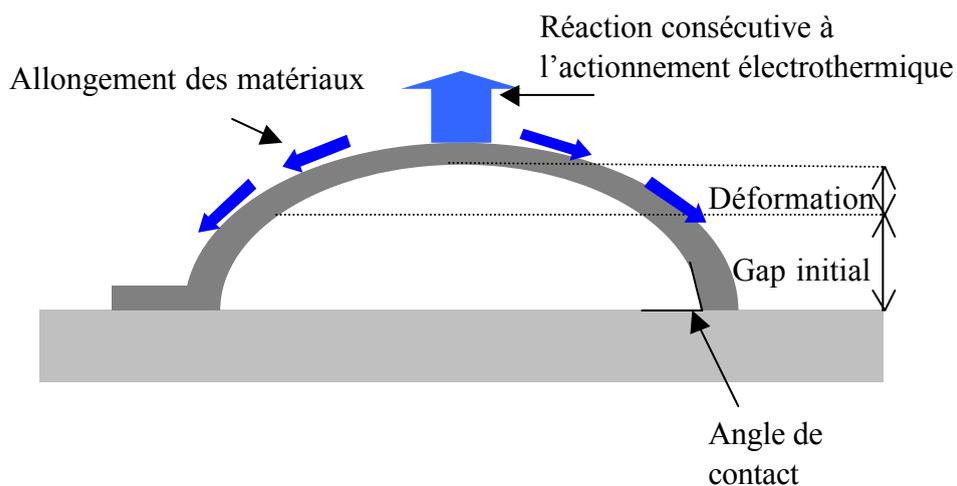


Figure V-18 : Représentation schématique d'une structure en "U" subissant un actionnement électrothermique

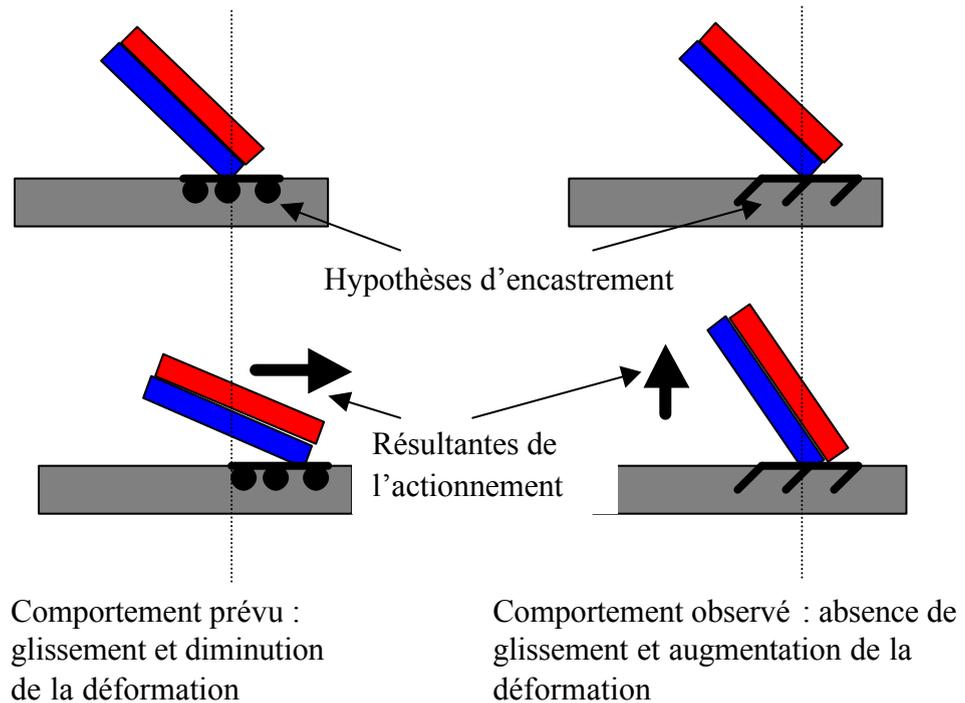


Figure V-19 : Explication schématique du comportement de la structure à l'interface avec le substrat lors d'un actionnement électrothermique

5. Comportement sous actionnement électrostatique

Ce paragraphe s'intéresse à l'évaluation de la tension d'effondrement lorsque le dispositif est sous actionnement électrothermique. Le mode opératoire consiste à puissance donnée (lorsque le dispositif est en contact avec le substrat) de mesurer la tension d'effondrement (lorsque le dispositif se plaque sur le substrat) (Figure V-20). La caractérisation de la tension d'effondrement se fait par observation visuelle. C'est-à-dire l'observation de la tension pour laquelle le dispositif vient se plaquer sur le substrat.

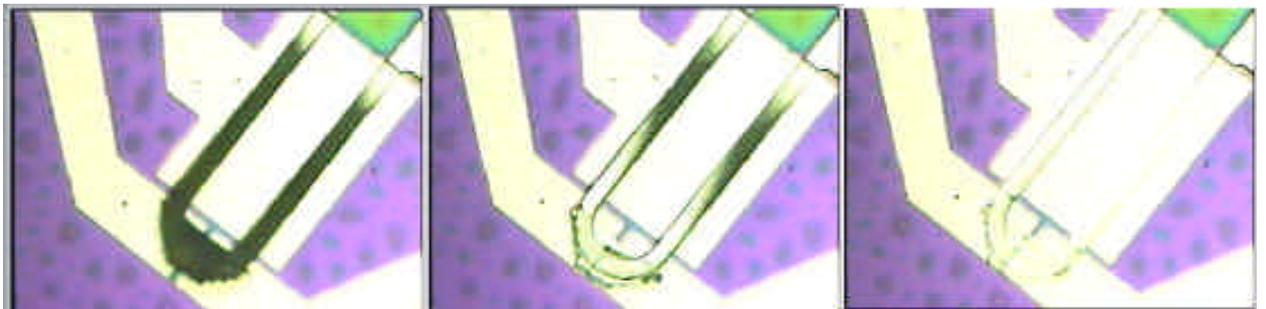


Figure V-20 : Sans actionnement/Actionnement électrothermique/Actionnement électrothermique et électrostatique

Longueur du dispositif (mm)	150	250	350
Tension d'effondrement (V)	109	115	122
Tension d'effondrement du modèle analytique (V)	<20	<7	<4

Tableau V-12 : Mesure de la tension d'effondrement

Contrairement aux hypothèses prises au moment de la conception, le dispositif ne profite pas d'un effet « zip » et nécessite une tension d'actionnement élevée. L'une des raisons de cet écart est la déformation importante du dispositif lors de l'actionnement électrothermique. En effet, la structure adopte alors comme on l'a expliquée précédemment un comportement de poutre bi-encastree (Figure V-21) ce qui augmente la raideur du dispositif et par conséquent la valeur de la tension d'effondrement.

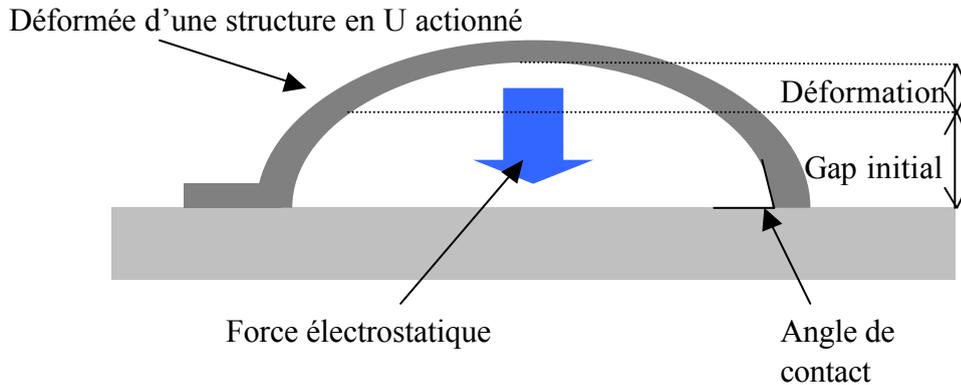


Figure V-21 : Représentation schématique d'une structure en "U" subissant un actionnement électrothermique et électrostatique

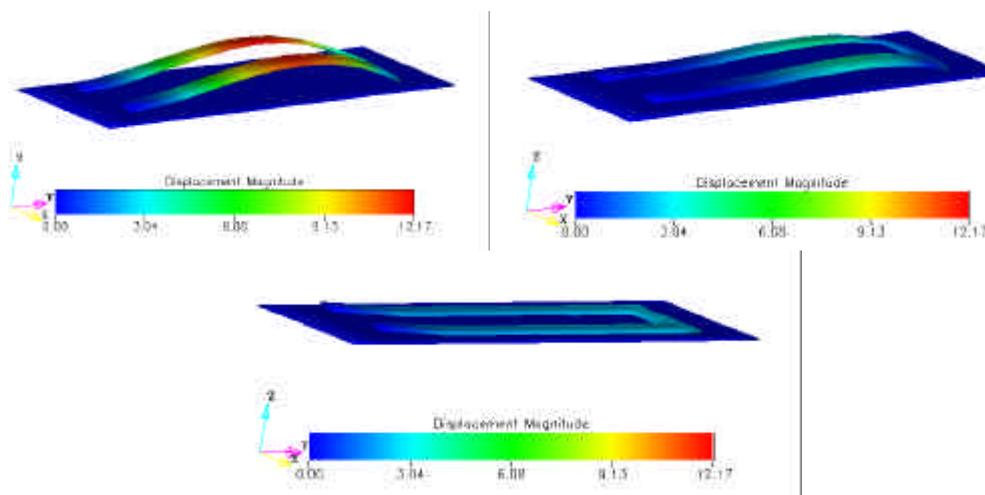


Figure V-22 : Modélisation FEM de l'actionnement électrostatique sur un dispositif de 150 mm de long actionné de manière électrothermique (0, 75, 150V de tension d'actionnement).

A ce niveau de complexité, il est nécessaire de modéliser le comportement complet du dispositif par simulation FEM sous coventorware® (Figure V-22), en prenant une hypothèse d'encastrement pour le contact.

Longueur du dispositif	150	250	350
<i>Déflexion maximale mesurée (mm)</i>	12,5	21,6	28,3
<i>Déflexion maximale issue de la modélisation FEM (mm)</i>	5	7	11
<i>Tension d'effondrement (V)</i>	109	115	122
<i>Tension d'effondrement issue de la modélisation FEM (V)</i>	130	140	150

Tableau V-13 : Modélisation de la tension d'effondrement

Remarque : L'ajout d'un coefficient de friction peut permettre une meilleure approximation de la valeur de la tension d'effondrement.

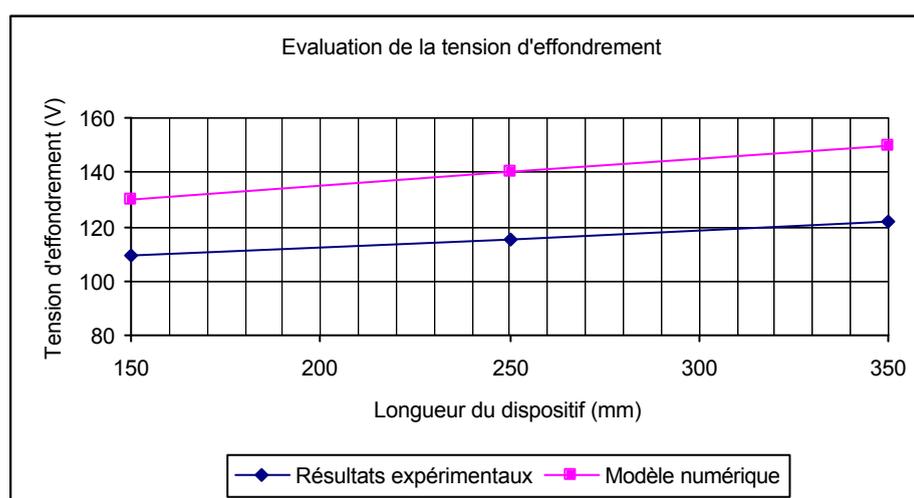


Figure V-23 : Modélisation de la tension d'effondrement

Conclusion : L'actionnement électrostatique nécessite une tension élevée. Ce besoin rend le dispositif inutilisable dans les spécifications de fonctionnement actuelles.

Remarque : La simulation numérique permet une meilleure approximation de la tension d'effondrement. L'idée est alors approximée le dispositif à une poutre bi encastree précontraint dans le modèle analytique. Cependant un changement de géométrie s'impose pour demeurer à l'intérieur du le cahier des charges. De plus, les amplitudes importantes des tensions d'actionnement sont à l'origine de plusieurs mécanismes de défaillance liés au chargement du diélectrique.

6. Relaxation de contrainte

Variables	Définition	unité
s	Contrainte	Pa
e	allongement	S.U.
E	Module d'Young	GPa
h	Coefficient de viscosité	S.U.

Tableau V-14 : Variables utilisées dans le calcul du temps de relaxation

Le recuit nécessaire à la polymérisation de la colle lors de la mise en boîtier des réticules, a entraîné une réduction de la déflexion initiale faisant suite à une relaxation de contrainte. Cette relaxation est également observée lors d'un chargement thermique des dispositifs. Ce comportement peut se rapprocher d'un état viscoélastique [2] qui se caractérise par trois spécificités :

- La relaxation qui est l'augmentation progressive de la déformation lorsque l'on maintient constante la contrainte.
- La recouvrance qui correspond au retour progressif, total ou non, vers la forme initiale lorsqu'on a effectué une décharge.
- L'effacement qui concerne l'augmentation en valeur absolue de la déformation.

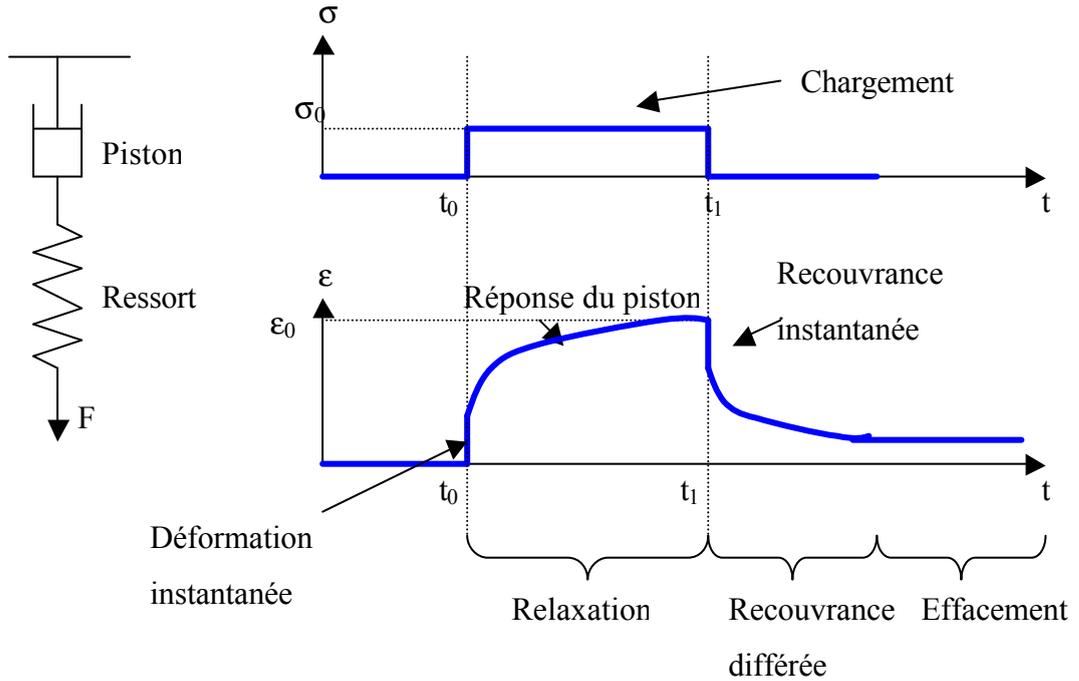


Figure V-24 : schéma de principe

Pour bien caractériser ce type de comportement, il est important de pouvoir modéliser la partie viscoélastique de la réponse du matériau aux sollicitations mécaniques, notamment en décharge et en relaxation. Dans la rhéologie des matériaux trois éléments sont utilisés : L'élément de Hooke décrivant le comportement élastique, Newton décrivant l'amortissement dans un milieu visqueux, et l'élément de St Venant pour l'amortissement de Coulomb. Les différents éléments peuvent être associés en parallèle lorsque l'allongement est stable ou en série lorsque la contrainte est stable. Des modèles mécaniques simples permettent de démontrer le comportement viscoélastique. Ils sont obtenus en couplant un élément qui présente une réponse visqueuse idéale à l'application d'une contrainte (i.e. le piston, qui obéit strictement à la loi de Newton), à un élément présentant une réponse élastique idéale à l'application d'une contrainte (i.e. le ressort, qui obéit strictement à la loi de Hooke). Le comportement du piston est donc caractérisé par une viscosité η et celui du ressort par un module E . C'est le modèle rhéologique de Maxwell (un piston et un ressort assemblés en série).

La relation entre contrainte et allongement s'écrit alors :

$$\mathbf{s}(t) + \frac{\mathbf{h}}{E} \frac{d\mathbf{s}(t)}{dt} = E\mathbf{e}(t) + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{e}(t)}{dt} \quad (\text{V.6})$$

Si on prend l'hypothèse d'une contrainte constante d'expression σ_0 , la relation devient :

$$\mathbf{s}_0 = E\mathbf{e}(t) + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{e}(t)}{dt} \quad (\text{V.7})$$

L'expression de l'allongement en fonction du temps et de la contrainte initiale est :

$$\mathbf{e}(t) = \frac{\mathbf{s}_0}{E} + \left(\mathbf{e}_0 - \frac{\mathbf{s}_0}{E} \right) e^{-\frac{E}{\mathbf{h}}t} \quad (\text{V.8})$$

Les matériaux utilisés étant peu visqueux, le temps de relaxation est important. Les mesures suivantes (Tableau V-15 et Tableau V-16) portent sur un dispositif de longueur 350 μm car les effets sont plus visibles.

Temps (min)	0	5	10	20	30	45	60
Déflexion finale sous un 1 ^{er} cycle sous une charge thermique de 50°C (mm)	103	89	86	79	76	73	71
Déflexion finale sous un 2 ^{eme} cycle sous une charge thermique de 50°C (mm)	93	79	76	72	68	65	63
Déflexion finale sous un 3 ^{eme} cycle sous une charge thermique de 50°C (mm)	75	66	65	62	59	55	54

Tableau V-15 : Mesure de la déflexion d'un dispositif de 350 mm de long sous une charge thermique de 50°C

Temps (min)	0	25	60	120	240
Déflexion initiale après un 1 ^{er} cycle sous une charge thermique de 50°C (mm)	117	120	122	122	122
Déflexion initiale après un 2 ^{eme} cycle sous une charge thermique de 50°C (mm)	109	113	115	115	115
Déflexion finale après un 3 ^{eme} cycle sous une charge thermique de 50°C (mm)	103	111	113	113	113

Tableau V-16 : Mesure de la déflexion d'un dispositif de 350 mm de long après application d'une charge thermique de 50°C

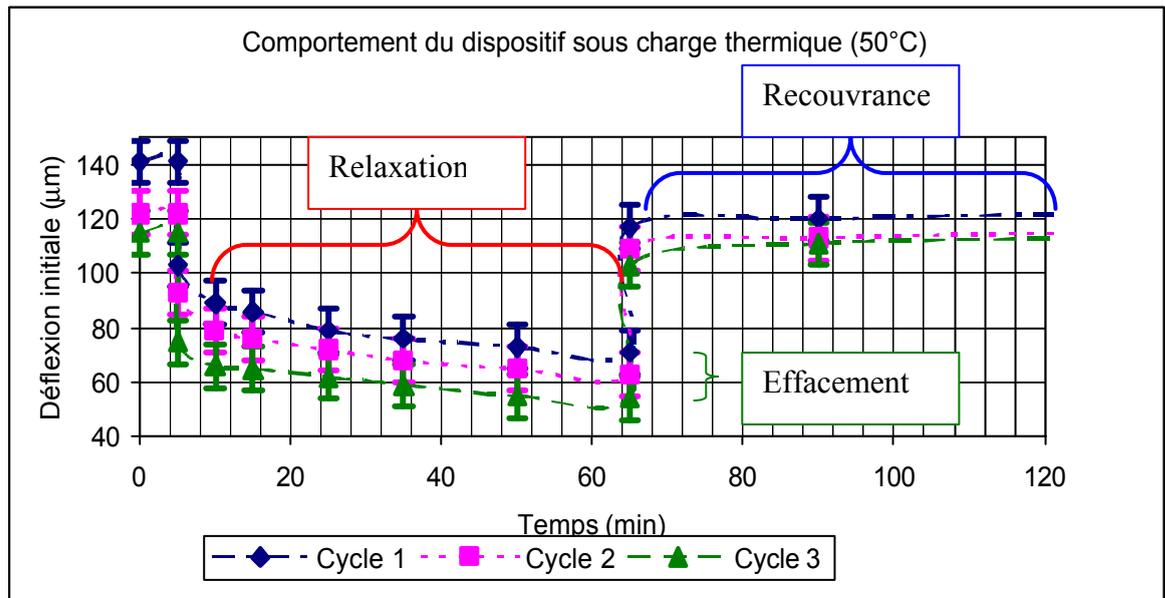


Figure V-25 : Mesure de la déflexion d'un dispositif de 350 mm de long après application d'une charge thermique de 50°C

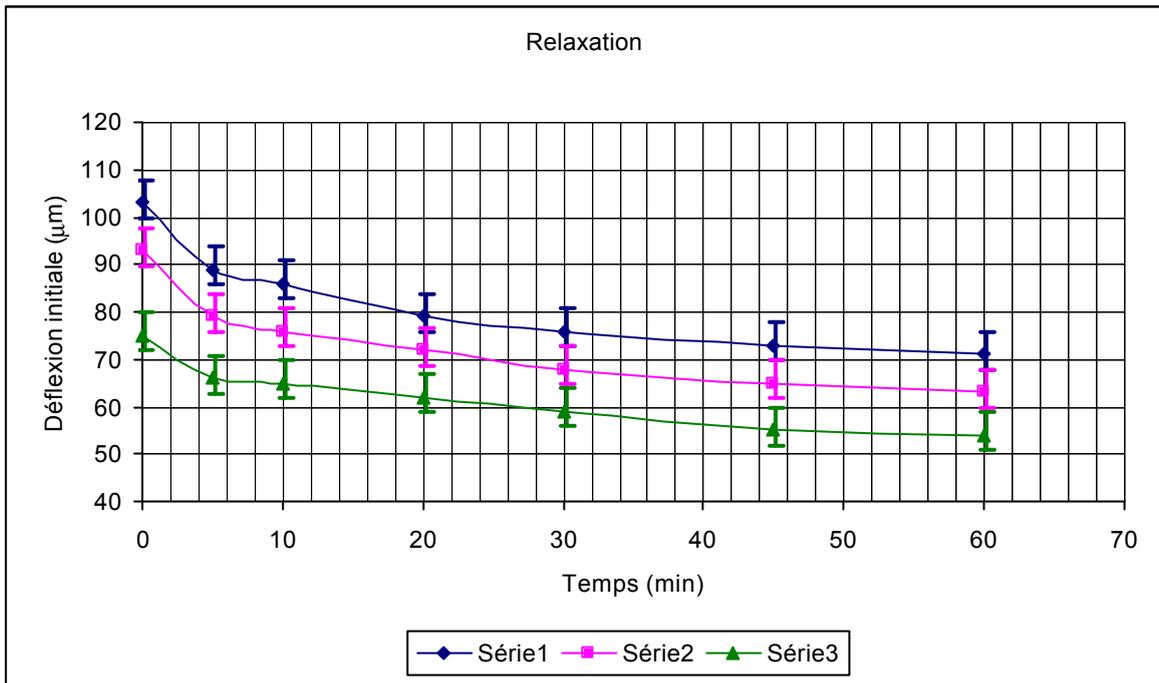


Figure V-26 : Détail de la relaxation

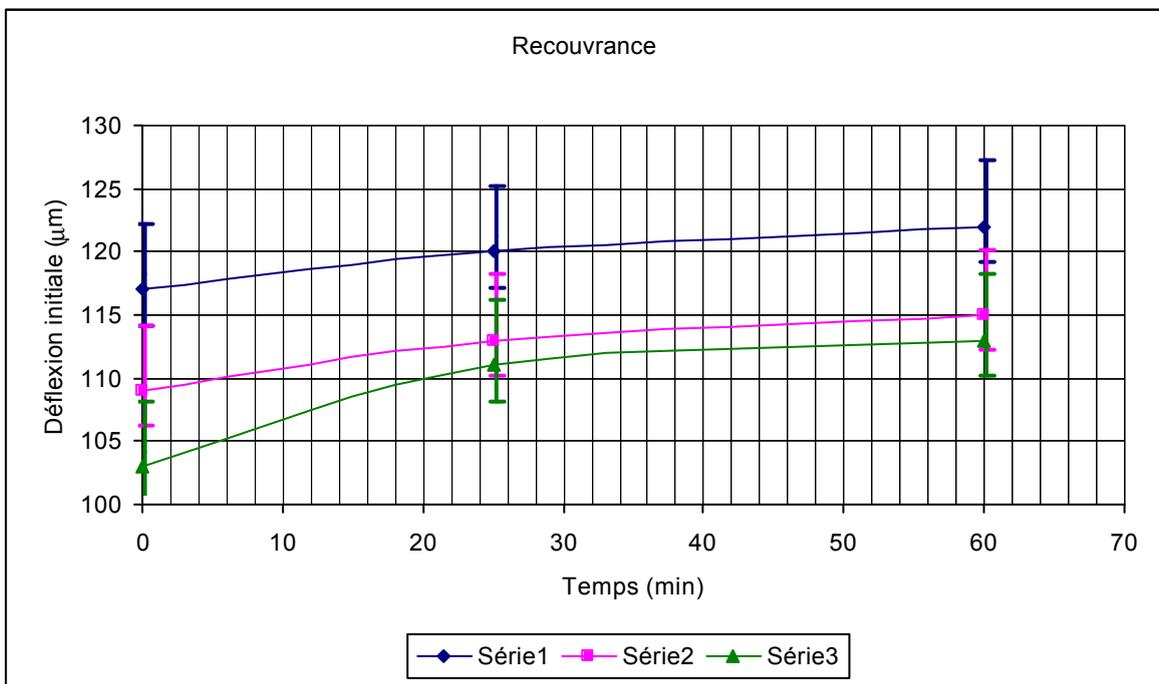


Figure V-27 : Détail de la recouvrance

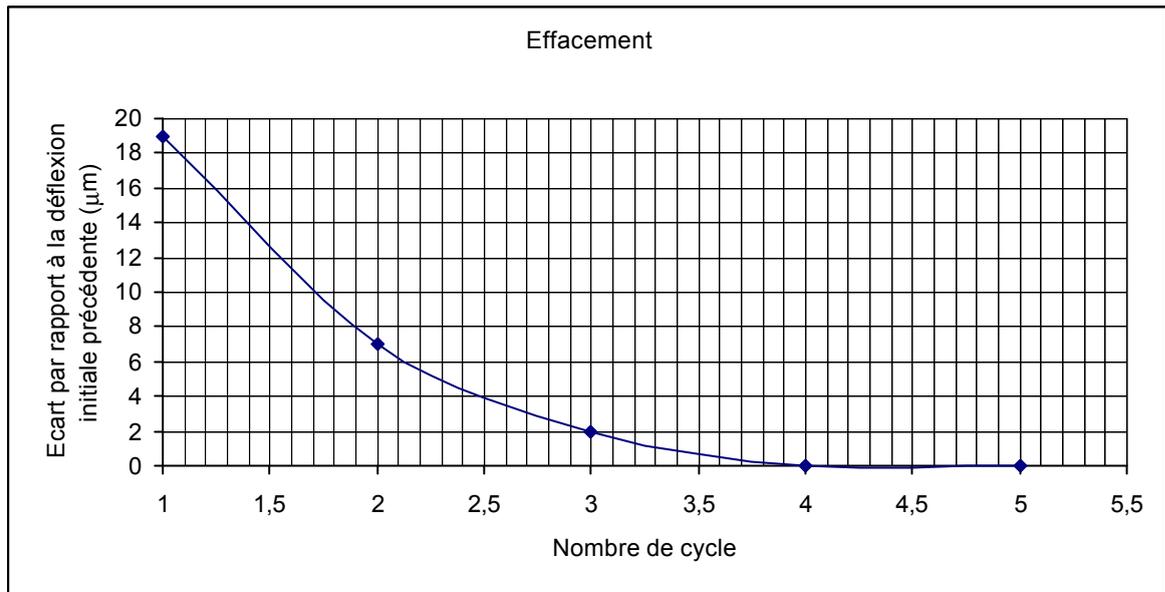


Figure V-28 : Détail de l'effacement

Conclusion : On déduit des mesures précédentes le temps de relaxation qui est d'une heure environ et le temps de recouvrance de 20 minutes environ. Suite à ce chargement thermique externe, le dispositif ne reprend pas sa position initiale et subi un décalage d'environ 30 µm stabilisé au bout du quatrième cycle.

7. Fréquence de résonance

La fréquence de résonance des dispositifs est caractérisée en utilisant la microscopie interférométrique (Figure V-29) et une céramique piézoélectrique.

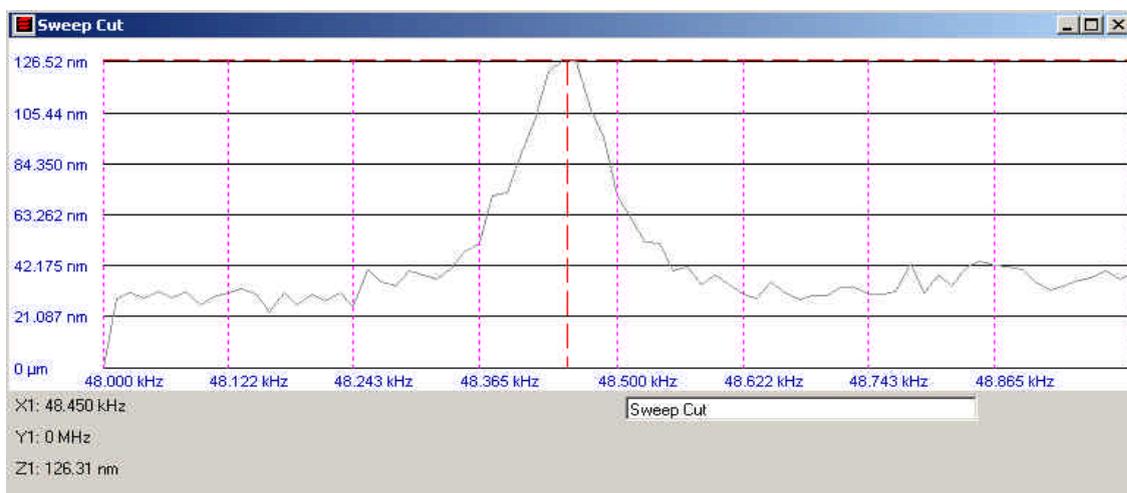


Figure V-29 : Mesure de la fréquence de résonance d'un dispositif par microscopie interférométrique

Longueur (mm)	150	250	350
<i>Modélisation analytique de la fréquence de résonance (kHz)</i>	53,9	19,4	9,9
<i>Mesure la fréquence de résonance (kHz)</i>	48,45	26,8	14,9

Tableau V-17 : Mesure de la fréquence de résonance

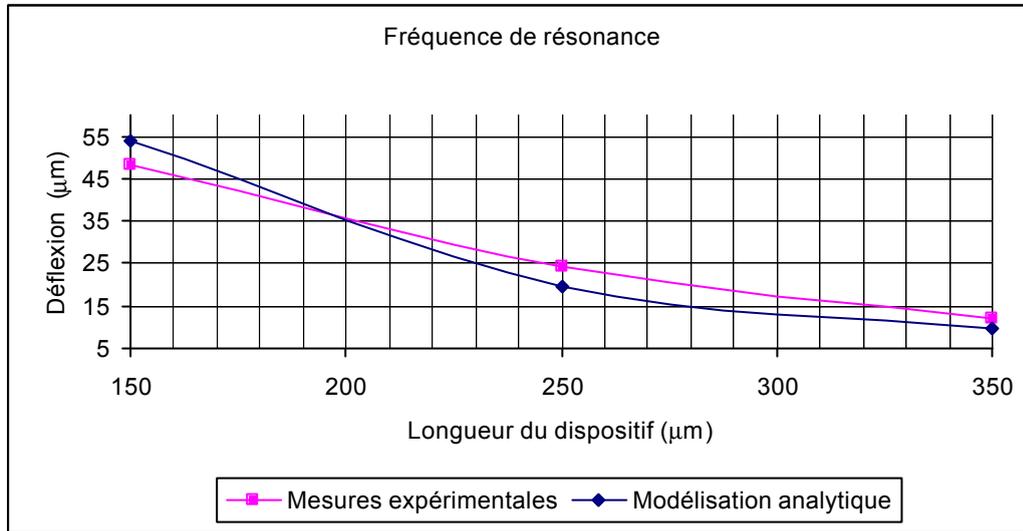


Figure V-30 : Mesure de la fréquence de résonance

Conclusion : On constate une bonne concordance des mesures, la différence s'explique par les hypothèses prises sur le point d'ancrage qui n'est pas parfait et à la dispersion dues à la fabrication technologique.

8. Influence de l'actionnement thermique sur le boîtier

Il n'est pas possible avec les moyens mis à notre disposition de caractériser la distribution de température au niveau des structures. Cependant, un système de thermographie infrarouge permet, malgré une résolution faible, de mesurer l'influence d'un actionnement thermique sur les dispositifs proches et le comportement en boîtier (Figure V-31). Les thermogrammes sont enregistrés après une alimentation de 15 secondes.

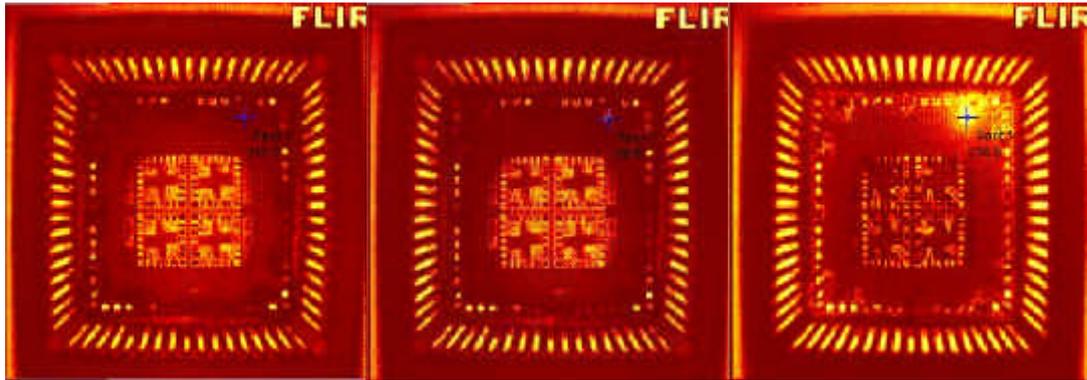


Figure V-31 : Thermographie infrarouge du boîtier lors de l'actionnement d'un dispositif de 350 mm de long et traversé par un courant de 0, 50, et 75 mA (contact) et conduisant à une température théorique supérieure à 250°C

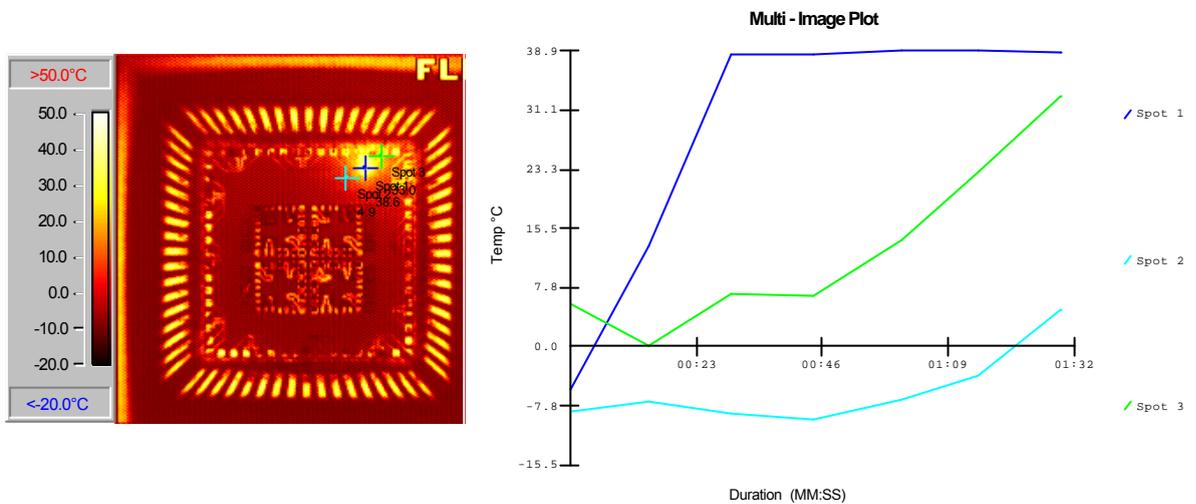


Figure V-32 : Thermographie infrarouge du boîtier sur trois points lors de l'actionnement d'un dispositif de 350 mm de long et traversé par un courant de 75 mA

Conclusion : On constate une faible influence de l'actionnement sur les dispositifs voisins séparés de 2 mm. Ce qui nous permet d'envisager, pour la suite, la conception d'une architecture sécuritaire sur un même réticule. Les températures sont anormalement froides à T_0 . Rapidement, on constate un palier à 38,5°C pour la mesure de la zone active. Ensuite, plus aucune élévation de température n'a été constatée.

9. Evaluation de la résistance de contact

La résistance de contact peut être définie comme la résistance électrique entre deux éléments conducteurs mis en contact de manière mécanique dans le but de faire passer un courant électrique d'un élément à l'autre. La valeur de la résistance de contact

dépend, non seulement de la conductivité électrique des matériaux, mais aussi de la topographie et de la nature des surfaces mises en contact. L'une des difficultés majeures est de trouver la surface de contact réelle. Celle-ci est différente de la surface de contact apparente, définie par la forme et la taille de l'élément. Le paragraphe suivant donne les éléments permettant d'évaluer la résistance de contact.

Variables	Définition	unité
F_i	Force appliquée sur l'aspérité	N
R_i	allongement	m
r_0	Rayon de la surface de contact	m
h	Enfoncement du contact	m
le	Libre parcours moyen d'un électron	m
r	Résistivité du matériau	W.m
E	Module d'Young	Pa
H	Dureté du matériau	Pa

Tableau V-18 : Variables et constantes utilisées lors de l'évaluation de la résistance de contact

La surface de contact effective de deux éléments abouchés peut être approximée à une somme de microcontacts circulaires suffisamment éloignés pour que l'on néglige leurs interactions. Connaissant la pression s'exerçant sur le contact, il est possible d'évaluer la résistance de contact effective.

Les microcontacts sont modélisés par la percussion de deux demi-sphères de rayon r_1 et r_2 . Le nombre de ces microcontacts ainsi que leur taille sont déterminés à partir d'un modèle élastoplastique proposé par Chang [3]. Ce modèle est basé sur la théorie de Greenwood et Williamson [4], dans lequel le contact est représenté comme un ensemble d'aspérités sphériques de rayon identique. La position du contact répond à une distribution statistique. Les aspérités sont supposées indépendantes les unes des autres et la surface de contact de chaque aspérité est calculée par la formule de Hertz des déformations élastiques.

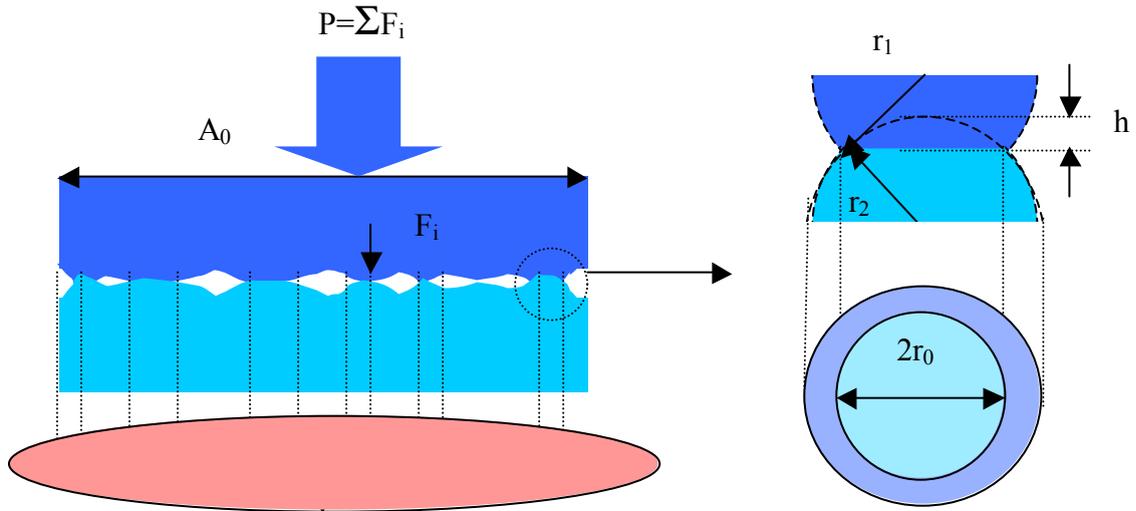


Figure V-33 : Représentation schématique d'un contact

La surface de contact d'une aspérité est circulaire et a pour expression :

$$A = pr_0^2 \quad (\text{V.9})$$

Avec $r_0 = \left(\frac{3}{4} kRF_i \right)^{\frac{1}{3}}$ et où $k = \left(\frac{1-u_1^2}{E_1} + \frac{1-u_2^2}{E_2} \right)$ et $R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$ le rayon équivalent.

La déformation verticale du contact h a pour expression :

$$h = R^{\frac{1}{3}} (kF)^{\frac{2}{3}} = \frac{r_0^2}{R} \quad (\text{V.10})$$

La pression moyenne s'exerçant sur une aspérité est approximée à ζH , la force de contact est alors de :

$$F_i = \zeta p H r_0^2 \quad (\text{V.11})$$

Où H représente la dureté du matériau utilisé comme contact.

On se trouve dans le domaine élastique pour $\zeta < 0.3$, élastoplastique pour $0.3 < \zeta < 0.75$ et plastique pour $\zeta = 1$, typiquement on prend $\zeta = 0.6$ pour les contacts électriques. La déformation verticale des aspérités à ce point est alors donnée par la relation :

$$h_d = \left(\frac{0.3 p H}{k} \right)^2 R \quad (\text{V.12})$$

Le rayon de la surface de contact de l'aspérité est déterminé par la déformation verticale h en appliquant le principe de la conservation de volume.

$$r_0 = \sqrt{Rh \left(2 - \frac{h_d}{h} \right)} \quad h \gg h_d \quad (\text{V.13})$$

Par conséquent connaissant la déformation verticale il est possible de déterminer le rayon de l'aspérité et la force s'exerçant dessus. La conductivité du contact dépend étroitement de la résistance de constriction de chaque plot de contact.

On prend comme hypothèse, que le flux de courant est radial, de la surface de contact jusqu'au conducteur.

$$G_1 = \frac{2r_0}{r} = \frac{2\sqrt{Rh}}{r} \quad (\text{V.14})$$

Dans le cas de faible enfoncement si le rayon r_0 de la surface de contact est plus petit que le libre parcours moyen de l'électron l_e la conductance a pour expression :

$$G_2 = \frac{3pr_0^2}{4rl_e} = \frac{3pRh}{4rl_e} \quad (\text{V.15})$$

Selon Wexler la résistance de contact est une somme de résistances $nR_1 = \frac{n}{G_1}$ et de

résistances $R_2 = \frac{1}{G_2}$, il en résulte une résistance finale de :

$$R_i = R_2 + uR_1 = \frac{4rl_e}{3pr_0^2} + u \frac{r}{2r_0} \quad (\text{V.16})$$

v dépend étroitement du ratio l_e/r_0 , avec $v(0)=0$ et $v(8)=0.694$ mais pour garder un modèle simple, on prend la valeur de 0.3.

La résistance totale du contact est de $\frac{1}{R_{tot}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$ avec N le nombre d'aspérités.

Cette partie importante de la caractérisation nous fait défaut dans ce manuscrit. Elle se poursuit au moment de la rédaction de ce manuscrit. Cependant, on observe que le contact est difficile à obtenir par un actionnement thermique seul. En effet, la déformation et l'angle de contact entre le dispositif et le substrat font que la surface de contact est insuffisante (Figure V-34) pour obtenir une bonne résistance de contact, même si la force exercée par l'actionnement électrothermique est conséquente.

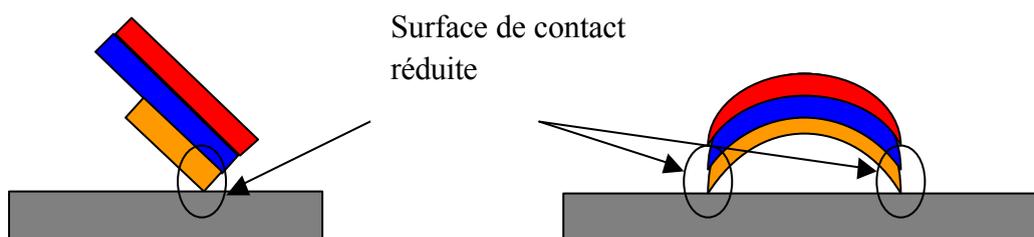


Figure V-34 : Représentation du problème de surface de contact (vue de profil puis de face)

Les mesures se font donc essentiellement par le biais de l'actionnement électrostatique. Il n'y a pas de variation significative de la résistance de contact en fonction de la tension appliquée (une fois la tension d'effondrement atteinte et au dessus de la tension de décollement). La valeur mesurée, comprise entre 3 et 4 Ω correspond aux lignes d'accès ce qui suppose une résistance de contact inférieure 1 Ω .

Conclusion : L'objectif de l'étude (microrelais électrothermique et verrouillage électrostatique) n'est pas atteint, en effet le contact nécessite un actionnement électrostatique élevé. Cependant les mesures montrent une valeur de résistance de contact faible (inférieure à 1 Ω), on peut en déduire qu'avec une conception mieux appropriée les performances du microrelais peuvent être remarquables.

V. Temps de commutation électrothermique

En l'absence d'un contact électrique utilisable, le temps de commutation a été déduit à partir de la fréquence maximale de fonctionnement. Lors d'un actionnement en dynamique (passage d'un courant de type sinusoïdale au travers de la structure), pour des fréquences élevées l'amplitude de la déflexion se réduit. Ce phénomène provient du fait que la température n'a pas le temps de s'établir entièrement dans le dispositif. L'observation de ce phénomène se produit pour des fréquences proches de 2 kHz, on en déduit un temps de commutation minimum proche de 500 μ s, ce qui est en accord avec l'étude théorique (entre 300 et 500 μ s).

VI. Conclusion

Pour conclure cette partie sur les résultats expérimentaux, on notera principalement un actionnement reproductible mais l'obtention difficile d'un contact électrique.

Concernant le contact électrique, les problèmes proviennent : d'une part des résidus de résine sur les contacts et de l'oxydation des métaux, d'autre part de la déformation (et température) importante consécutive à l'actionnement électrothermique.

En ce qui concerne l'actionneur bilame, les problèmes proviennent de la déformation et la température d'actionnement. En effet la température importante induit une évolution des propriétés des matériaux au cours de l'utilisation, et la déformation génère des problèmes lors du verrouillage électrostatique (tension d'actionnement importante).

Sur le plan de la modélisation analytique, nous obtenons des résultats satisfaisant concernant la modélisation de l'actionnement électrothermique, ce qui nous permet de prédire la consommation, la déflexion et l'aspect du dispositif. Seul bémol, l'actionnement électrostatique est difficilement prédictible du fait de la déformation au moment de l'actionnement. Au vu des premiers résultats, nous pouvons attester de la robustesse du dispositif, et d'un comportement mécanique concordant avec les spécifications en environnement (pas de commutation intempestive malgré la température ambiante et les vibrations). Les spécifications en consommation pour l'actionnement électrothermique ($>100\text{mA}$) sont presque respectées, cependant le verrouillage électrostatique demande une tension nettement plus importante que celle prévue (proche de 100V) et ne s'inscrit plus dans les spécifications.

VII. Références

- [1] A. Bosseboeuf and S. Petitgrand, 2003, "Characterization of the static and dynamic behaviour of M(O)EMS by optical techniques: status and trends", J. Micromech. Microeng. p23–33.
- [2] Z. Zhou, Z. Gao and F. Han, 2003, "The influence of Al content on the Zener relaxation of Fe–Al alloys", J. of Physics, p6109-6115.
- [3] R. W. Chang, I. Etsion, D. B. Bogy, 1988, "Adhesion Model for Metallic Rough Surfaces" ASME Journal of Tribology, p50-56.
- [4] J.A. Greenwood, and J.B.P. Williamson, 1966, "Contact of Nominally Flat Surfaces", Proceedings of the Royal Society of London, p300-319.

Chapitre VI : FIABILITE

Cette partie s'intéresse à l'étude de la fiabilité, plus précisément à l'analyse des modes de défaillance et de leur criticité.

I.	Introduction	174
II.	Méthodologie.....	175
III.	Récapitulatif des causes de défaillance	177
IV.	AMDEC	185
V.	Conclusion	191

I. Introduction

L'application envisagée requiert un haut degré de fiabilité du dispositif, c'est-à-dire un faible nombre de mode de pannes lors de son fonctionnement. Les technologies microsystemes étant récentes, on possède de ce fait une connaissance incomplète de leur fiabilité. En effet, les mécanismes de défaillance des microsystemes sont encore mal identifiés et difficilement prévisibles. Dans le but d'améliorer la conception et la compréhension globale des mécanismes de défaillance du dispositif, ce chapitre est une tentative de transposition au microsysteme d'une technique spécifique de la sûreté de fonctionnement : l'Analyse des Modes de Défaillance et de leur Criticité (AMDEC). L'AMDEC est avant tout une méthode d'analyse de systemes s'appuyant sur un raisonnement inductif (cause-conséquence).

L'AMDEC fut employé pour la première fois à partir des années 60 dans le domaine de l'aéronautique pour l'analyse de la sécurité des avions. Depuis l'utilisation de cette méthode s'est généralisée dans de nombreux domaines. Plus généralement, l'AMDEC permet d'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur les différentes fonctions de ce système, d'identifier les modes de défaillance ayant d'importants effets sur la disponibilité, la fiabilité, ou la sécurité de ce système.

Deux principaux facteurs contribuent à l'apparition des mécanismes de défaillances : le procédé de fabrication et l'exploitation du système qui incluent les spécifications en environnement et en fonctionnement. Ce chapitre traite brièvement de ce dernier aspect et de ses différentes contributions aux mécanismes de défaillances.

II. Méthodologie

Avant de se lancer dans la réalisation proprement dite des AMDEC (Figure VI-1), la priorité est la connaissance du système et son environnement. Ces informations sont généralement le fruit de l'analyse fonctionnelle, de l'analyse des risques et éventuellement du retour d'expérience.

Dans un second temps, il faut évaluer les causes et les effets des modes de défaillance. Il est important de noter que lorsqu'une entité donnée est considérée selon un mode de défaillance donné, toutes les autres entités sont supposées en état de fonctionnement nominal. Les effets de mode de défaillance d'une entité donnée sont étudiées d'abord sur les composants directement interfacés avec celui-ci (effet local) et de proche en proche (effets de zone) vers le système (effet global).

Dans un troisième temps, il convient de classer les effets des modes de défaillance par niveau de criticité, par rapport à certains critères de sûreté de fonctionnement préalablement définis au niveau du système en fonction des objectifs fixés (fiabilité, sécurité, etc.). Les modes de défaillance d'un composant sont regroupés par niveau de criticité de leurs effets et sont par conséquent hiérarchisés. Cette typologie permet d'identifier les composants les plus critiques et de proposer alors les actions et les procédures "juste nécessaires" pour y remédier. Cette activité d'interprétation des résultats et de mise en place de recommandations constitue la dernière étape de l'AMDEC.

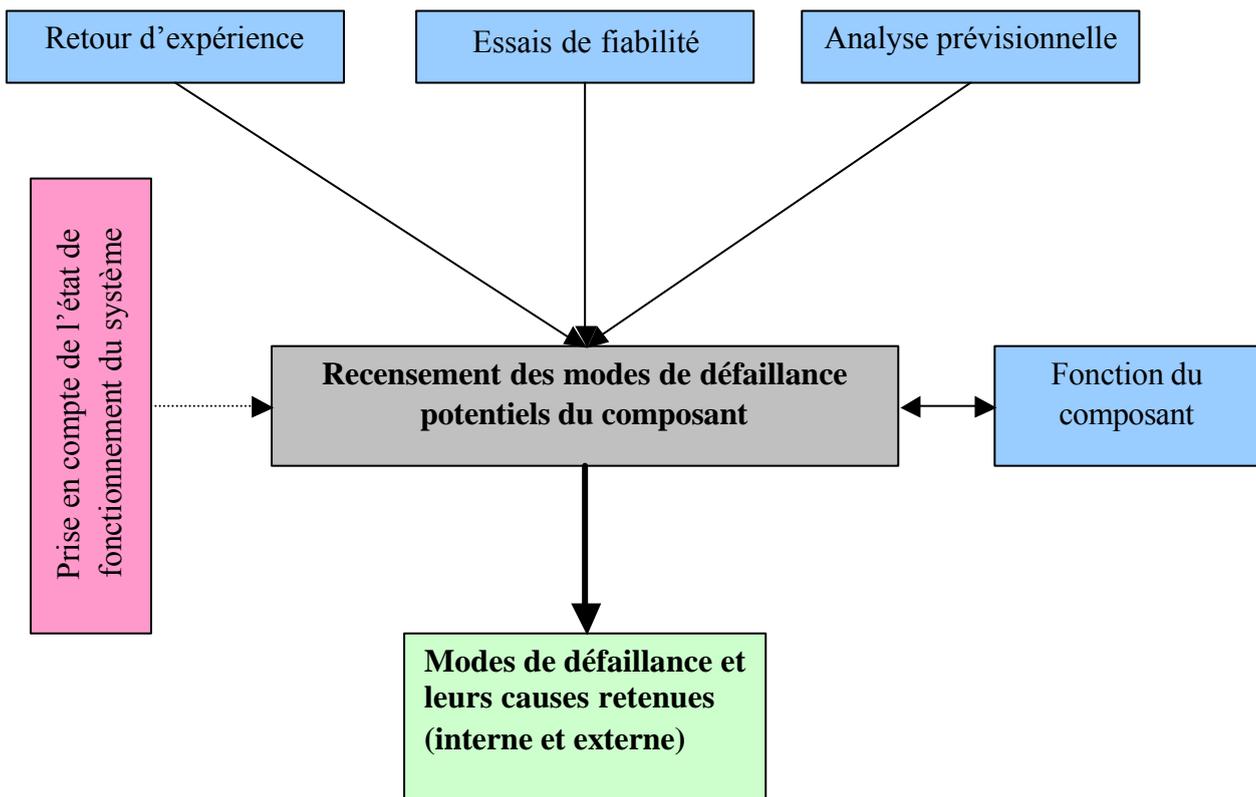


Figure VI-1 : Méthodologie de l'AMDEC

III. Récapitulatif des causes de défaillance

1. Fracture

Du fait de la nature des microsystemes (des structures suspendues ayant plusieurs degrés de liberté), l'une des causes de défaillance intervenant le plus est la fracture mécanique. Elle se définit comme la rupture d'un élément uniforme en deux parties distinctes. La fracture est souvent précédée d'une phase d'apparition de fissures. Cette cause de défaillance provoque généralement l'arrêt du système.

Les mécanismes pouvant amener à la fracture sont les concentrations de contraintes trop importantes, des défauts dans les couches, ou une sollicitation trop importante de la structure. La Figure VI-2 montre une photo MEB d'une fracture affectant une zone où les contraintes sont importantes.

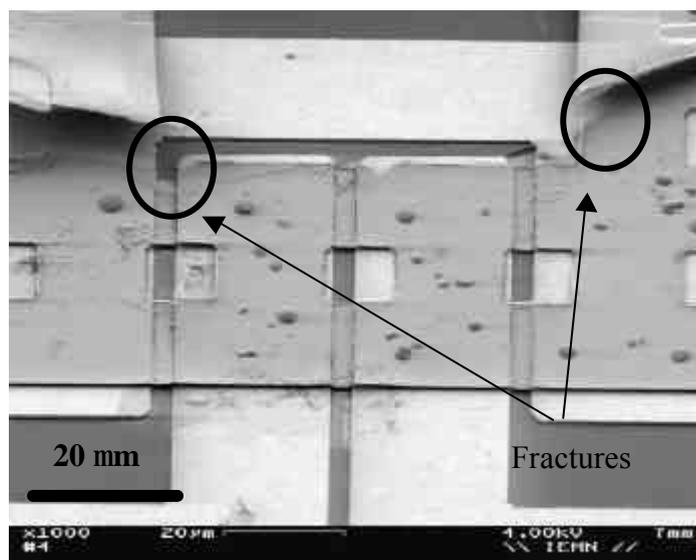


Figure VI-2 : Exemple de fracture

2. Fatigue

La fatigue des mécanismes est provoquée par les efforts mécaniques subis par une structure et qui tendent à diminuer sa résistance à la rupture en fonction du temps. Ce chargement mène à la formation des microfissures qui causent, avec le temps, l'affaiblissement lent du matériau. Celle-ci occasionne également un changement

progressif des propriétés d'un matériau qui peut créer des déformations plastiques (lorsqu'un matériau travail en déformation il reste dans le domaine élastique, mais lorsque le matériau subit à la longue des transformations internes et permanentes il entre dans le domaine plastique) voire des fractures.

3. Décollement et délamination

Le décollement est une situation qui se produit lorsqu'une interface de matériaux relâche son lien adhésif. Il peut être induit par un certain nombre de mécanismes, comme une contrainte excessive suite à la fatigue, ou plus simplement d'un manque d'adhérence entre les matériaux. Les effets du décollement peuvent être catastrophique, car le matériel est encore présent sur le dispositif. En outre, la perte de masse changera les caractéristiques mécaniques d'une structure. La Figure VI-3 montre une photo MEB d'un décollement d'une couche de tungstène (fortement en compression) au dessus d'une couche de polysilicium.

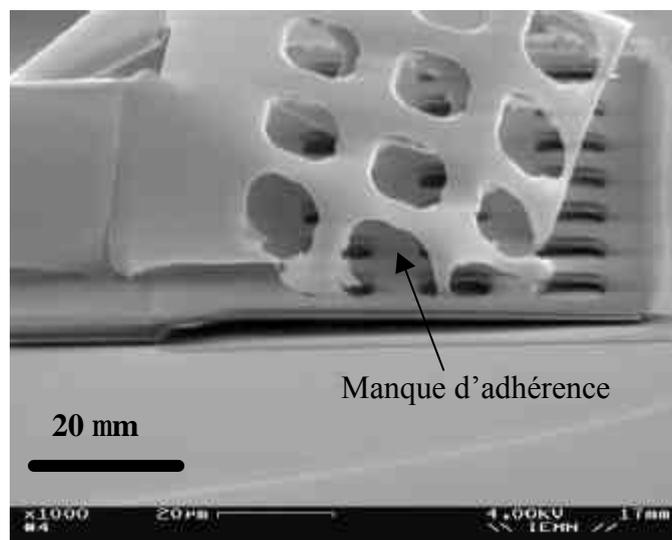


Figure VI-3 : Exemple de décollement

4. Séchage

Lors de l'étape de libération des parties mobiles, la couche sacrificielle est généralement enlevée par une attaque humide. Lors de cette étape et au moment du séchage, il se forme une interface liquide entre les différents niveaux de microstructure. Du fait des

dimensions et de la capillarité les tensions de surface du liquide vont attirer les structures entre elles.

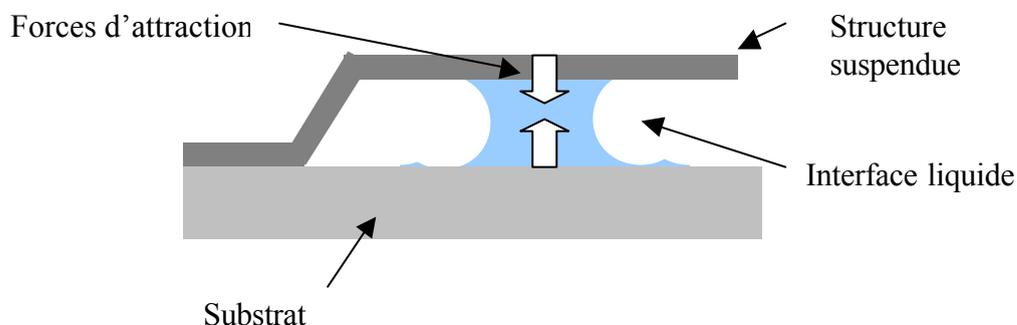


Figure VI-4 : Illustration des phénomènes d'attraction au moment du séchage

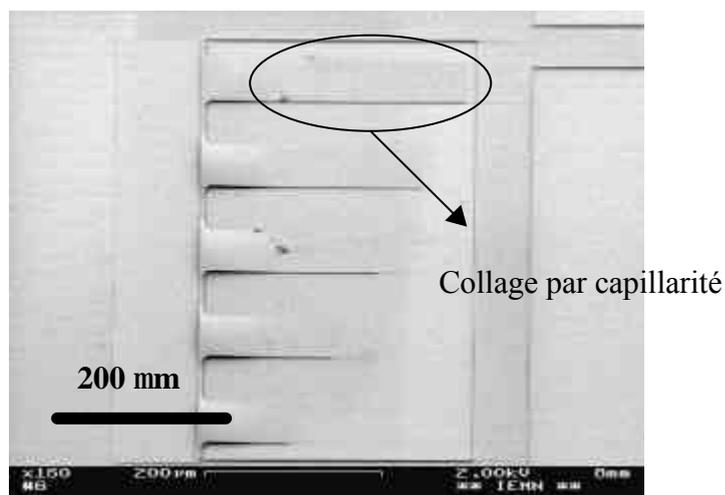


Figure VI-5 : Exemple de stiction sur des poutres encastrées libres

5. Collage par adhésion

Ce phénomène spécifique aux microsystemes intervient lorsque deux surfaces entrent en contact et se collent l'une à l'autre. Les forces entraînant le collage par adhésion sont dues aux liens primaires forts provoqués par :

- Les forces de van der Waals issues de l'attraction des masses interatomiques.
- Les forces électrostatiques entre molécules ionisées.
- La capillarité

La Figure VI-6 illustre la différence entre une structure collée et une structure non collée.

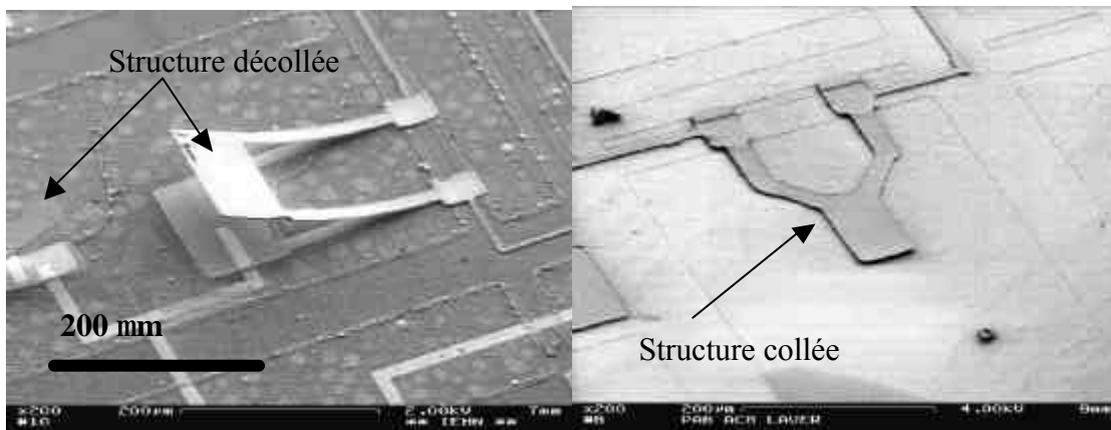


Figure VI-6 : A gauche structure flambée, à droite structure collée

6. Contamination particulaire

Les substances particulaires sont les particules fines, répandues dans l'atmosphère et susceptibles de se déposer sur le wafer. Ces contaminants sont connus pour avoir un effet sérieux sur des dispositifs. En effet, ils peuvent empêcher l'actionnement en provoquant des courts circuits, ou en modifiant le fonctionnement de l'actionneur. Dans des environnements de choc et de vibration la contamination particulaire est encore plus présente car ces environnements sont des facteurs supplémentaires de présence de particules.

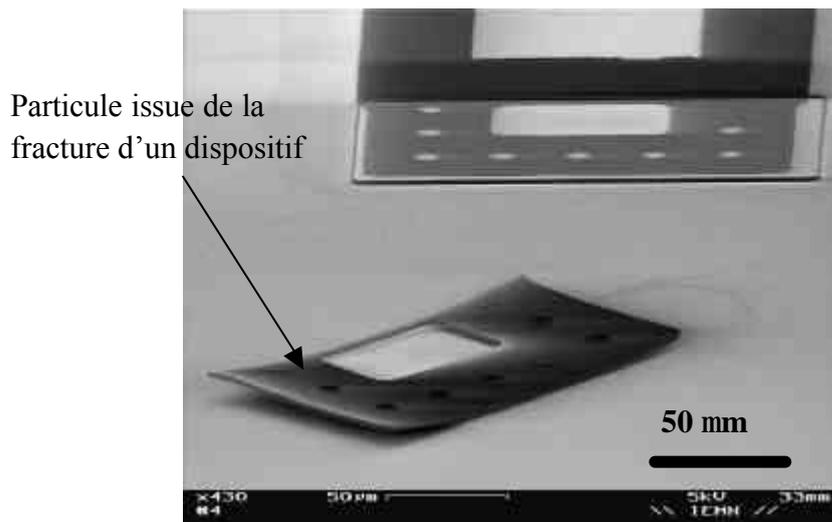


Figure VI-7 : Exemple de présence de particule

7. Surcharge électrique et thermique

Lors de l'actionnement, et du fait que les structures suspendues sont isolées thermiquement, elles subissent des phénomènes tels que l'électromigration ou transformations cristallines à l'intérieur des matériaux la constituant. Ces phénomènes mènent à des déformations permanentes, des fractures ou une fusion.

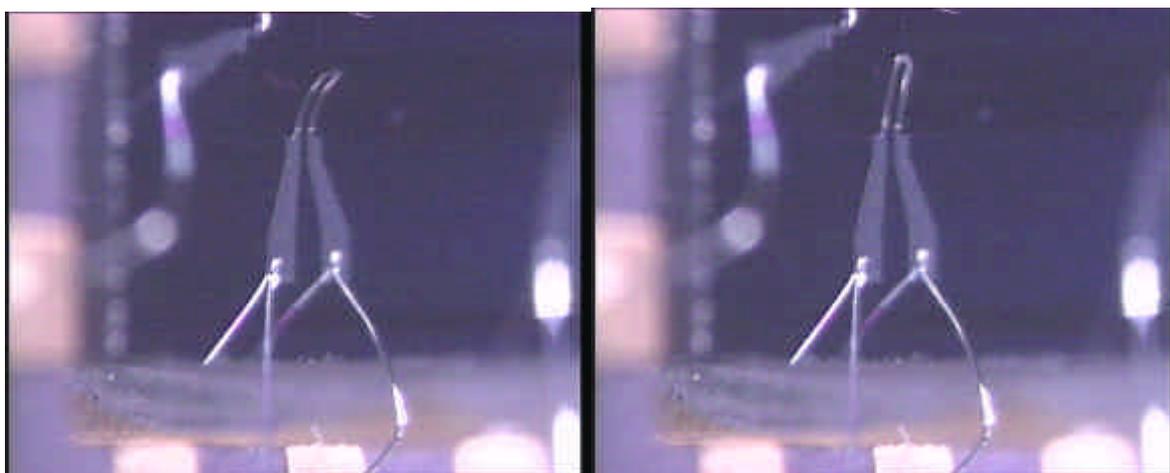


Figure VI-8 : Exemple de déformation permanente dans un actionneur bilame après un actionnement électrothermique

8. Dégradation du diélectrique

Les défaillances liées aux problèmes de charge et de dégradation du diélectrique sont dues principalement aux phénomènes de chargement du diélectrique lors d'un actionnement électrostatique. En effet, le diélectrique se trouvant entre les électrodes se charge électriquement, puis une fois l'actionnement enlevé ces particules électriques restent piégées à la surface ou à l'intérieur du diélectrique. Cette accumulation de charges dans le diélectrique crée un champ électrique parasite qui tend à modifier la valeur de la tension d'actionnement. Enfin, si le diélectrique est trop fin et pour des valeurs de champ élevées, les charges peuvent traverser celui-ci et conduire au claquage du diélectrique.

9. Environnement

Vibrations

En raison de la sensibilité et de la nature fragile des éléments mobiles, les vibrations externes peuvent avoir des implications désastreuses, par exemple en rompant certains éléments structurels des dispositifs. De plus, la vibration à long terme contribue également à la fatigue du système.

Chocs

Le choc diffère de la vibration mais tout comme les vibrations le choc peut mener à la rupture d'un élément structurel. Dans le choc on a un impact mécanique simple au lieu d'un événement périodique. Le choc crée un transfert direct d'énergie mécanique à travers le dispositif.

Humidité

L'humidité est une autre préoccupation pour les microsystemes. La surface des dispositifs, pour des raisons liées à la fabrication, est extrêmement hydrophile. En présence de l'humidité, l'eau se condensera dans de petites fissures pouvant provoquer des mécanismes de défaillances.

Température

Les variations de température interviennent dans le phénomène de fatigue, De plus une température trop importante peut générer des déformations plastiques voir une rupture d'éléments structurels. Les propriétés des matériaux fluctuent, également, avec la température ce qui intervient sur la fatigue des dispositifs.

10. Fabrication

Lithographie

La lithographie est le procédé de transfert des formes géométriques du masque sur une résine photosensible. Après que les motifs ont été définis, une gravure ou un procédé de lift-off est utilisé pour enlever sélectivement certaines parties des couches déposées. Les problèmes proviennent des défauts d'alignement, un mauvais développement ou encore une surexposition de la résine.

Dépôt

Cette étape consiste à déposer un matériau à l'aide de diverses techniques (PECVD, pulvérisation, croissance...). Les principaux défauts des dépôts sont liés à la conformité de dépôt. En effet, si le recouvrement de marche est non uniforme cela peut fragiliser les structures lors de l'actionnement. Inversement lors de lift off une couverture de marche peut générer l'apparition de résidus. Les techniques de dépôt doivent être choisies en fonction de l'utilisation de la couche et du mode de définition des motifs.

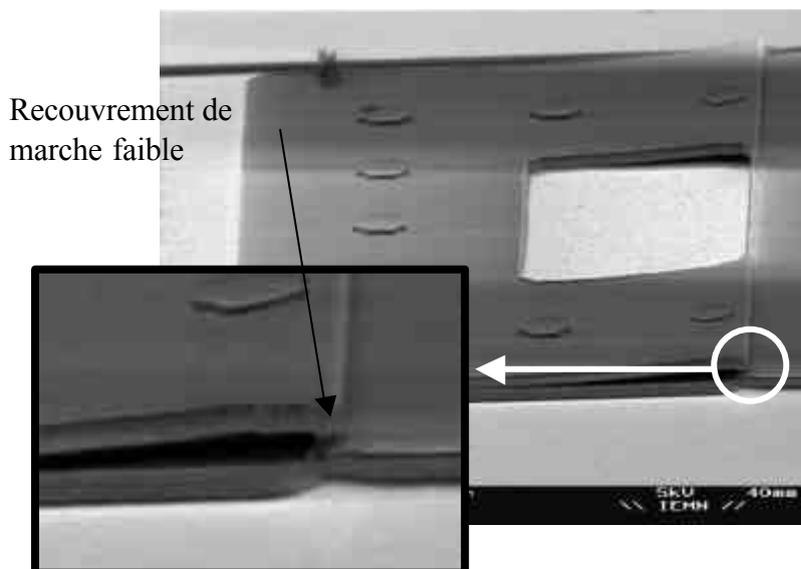


Figure VI-9 : Exemple de problème de recouvrement de marche lors d'un dépôt PECVD d'oxyde de silicium

Gravure

La gravure de couches minces se fait soit par gravure chimique (gravure humide), soit par plasma (gravure sèche). Les principaux problèmes issus de la gravure chimique proviennent de son isotropie. Si ce phénomène n'est pas pris en compte au moment de la conception, les risques sont : une réduction des dimensions des motifs voire leur disparition. Les autres défauts concernent une sur gravure ou une sous gravure de la couche pouvant provoquer par la suite des courts circuits ou circuits ouverts.

IV. AMDEC

1. Analyse fonctionnelle

Le rôle de l'analyse fonctionnelle est de situer la pièce à étudier par rapport aux pièces ou aux systèmes contigus, elle mentionne la manière dont les éléments contigus sont reliés à la pièce étudiée, indique les influences éventuelles, et détermine la limite pour l'analyse du système. Cette méthode, comme toute méthode, nécessite dans un premier temps une définition précise du système à étudier et de ses fonctions. Il est important de bien recenser et caractériser les divers états du système (en attente, en fonctionnement, en test...) car une AMDEC ne peut être réalisée que pour un état donné du système. On n'étudiera, pour le moment, que deux états pour nos dispositifs, l'état ouvert (hors actionnement) et l'état fermé. De plus les mécanismes de défaillance issus de la fabrication et de l'environnement ne sont pas intégrés dans l'étude présentée ci dessous.

a) Etat ouvert

A l'état ouvert le premier mode de défaillance est l'obtention d'un état fermé.

Les fonctions susceptibles d'intervenir dans des mécanismes de défaillance sont au nombre de deux (Figure VI-10) : le cantilever bilame dont le comportement est tributaire de l'environnement (choc, vibration, variation de température), et le contact mobile susceptible d'entrer en contact avec la ligne à commuter. Le rôle du cantilever est de garder le contact mobile (situé sous le cantilever) éloigné de la ligne à commuter.

Le Tableau VI-1 récapitule les différents composants et mécanismes de défaillance du système à l'état ouvert.

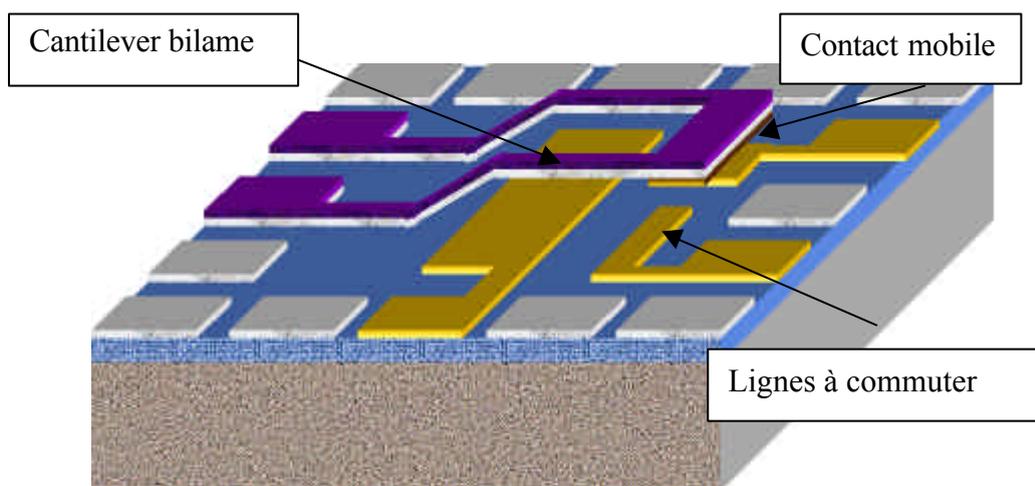


Figure VI-10 : Identification des composants du système à l'état ouvert

Composant	Fonction	Etat normal	Mécanismes de défaillance
Cantilever bilame	Maintenir le contact mobile au dessus de la ligne à commuter	Flambement positif	Fracture, fatigue, collage
Contact mobile	Elément de contact mobile situé sous le cantilever	N'est pas en contact avec la ligne à commuter	Décollement
Lignes à commuter	Transporte le signal à commuter	Circuit ouvert	Contamination particulaire (particule conductrice)

Tableau VI-1 : Identification des modes de défaillance du système à l'état ouvert

b) Etat fermé

A l'état fermé le premier mode de défaillance est l'obtention d'un état ouvert.

Plusieurs fonctions sont susceptibles d'intervenir dans ses mécanismes de défaillance. Tout d'abord, le cantilever bilame dont le comportement est tributaire de l'environnement mais aussi de l'actionnement (électrothermique et électrostatique), le contact mobile et la ligne à commuter devant être en contact, et les éléments d'actionnement que sont les électrodes supérieure et inférieure, l'élément chauffant et l'isolant électrique. On remarquera que l'électrode supérieure et l'élément chauffant ne font qu'un. De plus le cantilever est constitué de cet élément chauffant et de la couche isolante (Figure VI-11).

Le Tableau VI-2 récapitule les différents composants et modes de défaillance du système à l'état fermé.

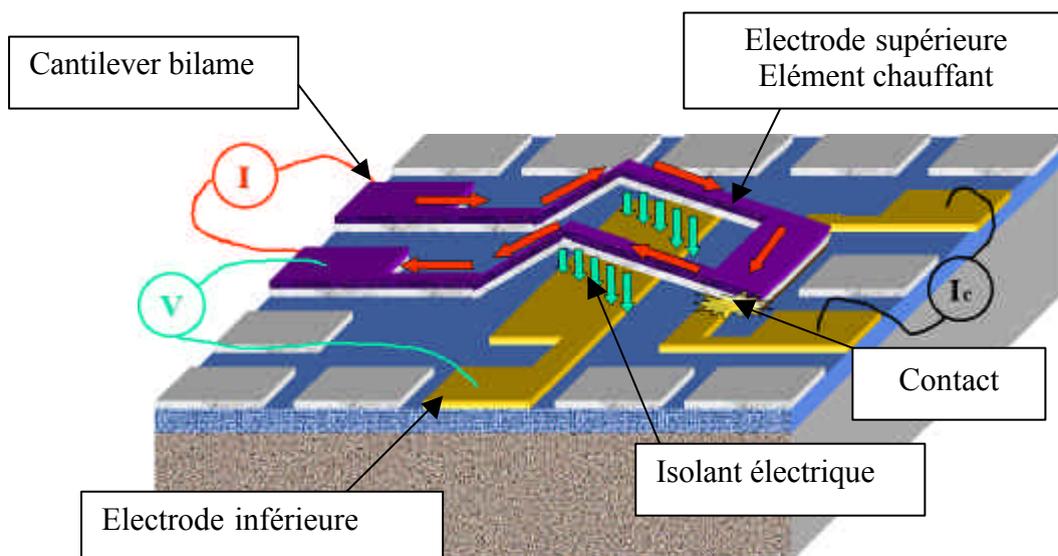


Figure VI-11 : Identification des composants du système à l'état fermé

Composant	Fonction	Etat normal	Mécanismes de défaillance
Cantilever bilame	Maintenir le contact mobile sur la ligne à commuter	Actionné à la fois de manière thermique et électrostatique	Fracture, fatigue
Contact mobile	Elément de contact mobile situé sous le cantilever	En contact avec la ligne à commuter	Décollement, surcharge électrique (fusion)
Electrode inférieure	Electrode nécessaire à l'actionnement électrostatique	Fixé à un certain potentiel	Fracture
Electrode supérieure	Electrode nécessaire à l'actionnement électrostatique	Fixé à un certain potentiel	Fracture
Elément chauffant	Augmentation de la température par effet Joule	Passage d'un courant	Fracture, surcharge électrique (fusion)
Isolant électrique	Isole les électrodes d'actionnement électrostatique	Présence	Chargement, claquage
Lignes à commuter	Transporte le signal à commuter	Fermé par le contact mobile	Fracture, contamination particulaire

Tableau VI-2 : Identification des modes de défaillance du système à l'état fermé

2. Evaluation des causes et effets des modes de défaillance

a) Etat ouvert

Composant	Mode de défaillance	Effet local	Effet de zone	Effet global
Cantilever bilame	Fracture	Destruction partielle ou complète du cantilever	Présence de particules	Fermeture intempestive
			Changement de la déflexion initiale	Fermeture intempestive
	Fatigue	Changement des caractéristiques des matériaux	Changement de la déflexion initiale	Fermeture intempestive
	Collage	Partie suspendue du cantilever sur le substrat	Contact mobile sur la ligne à commuter	Relais fermé
Contact mobile	Décollement	Contact mobile sur le substrat	Présence de particules	Fermeture intempestive
Lignes à commuter	Contamination particulaire	Court circuit	Circuit fermé	Relais fermé

Tableau VI-3 : Evaluation des causes et effets des modes de défaillance du système à l'état ouvert

b) Etat fermé

Composant	Mode de défaillance	Effet local	Effet de zone	Effet global
Cantilever bilame	Fracture	Destruction partielle ou complète du cantilever	Présence de particules	Ouverture intempestive
			Changement de la déflexion initiale (donc force de contact)	Ouverture intempestive
	Fatigue	Changement des caractéristiques des matériaux	Changement de la déflexion initiale (donc force de contact)	Ouverture intempestive
Contact mobile	Décollement	Contact mobile sur le substrat	Présence de particules	Fermeture intempestive
Electrode inférieure	Fracture	Circuit ouvert	Pas d'actionnement électrostatique	Relais ouvert
Electrode supérieure	Fracture	Circuit ouvert	Pas d'actionnement électrostatique	Relais ouvert
Elément chauffant	Fracture	Circuit ouvert	Pas d'actionnement électrothermique	Relais ouvert
Lignes à commuter	Fracture	Circuit ouvert	Circuit ouvert	Relais ouvert
	Contamination particulaire	Court circuit	Circuit fermé	Relais fermé
Isolant électrique	Chargement	Champ électrique parasite	Changement de la tension d'actionnement	Ouverture intempestive
	Claquage	Court circuit entre les électrodes	Fusion de l'électrode supérieure	Destruction du dispositif

Tableau VI-4 : Evaluation des causes et effets des modes de défaillance du système à l'état fermé

3. Classification des modes de défaillance

Mode de défaillance	Criticité	Probabilité
Fracture	Forte	Faible
Fatigue	Moyenne	Forte
Collage	Forte	Faible
Décollement	Forte	Moyenne
Changement de la déflexion initiale	Moyenne	Forte
Contamination particulaire	Forte	Faible
Chargement du diélectrique	Forte	Forte
Claquage du diélectrique	Forte	Moyenne

Tableau VI-5 : Evaluation de la criticité et de la probabilité

V. Conclusion

Nous avons essayé de présenter dans ce chapitre une liste des défauts constatés lors de la fabrication, et des tests. Cette liste est loin d'être exhaustive, elle constitue simplement la première phase d'une démarche plus complexe de qualification du microrelais. Cette étude nous a déjà permis de visualiser les points les plus critiques afin de modifier certains dessins, et étapes de fabrication. On peut citer comme exemple l'élimination des angles et relief afin de diminuer les risques de fracture dus aux concentrations de contraintes. Le second avantage de cette étude se trouve dans un repérage rapide des causes de défaillance par l'analyse des dispositifs en sortie de test.

Une étude plus poussée et intégrant les mécanismes de défaillance issues de la fabrication et de l'environnement se trouve en annexe.

Chapitre VII : PERSPECTIVES ET CONCLUSION GENERALE

Cette partie présente un résumé du manuscrit, mais aussi différentes perspectives et suites à donner à cette étude.

I.	Introduction	194
II.	Perspectives	195
III.	Conclusion générale.....	204

I. Introduction

La première partie de ce chapitre traite des perspectives d'évolution des microrelais développés dans le cadre de cette étude. Nous décrivons également les applications potentielles des microrelais et du procédé de fabrication employé. Notamment dans le domaine des Radio fréquences (RF).

La seconde partie de ce chapitre présente les conclusions de notre travail de thèse. Nous évoquerons les principaux points abordés dans ce manuscrit ainsi que les problèmes et défis actuels qui devront être surmontés pour l'adaptation de ce type de dispositif sur un DSMF

II. Perspectives

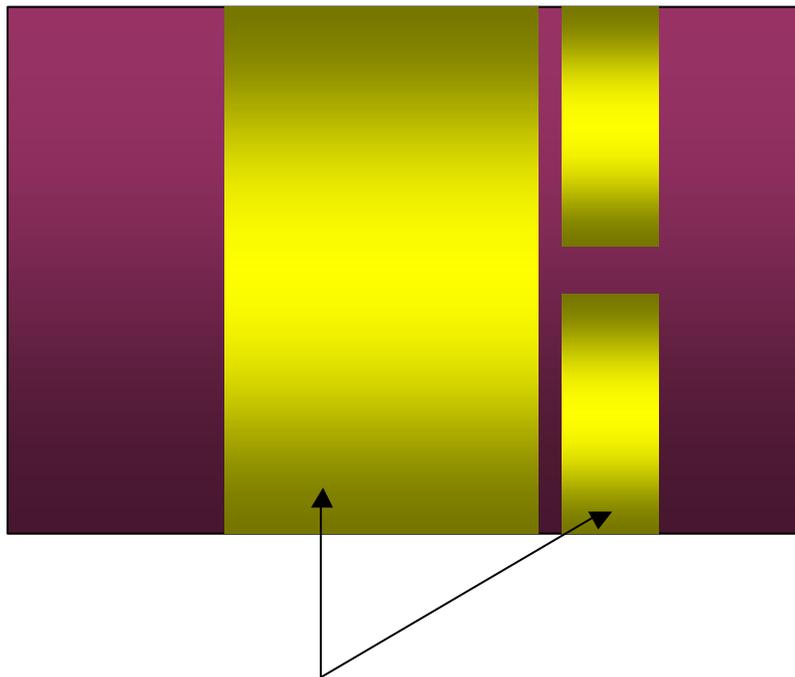
1. Optimisation

A l'issue de la fabrication et de la caractérisation des dispositifs certains problèmes sont apparus (déformation importante, température et tension d'actionnement élevée, résistivité importante des lignes), pour les résoudre certaines solutions s'imposent, comme l'optimisation des dépôts pour permettre l'obtention de contraintes intrinsèques et de résistivités plus faibles.

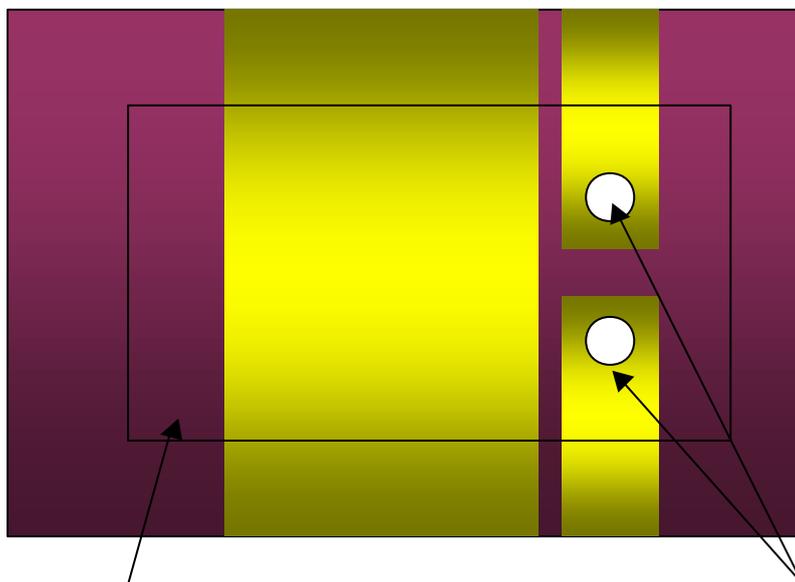
En outre, certaines modifications de conception sont envisageables pour améliorer les performances du dispositif :

- L'ajout, indépendamment de la couche supérieure du bilame, d'un élément chauffant pour permettre une répartition plus uniforme de la température. Ceci permet de réduire à la fois la déformation du dispositif et la température d'actionnement.
- La création d'un bushing au niveau du contacteur. Cette proéminence permet d'augmenter la pression exercée dans un contact.
- L'isolation thermique du contacteur de la partie « chaude » du dispositif, par l'emploi d'un isolant thermique (oxyde de silicium).
- L'épaississement du contacteur et des lignes en utilisant les différentes couches métalliques. Ceci permet de diminuer, notamment, la résistance des lignes d'accès.
- La réduction de la raideur du dispositif au niveau du contacteur. Cette réduction facilite l'écrasement du contacteur sur les lignes à commuter.

En tenant compte de ces remarques une nouvelle fabrication est envisageable. Celle-ci utilisera 7 niveaux de masque. La suite de ce paragraphe décrit les principales étapes de cette perspective.

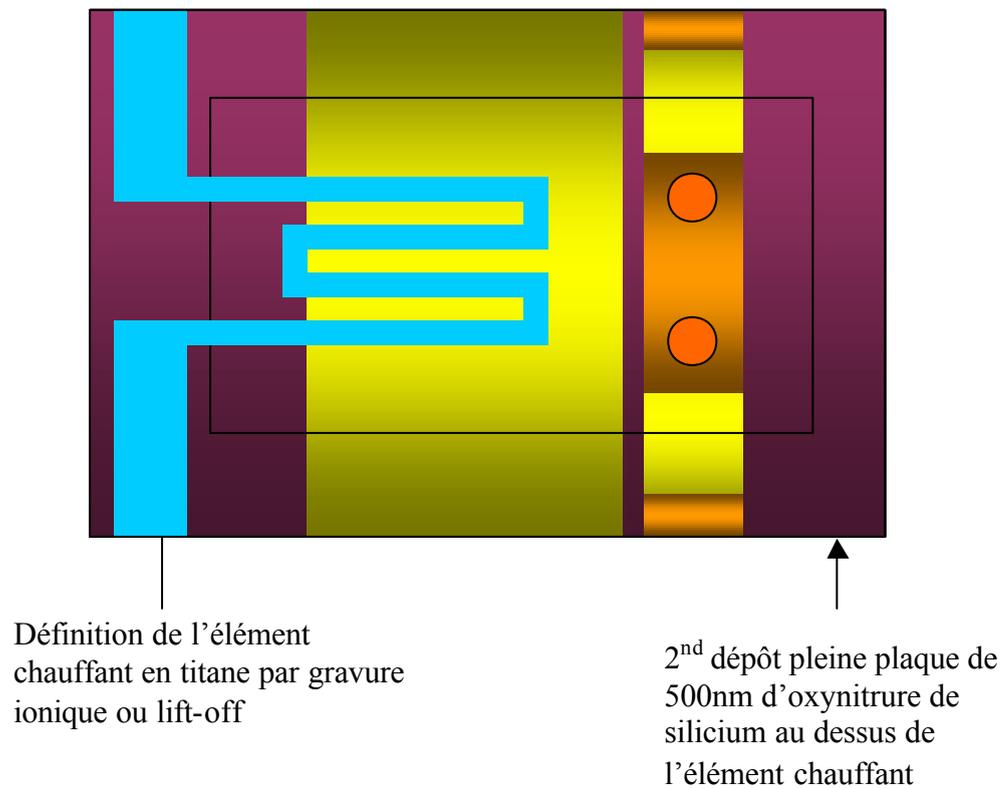
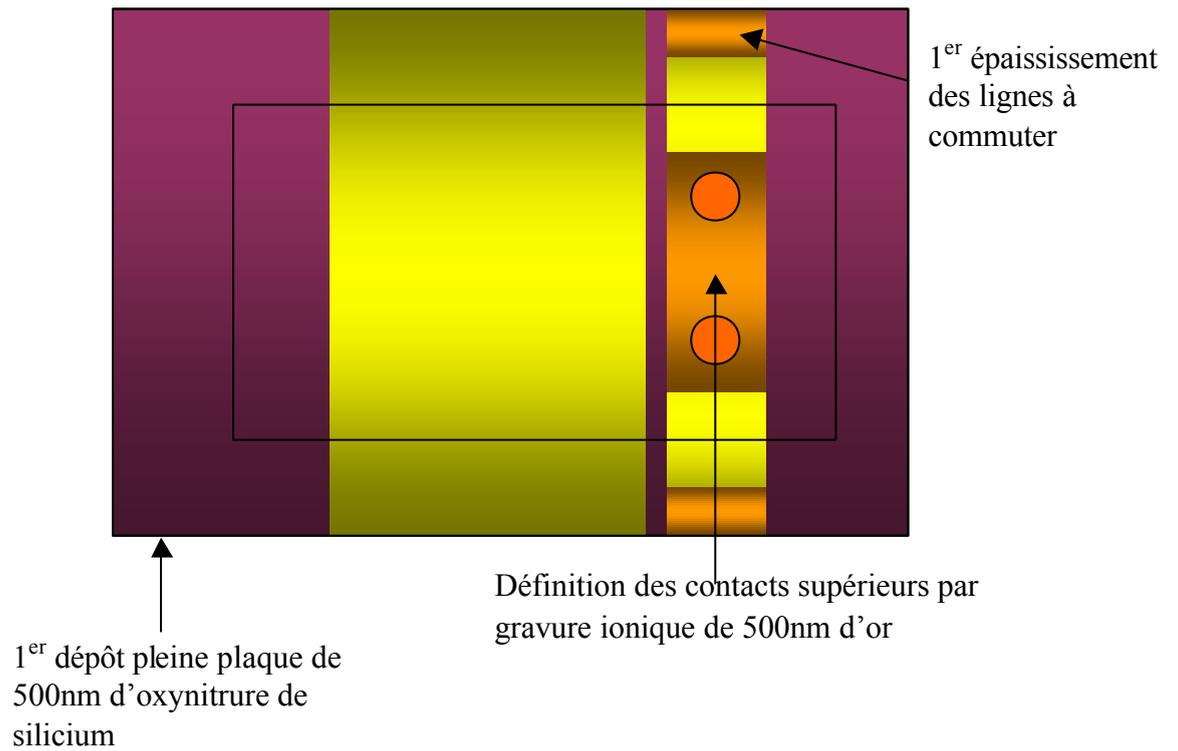


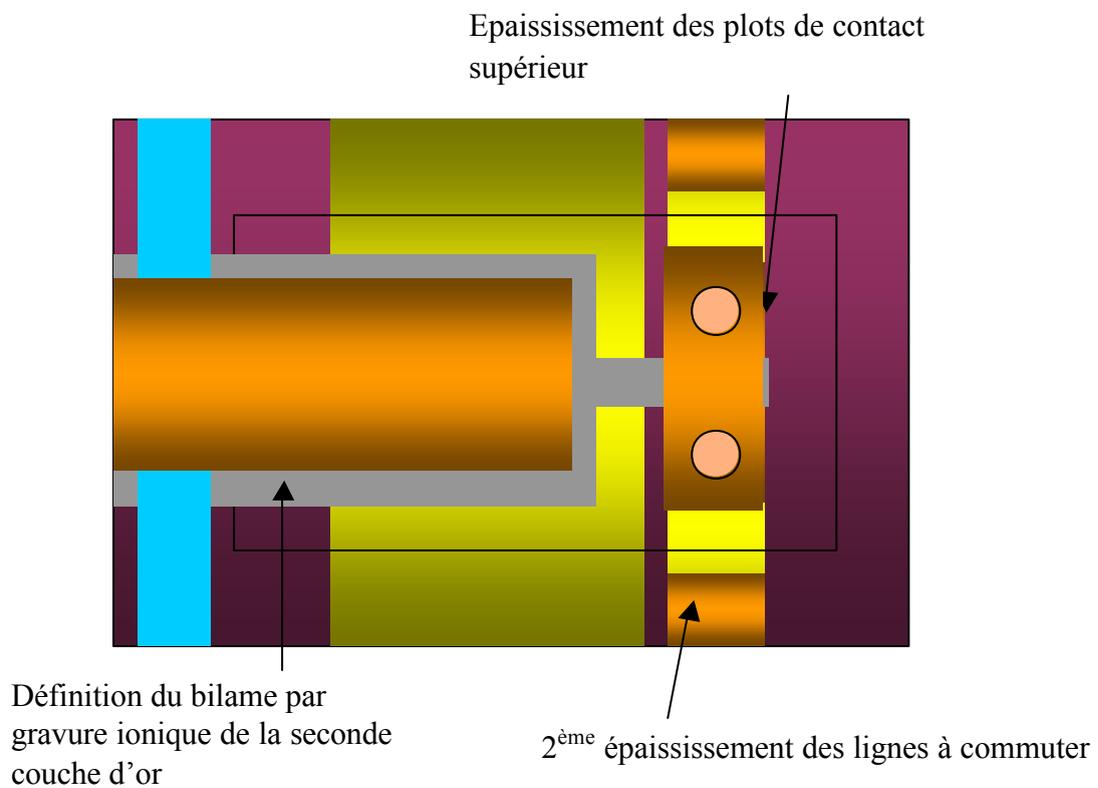
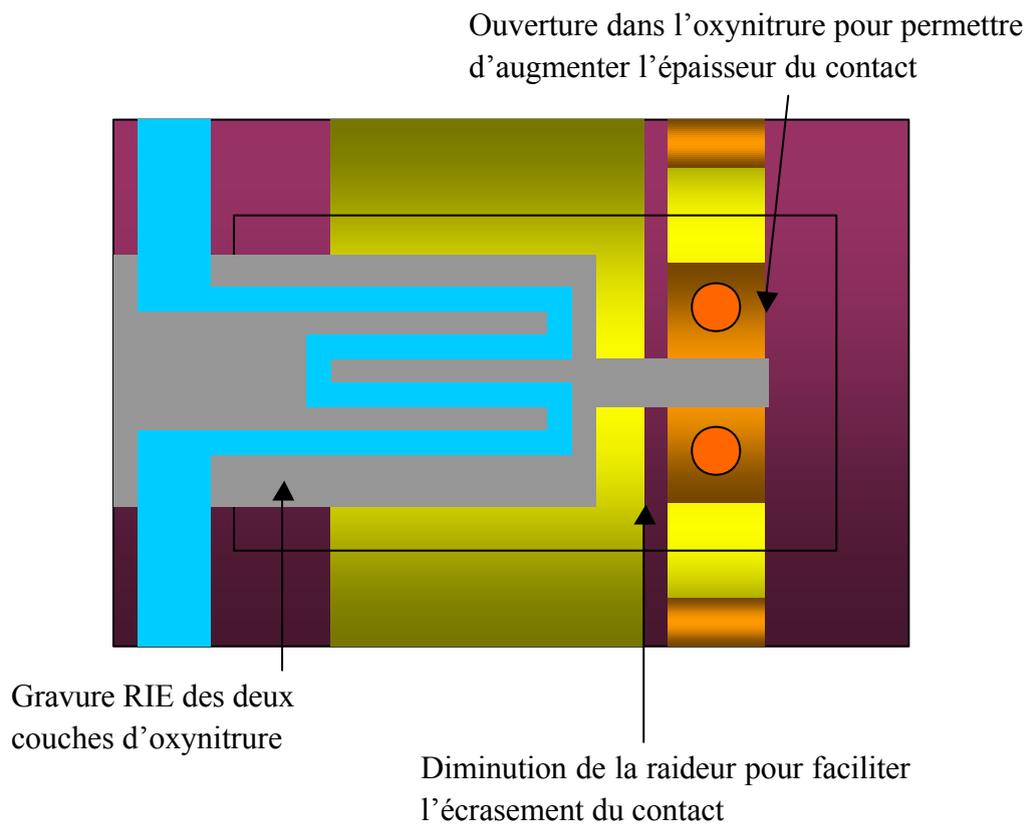
Définition de la ligne à commuter et de l'électrode d'actionnement par lift off



Définition de la couche sacrificielle en PMGI SF11

Définition des bossages dans la PMGI par gravure RIE





Bilame or/oxynitride (modification des paramètres de dépôt pour obtenir de l'or moins contraint et moins résistif)

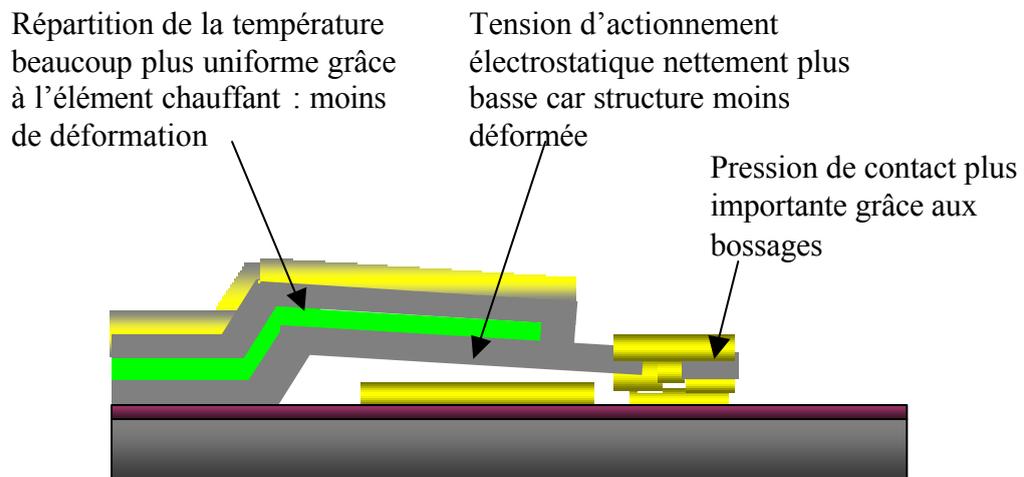
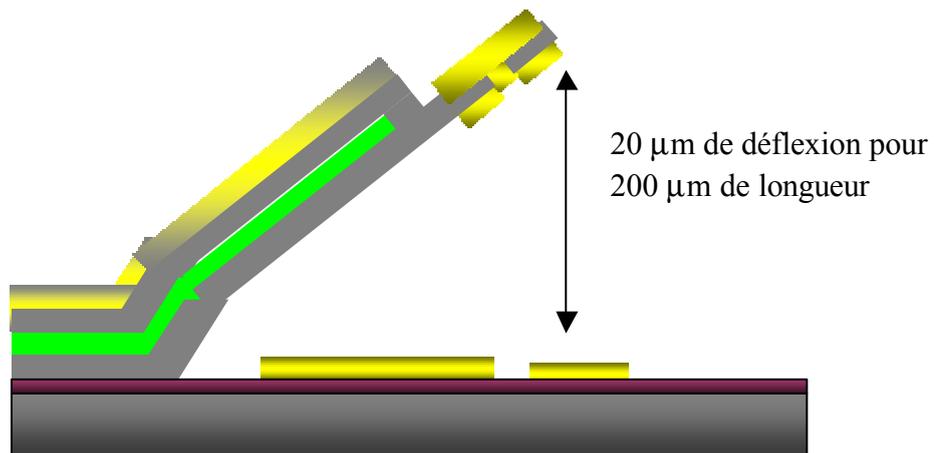
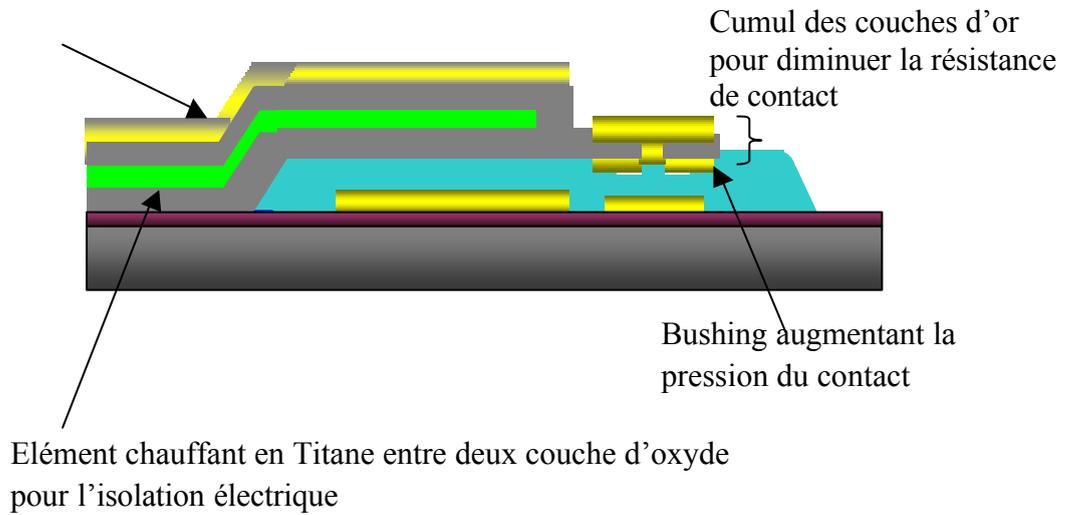


Figure VII-1 : Perspective de design

La réponse mécanique de cette nouvelle conception a été vérifiée par simulations numériques avec le logiciel Coventorware® (Figure VII-2). Les résultats sont en accord avec les hypothèses émises (écrasement du contact).

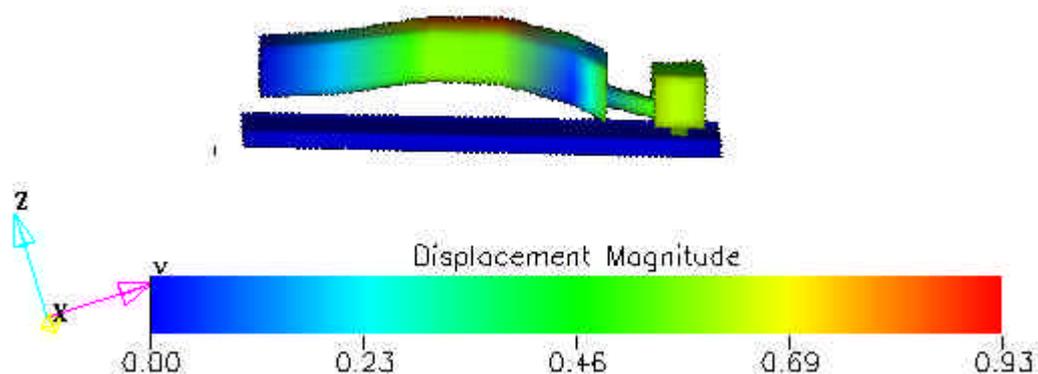


Figure VII-2 : Simulation numérique de la perspective de design

2. Autres considérations

La réalisation d'un microcommutateur n'est pas une finalité. De nombreuses autres considérations entrent en jeu avant de pouvoir l'intégrer dans un DSMF (Dispositif de sécurité et de mise à feu).

Tout d'abord, il est nécessaire d'envisager un moyen de régulation de la puissance d'actionnement (thermique) en fonction de la température ambiante. En effet, cet aspect constitue un point important du bon fonctionnement des commutateurs car à température donnée la puissance nécessaire à la commutation peut varier du simple au double. Il est possible de réguler la puissance d'entrée par l'utilisation de capteurs de température, mais cette approche a ses limitations et complique lourdement l'architecture. L'idée la plus simple est d'employer la même architecture de dispositif en tant qu'élément « passif » d'actionnement. C'est-à-dire utiliser une série d'interrupteurs thermique commutant le courant vers une résistance pour des températures ambiantes différentes (Figure VII-3). Cette commutation régulant la valeur du courant d'actionnement du dispositif sécuritaire.

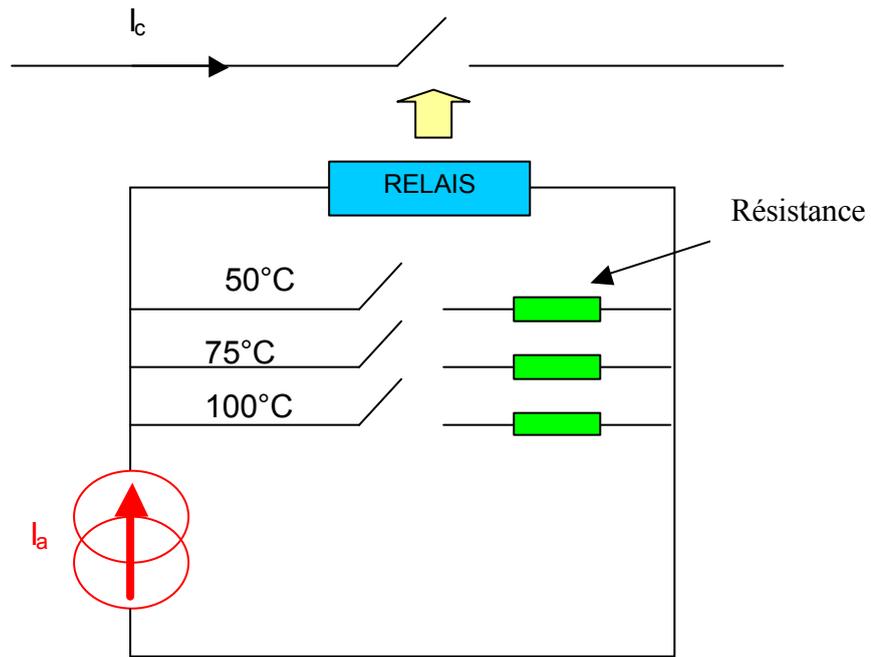


Figure VII-3 : Modification du courant d'actionnement en fonction de la température externe.

De plus, il serait intéressant de prévoir une architecture réellement sécuritaire en jouant sur la redondance des dispositifs (Figure VII-4 et Figure VII-5) et d'intégrer une électronique de commande sur un même substrat.

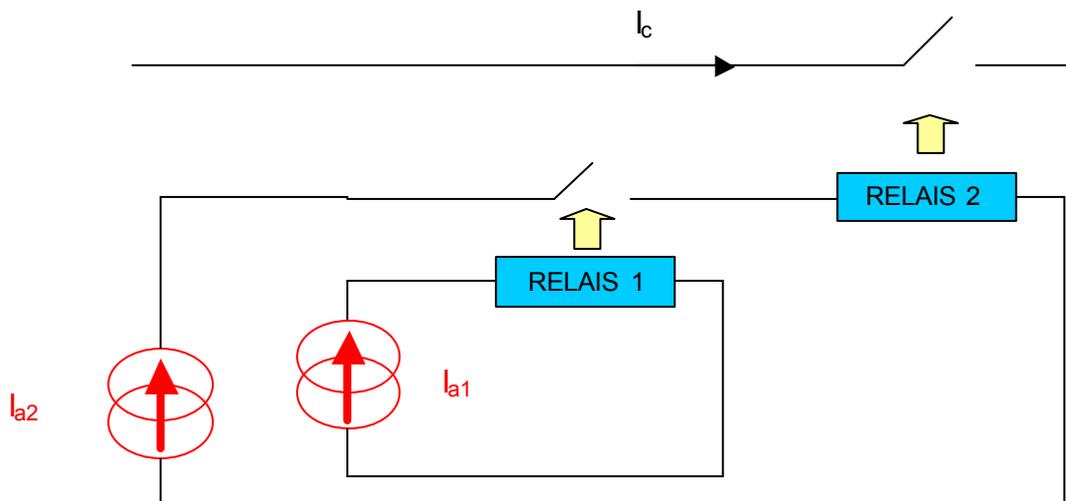


Figure VII-4 : Utilisation d'une redondance pour l'actionnement d'un relais

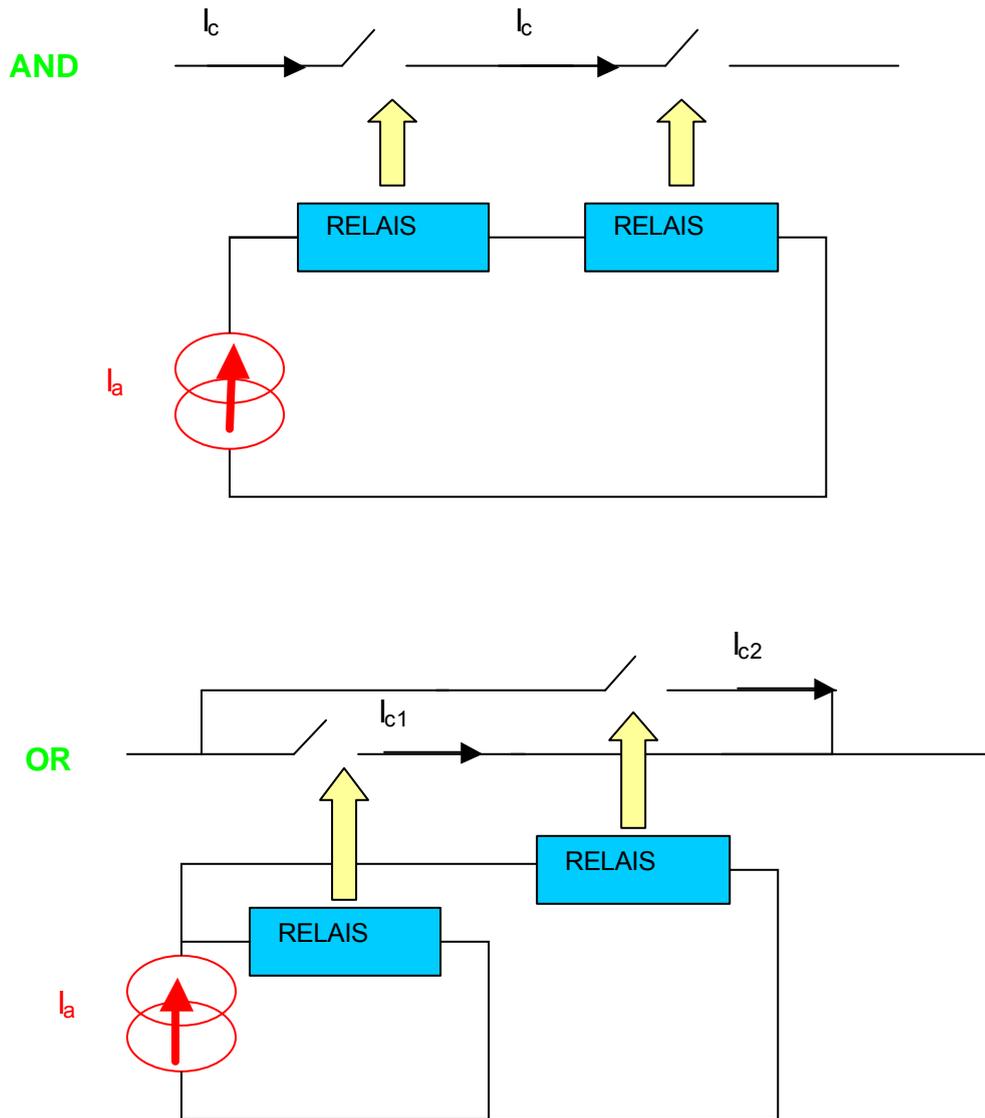


Figure VII-5 : Utilisation de portes logiques « AND » et « OR »

3. Applications envisageables

Les applications potentielles du procédé de fabrication mis en place ne se limite pas à la commutation de signaux DC, en effet rien n'empêche avec les lignes adaptés de prévoir la commutation par contact ohmique de signaux RF (fréquence radio). Les intérêts sont : une excellente isolation à l'état initial et une bonne insertion, à priori, grâce au verrouillage électrostatique. Ce type de dispositif profitera d'un double actionnement thermique et électrostatique, ce qui permet d'avoir une faible tension d'actionnement. Le principal point faible étant son temps de commutation et sa consommation pour l'actionnement électrothermique.

III. Conclusion générale

L'objectif premier de cette étude était la réalisation d'un microrelais de conception « simple » et devant fonctionner un environnement hostile. Ce dispositif, actionné à la fois de manière électrothermique et électrostatique, a nécessité de nombreuses modifications de conception. L'élaboration du procédé de fabrication et les propriétés des matériaux employés (contraintes et résistivités) sont à l'origine de ces modifications. Le dispositif finalement fabriqué est un microrelais formé d'un bilame aluminium et oxynitride de silicium venant commuter un signal par un contact or-or.

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes focalisés sur quatre objectifs principaux :

- La validation du fonctionnement des dispositifs par des simulations analytiques. Les diverses phases d'actionnement du système (déflexion, chauffage...) sont représentées par des équations analytiques dans différents modules et simulées au moyen de MATLAB. Un modèle complet du système est ensuite obtenu en reliant les différentes équations entre-elles. Cette approche tire profit d'une conception simple (géométrie élémentaire). Pour conclure sur ce point, on peut considérer que le modèle employé pour l'actionnement électrothermique a été validé par la rétrosimulation, néanmoins les déformations constatées sont plus importantes en pratique.
- Le second point a été l'élaboration d'un procédé de fabrication dont le but est une bonne fiabilité des dispositifs. Cet objectif a été atteint avec un rendement supérieur à 90% à l'issue de la fabrication, ainsi qu'une bonne répétitivité des mesures.
- Le troisième objectif concernait le fonctionnement du dispositif dans les spécifications fournies. Ce point nécessite encore quelques investigations, cependant au vu des premiers résultats, nous pouvons attester de la robustesse du dispositif et d'un comportement mécanique concordant avec les spécifications en environnement (pas de commutation intempestive malgré la température ambiante et les vibrations). Les spécifications en consommation pour l'actionnement électrothermique ne sont cependant pas tenues (75 au lieu de 100mA). De plus, le verrouillage électrostatique demande une tension d'actionnement nettement plus importante que celle prévu (proche de 100V) et n'entre plus également dans les spécifications. De plus la

caractérisation du contact n'est pas encore complète car elle est rendue difficile par la température élevée ($>250^{\circ}\text{C}$) et la déformation importante du dispositif.

- Le dernier objectif était une meilleure compréhension des mécanismes de défaillances pouvant intervenir dans un microrelais en technologie microsysteme. Cet aspect a été abordé dans une approche fonctionnelle, et nécessite d'être complété.

ANNEXES

I.	Description détaillée du procédé de fabrication	207
II.	Programme MATLAB	213
III.	Liste de publications	230

IV. Description détaillée du procédé de fabrication

Le procédé détaillé dans cette section correspond au procédé présenté dans ce manuscrit. Quand certaines étapes ont été réalisées de différentes façons, elles sont détaillées par la suite. Ces étapes sont indiquées dans le tableau ci-après, selon le schéma suivant:

N° d'étape	Intitulé But Matériel utilisé Paramètres Données de monitoring <i>Remarques</i>
---------------	---

1	Nettoyage du substrat Eviter toute contamination et génération de défauts lors de l'étape suivante Sorbonne de chimie - Béchers en pyrex – Substrat <100> de résistivité 5-10 Ω .cm Solutions d'acide fluorhydrique tamponnée type BE7:1 Trempage de 1 min. + Rinçage Eau dés-ionisée (EDI) + Rinçage dans bain d'eau azoté 5min. + Séchage par centrifugation
2	Dépôt de nitrure de silicium Isolation entre le niveau 1 des interconnexions et le substrat Four de dépôt LPCVD Tempress Amtech 4'' Gaz : SiC ₂ H ₂ / 20 sccm – NH ₃ / 10 sccm Température : 800°C Pression : 100mT Temps = 2h Epaisseur = 350nm
3	Lithographie optique n°1 Masque 1, Electrode inférieure et interconnexion Enduction Primer HMDS, Vitesse 2500tr./min ; Accélération 2500tr./min ² ; Temps 12sec. Enduction Résine S1818

	<p>Tournette TP6000 avec Capot, , Vitesse 2500tr./min ; Accélération 2500tr./min² ; Temps 12sec. Epaisseur 1.6 μm</p> <p>1^{er} recuit 110°C pdt. 1min.</p> <p>Pré-traitement MIF326 1 mn</p> <p>Aligneur KarlSuss MA750, exposition pdt. 4sec. Puissance 13.5mW/cm²</p> <p>Plaquage à 400g</p> <p>2^{ème} recuit 110°C pdt. 1 min</p> <p>Révélation dans AZ400 diluée (1:3) pdt. 1 mn..</p> 
4	<p>Métallisation Ti/Au</p> <p>Bâti d'évaporation MECA2000 (Custom)</p> <p>Nettoyage du substrat plasma Ar 1min.30sec. 150eV</p> <p>Evaporation Pression 10⁻⁸ Torr</p> <p>Epaisseur = Ti :25nm ; Au :500nm</p> <p>Métallisation Cr</p> <p>Bâti de pulvérisation Alcatel</p> <p>Pulvérisation Pression 10⁻² Torr ; Puissance 250W</p> <p>Temps = 2 min 30 sec. Epaisseur = Cr :25nm</p>
5	<p>Lift-off</p> <p>Bain à ultrasons</p> <p>Bain d'acétone avec Ultrasons (Pw =40) pendant 30min. puis rinçage à la pipette d'acétone, puis rinçage à la pipette d'alcool, puis rinçage à l'EDI et séchage.</p>
6	<p>Enduction couche sacrificielle</p> <p>Couche sacrificielle</p> <p><u>Deux</u> enductions résine PMGI SF11</p> <p>Tournette TP1100 sans Capot, Vitesse 4000tr./min ; Accélération</p>

	1000tr./min ² ; Temps 30 sec. Epaisseur 2 µm Recuit 250°C pdt. 2min.
7	Enduction de résine épaisse 1 ^{ère} étape de planarisation Enductions résine AZ4562 Temps de repos 3 min capot fermé Tournette TP6000 avec Capot, Vitesse 4000tr./min ; Accélération 3000tr./min ² ; Temps 40 sec. Epaisseur 4 µm Temps de repos 10 min capot ouvert Recuit 100°C pdt. 50sec Tournette TP1100 sans Capot
8	Gravure RIE 2 ^{ème} étape de planarisation Oxford PlasmaLab 80 Plus Gaz : O ₂ /40 sccm Puissance 300W Pression 300mT. Accort Impédance automatique. Tension d'autopolarisation = 579V Temps 8 min 30 sec Vitesse 500nm/min
9	Lithographie optique n°2 Masque 2, Couche sacrificielle Enduction Résine AZ1512 Tournette TP6000 avec Capot, Vitesse 3000tr./min ; Accélération 4000tr./min ² ; Temps 7sec. Epaisseur 1.2 µm Recuit 110°C pdt. 2min. Aligneur KarlSuss MA750, Exposition pdt. 4sec. Puissance 13.5mW/cm ² Plaquage à 400g Révélation dans MIF726 pdt. 20 sec. DUV, Exposition pdt. 6 min Révélation dans MIF726 pdt. 25 sec. Recuit 250°C pdt. 5min.
10	Lithographie optique n°3 Masque 3, Bushing Enduction Résine AZ1512 Tournette TP6000 avec Capot, Vitesse 3000tr./min ; Accélération

	<p>4000tr./min² ; Temps 7sec. Epaisseur 1.2 μm</p> <p>Recuit 110°C pdt. 2min.</p> <p>Aligneur KarlSuss MA750, Exposition pdt. 4sec. Puissance 13.5mW/cm²</p> <p>Plaquage à 400g</p> <p>Révélation dans MIF726 pdt. 20 sec.</p>
11	<p>Gravure RIE</p> <p>Définition du bushing</p> <p>Oxford PlasmaLab 80 Plus</p> <p>Gaz : O₂/40 sccm Puissance 300W Pression 300mT. Accort Impédance automatique.</p> <p>Tension d'autopolarisation = 579V</p> <p>Temps 30 sec Vitesse 500nm/min</p>
12	<p>Métallisation Cr</p> <p>Bâti de pulvérisation Alcatel</p> <p>Pulvérisation Pression 10⁻² Torr ; Puissance 250W</p> <p>Temps = 2 min 30 sec. Epaisseur = Cr :25nm.</p> <p>Métallisation Au/Ti</p> <p>Bâti d'évaporation MECA2000 (Custom)</p> <p>Nettoyage du substrat plasma Ar 1min.30sec. 150eV</p> <p>Evaporation Pression 10⁻⁸ Torr</p> <p>Epaisseur = Au :250nm; Ti :500nm ;</p>
13	<p>Lithographie optique n°4</p> <p>Masque 3, Contact supérieur</p> <p>Tournette TP6000 avec Capot. Aligneur KarlSuss MA750</p> <p>Enduction Résine S1818, Vitesse 2500tr./min ; Accélération 2500tr./min² ;</p> <p>Temps 12sec.</p> <p>1^{er} recuit 110°C pdt. 1min.</p> <p>Exposition pdt. 4sec. Puissance 13.5mW/cm² Plaquage à 400g</p> <p>2^{ème} recuit 120°C pdt. 1 min</p> <p>Révélation dans MF319 pdt. 20 sec.</p> <p>Epaisseur 1.6 μm</p>
14	<p>Gravure ionique</p> <p>Temps = 19 min 45sec. Vitesse = Au : 41nm/min ; Ti : 5,8nm/min ; Cr :</p>

	10,5nm/min.
15	<p>Dépôt d'oxynitruure PECVD</p> <p>1^{ère} couche du bilame</p> <p>Bati de dépôt PECVD OXFORD Plasmalab 80plus</p> <p>Gaz : SiH₄ (3% dans N₂) / 600 sccm – N₂O / 30 sccm – NH₃ / 20 sccm</p> <p>Température : 200°C Pression 1T Puissance 200W</p> <p>Epaisseur = 1µm .</p>
16	<p>Lithographie optique n°5</p> <p>Masque 4, Bilame</p> <p>Enduction Primer HMDS, Vitesse 2500tr./min ; Accélération 2500tr./min² ; Temps 12sec.</p> <p>Enduction Résine S1818</p> <p>Tournette TP6000 avec Capot, Vitesse 2500tr./min ; Accélération 2500tr./min² ; Temps 12sec. Epaisseur 1.6 µm</p> <p>1^{er} recuit 110°C pdt. 1min.</p> <p>Pré-traitement MIF326 1 mn</p> <p>Aligneur KarlSuss MA750, exposition pdt. 4sec. Puissance 13.5mW/cm²</p> <p>Plaquage à 400g</p> <p>2^{ème} recuit 110°C pdt. 1 min</p> <p>Révélation dans AZ400 diluée (1:3) pdt. 1 mn..</p>
17	<p>Métallisation Al</p> <p>Bâti de pulvérisation Plassys</p> <p>Pulvérisation Pression 10sccm ; Puissance 100W</p> <p>Temps = 22 min 30 sec. Epaisseur = 500nm, Vitesse=22,4 nm/min</p>
18	<p>Lift-off</p> <p>Bain à ultrasons</p> <p>Bain d'acétone avec Ultrasons (Pw =40) pendant 30min. puis rinçage à la pipette d'acétone, puis rinçage à la pipette d'alcool, puis rinçage à l'EDI et séchage.</p>
19	<p>Gravure RIE</p> <p>Gravure oxynitruure par masque d'aluminium</p> <p>Oxford PlasmaLab 80 Plus</p> <p>Gaz : CHF₃/40 sccm CF₄/40sccm Puissance 125W Pression 50mT. Accort</p>

	Impédance automatique. Tension d'autopolarisation = 519V Temps 35 min. (+3 min pour l'uniformité).
20	Découpe
21	Gravure chimique Libération finale des structures mobiles Solvant EBRPG Temps = 15min. Rinçage sans agitation EDI pendant 5min
22	Gravure chimique Libération finale des structures mobiles Attaque chrome (solution commerciale) Temps = 2 min. Rinçage sans agitation EDI pendant 5min Rinçage sans agitation Isopropanol pendant 5min
23	Séchage Bâti de séchage CO ₂ supercritique

V. Programme MATLAB

1. Aperçu du programme

Entrée : Matériaux, courant d'entrée, dimensions, contraintes etc....

Sortie : Déflexion maximum, puissance, fréquence de résonance, dimension, contraintes etc....

The screenshot displays a MATLAB environment with three main components:

- Input Parameters Dialog:** A window titled "Paramètres des commutateurs" with fields for L=, W=, tmetal, tox, l=, tair, Ta, s1, s2, we, g, r, rt, sg1, and sg2. It also includes radio buttons for "Choisir couche supérieure" (nickel, Gold, SixNy, Su8) and "Choisir couche inférieure" (Alu, Su8, poly, SiO2, W, Ag, Si3N4, W). Buttons for "Fin" and "OK" are at the bottom.
- Command Window:** Shows the execution of a script:


```
>> cd prg
>> delta2
>>
dmax =
    4.3805e-005
Rtot2 =
    8.0137
P =
    20.0342
Upi =
    2.4631
```
- Figure Window:** A plot titled "Figure No. 5" showing a curve of deformation. The x-axis ranges from 0 to 3.5, and the y-axis ranges from 0 to 6 (scaled by $\times 10$). The curve starts at (0,0) and increases to approximately (3.5, 4.5).

Représentation graphique de la déformation de la structure

2. Calcul de la déformation

```

% Variables globales
global HFenP BackColorDef
global Chmetal Choxyde Chcontact

global CL Cw Cwe CLcon CXcon
global Ctmetal Ctox Ctcon Ctair
global CI CTa

global BR_S1 BR_S2 BR_S3
global BR_I1 BR_I2 BR_I3
global BR_C1 BR_C2 BR_C3

% initialisations
L=str2num(get(CL, 'String'))*1e-6;
w=str2num(get(Cw, 'String'))*1e-6;
we=str2num(get(Cwe, 'String'))*1e-6;
Lcon=str2num(get(CLcon, 'String'))*1e-6;
Xcon=str2num(get(CXcon, 'String'))*1e-6;

t1=str2num(get(Ct1, 'String'))*1e-6;
t2=str2num(get(Ct2, 'String'))*1e-6;
t3=str2num(get(Ct3, 'String'))*1e-6;
tair=str2num(get(Ctair, 'String'))*1e-6;

I=str2num(get(CI, 'String'))*1e-3;

Ta=str2num(get(CTa, 'String'));

%Température de référence
To=25;
Ts=Ta;

%Dielectrique
eo=8.85e-12;
er=1;

%AIR
lambdaair=0.02624;

%géométrie
LT=2*L+we;

% calcul surface
S1=t1*w;
S2=t2*w;

%Résistance d'accès
Rligne=3;

switch Chmetal

case 'nickel'
    E1=200e9;
    alpha1=12.7e-6;
    lambda1=90.5;
    mass1=8.9e3;
    s1=0*1e6;
    sgl=00*1e6;

```

```
r=4*1e-8;
rt=0*1e-3;

case 'gold'
  E1=80e9;
  alpha1=14.2e-6;
  lambda1=296;
  mass1=19.3e3;
  s1=100*1e6;
  sg1=00*1e6;
  r=2.2*1e-8;
  rt=0*1e-3;

case 'Alu'
  E1=77e9;
  alpha1=20e-6;
  lambda1=235;
  mass1=2.3e3;
  s1=45*1e6;
  sg1=0*1e6;
  r=2.8*1e-8;
  rt=0*1e-3;
end

switch Choxyde

case 'SixNy'
  E2=70e9;
  alpha2=0.6e-6;
  lambda2=1.4;
  mass2=2.15e3;
  eox=5;
  s2=0*1e6;
  sg2=0*1e6;

case 'SiO2'
  E2=70e9;
  alpha2=0.4e-6;
  lambda2=0.2;
  mass2=2.15e3;
  eox=5;
  s2=-400*1e6;
  sg2=0*1e6;

case 'Si3N4'
  E2=122e9;
  alpha2=0.8e-6;
  lambda2=32;
  mass2=3450;
  eox=5;
  s2=400*1e6;
  sg2=0*1e6;
end

switch Chcontact

case 'Tungsten'
  E3=416;
  alpha3=4.5e-6;
  lambda3=22;
  mass3=7.15e3;
```

```

s3=-400*1e6;
sg3=400*1e6;

case 'gold'
E3=80e9;
alpha3=14.2e-6;
lambda3=296;
mass3=19.3e3;
s3=100*1e6;
sg3=00*1e6;

case 'Alu'
E3=77e9;
alpha3=20e-6;
lambda3=235;
mass3=2.3e3;
s3=45*1e6;
sg3=0*1e6;
end

%GRADIENT
M1=2*w*t1^2*sg1/12;
M2=2*w*t2^2*sg2/12;
M3=2*w*t3^2*sg3/12;

%CAS BICOUCHE

%Calcul du Nouvel axe neutre
Y1=t1/2;
Y2=t1+t2/2;
Yb=(E1*t1*Y1+E2*t2*Y2)/(E1*t1+E2*t2);

I1=2*w*(t1^3)/12;
I2=2*w*(t2^3)/12;

EIb=E1*I1+2*w*E1*t1*(Y1-Yb)^2+E2*I2+2*w*E2*t2*(Y2-Yb)^2;

%Allongement thermique initial
epsinit1=-alpha1*(Ta-To);
epsinit2=-alpha2*(Ta-To);

%Calcul des moment Muni et Mtherm
expr1b=(s1*t1+s2*t2)/(E1*t1+E2*t2);
Munib=2*w*(t1*s1*(Yb-Y1)+t2*s2*(Yb-Y2)+E1*t1*expr1b*(Yb-
Y1)+E2*t2*expr1b*(Yb-Y2));

expr2b=(epsinit1*E1*t1+epsinit2*E2*t2)/(E1*t1+E2*t2);
Mtherminib=2*w*(E1*t1*epsinit1*(Yb-Y1)+E2*t2*epsinit2*(Yb-
Y2)+E1*t1*expr2b*(Yb-Y1)+E2*t2*expr2b*(Yb-Y2));

%Calcul du rayon de courbure
invrayb=(Munib+Mtherminib+M1+M2)/EIb;

%CAS TRICOUCHE

%Calcul du Nouvel axe neutre
Y1=t1/2;
Y2=t1+t2/2;
Y3=t1+t2+t3/2;
Yt=(E1*t1*Y1+E2*t2*Y2+E3*t3*Y3)/(E1*t1+E2*t2+E3*t3);

```

```

I1=2*w*(t1^3)/12;
I2=2*w*(t2^3)/12;
I3=2*w*(t3^3)/12;

EIt=E1*I1+2*E1*w*t1*(Y1-Yt)^2+E2*I2+2*E2*w*t2*(Y2-
Yt)^2+E3*I3+2*E3*w*t3*(Y3-Yt)^2;

%Allongement thermique initial
epsinit1=-alpha1*(Ta-To);
epsinit2=-alpha2*(Ta-To);
epsinit3=-alpha3*(Ta-To);

%Calcul des moment Muni et Mtherm
expr1t=(s1*t1+s2*t2+s3*t3)/(E1*t1+E2*t2+E3*t3);
Munit=2*w*(t1*s1*(Yt-Y1)+t2*s2*(Yt-Y2)+t3*s3*(Yt-
Y3)+E1*t1*expr1t*(Yt-Y1)+E2*t2*expr1t*(Yt-Y2)+E3*t3*expr1t*(Yt-Y3));

expr2t=(epsinit1*E1*t1*w+epsinit2*E2*t2*w+epsinit3*E3*t3*w)/(E1*t1*
w+E2*t2*w+E3*t3*w);
Mtherminitt=2*w*(E1*t1*epsinit1*(Yt-Y1)+E2*t2*epsinit2*(Yt-
Y2)+E3*t3*epsinit3*(Yt-Y3)+E1*t1*expr2t*(Yt-Y1)+E2*t2*expr2t*(Yt-
Y2)+E3*t3*expr2t*(Yt-Y3));

%Calcul du rayon de courbure
invrayt=(Munit+Mtherminitt+M1+M2)/EIt;

%DEFLEXION INITIALE

%Définition des constante de continuité
C1=(invrayb-invrayt)*Xcon;
C2=0.5*(invrayb-invrayt)*Xcon^2-C1*Xcon;
C3=- (invrayb-invrayt)*(Xcon+Lcon)+C1;
C4=-0.5*(invrayb-invrayt)*(Xcon+Lcon)^2+(C1-C3)*(Xcon+Lcon)+C2;

n=2e-6;

%1ere section bicouche
x1=0:n:Xcon;
Dinit1=0.5*invrayb*x1.^2;
n1=Xcon/n;

%section tricouche
x2=Xcon:n:(Xcon+Lcon);
Dinit2=0.5*invrayt*x2.^2+C1*x2+C2;
n2=Lcon/n;

%2nd section bicouche
x3=(Xcon+Lcon):n:L;
Dinit3=0.5*invrayb*x3.^2+C3*x3+C4;
n3=(L-Lcon-Xcon)/n;

%TEMPERATURE

Dtherm1=0;
Dtherm2=0;
Dtherm3=0;
Tmax=Ta;

Deflexion1=tair+Dinit1+Dtherm1;
Deflexion2=tair+Dinit2+Dtherm2;

```

```

Deflexion3=tair+Dinit3+Dtherm3;

Tf1=0;
Tf2=0;
Tf3=0;

dextrinit=Deflexion3(n3+1)

for i=0:I/100:I;
    J=i/S1;

    %resistance totale
    res=r*(1+rt*Tmax);

    %calcul du gap
    gap1=tair+Dinit1+Dtherm1;
    gap2=tair+Dinit2+Dtherm2;
    gap3=tair+Dinit3+Dtherm3;

    %Calcul du facteur de forme
    F1=(t1/w)*(2*(gap1+t2)/t1+1)+1;
    F2=(t1/w)*(2*(gap2+t2)/t1+1)+1;
    F3=(t1/w)*(2*(gap3+t2)/t1+1)+1;

    %calcul de la temperature
    B=(r*J^2)/lambda1;

    expr1=F1./(lambda1*t1*(gap1./lambdaair+t2/lambda2))-B*rt;
    expr2=F2./(lambda1*t1*(gap2./lambdaair+t2/lambda2))-B*rt;
    expr3=F3./(lambda1*t1*(gap3./lambdaair+t2/lambda2))-B*rt;

    A1=(expr1).^0.5;
    A2=(expr2).^0.5;
    A3=(expr3).^0.5;

    C11=-(B./A1.^2).*(1-exp(-A1*LT))./(exp(A1*LT)-exp(-A1*LT));
    C12=-(B./A2.^2).*(1-exp(-A2*LT))./(exp(A2*LT)-exp(-A2*LT));
    C13=-(B./A3.^2).*(1-exp(-A3*LT))./(exp(A3*LT)-exp(-A3*LT));

    C21=-(B./A1.^2)-C11;
    C22=-(B./A2.^2)-C12;
    C23=-(B./A3.^2)-C13;

    Tf1=(B./A1.^2)+C11.*exp(A1.*x1)+C21.*exp(-A1.*x1);
    Tf2=(B./A2.^2)+C12.*exp(A2.*x2)+C22.*exp(-A2.*x2);
    Tf3=(B./A3.^2)+C13.*exp(A3.*x3)+C23.*exp(-A3.*x3);

    Tmax=Tf3(n3+1);

    %calcul de la Deflexion themique

    integ1=(B./A1.^2).*(x1.^2./2)+(C11./A1.^2).*exp(A1.*x1)+(C21./A1.^2
). *exp(-A1.*x1)-(C11-C21). *x1./A1-(C11+C21). /A1.^2;

    integ2=(B./A2.^2).*(x2.^2./2)+(C12./A2.^2).*exp(A2.*x2)+(C22./A2.^2
). *exp(-A2.*x2)-(C12-C22). *x2./A2-(C12+C22). /A2.^2;

    integ3=(B./A3.^2).*(x3.^2./2)+(C13./A3.^2).*exp(A3.*x3)+(C23./A3.^2
). *exp(-A3.*x3)-(C13-C23). *x3./A3-(C13+C23). /A3.^2;

```

```

expb=(E1*t1*alpha1+E2*t2*alpha2)/(E1*t1+E2*t2);

expt=(E1*t1*alpha1+E2*t2*alpha2+E3*t3*alpha3)/(E1*t1+E2*t2+E3*t3);

invray2b=2*w*(E1*t1*(Yb-Y1)*(alpha1+expb)+E2*t2*(Yb-
Y2)*(alpha2+expb))/EIb;
invray2t=2*w*(E1*t1*(Yt-Y1)*(alpha1+expt)+E2*t2*(Yt-
Y2)*(alpha2+expt))/EIt;

int1=(B./A1.^2).*x1+(C11./A1).*exp(A1.*x1)-(C21./A1).*exp(-
A1.*x1)-(C11-C21)./A1;
int2=(B./A2.^2).*x2+(C12./A2).*exp(A2.*x2)-(C22./A2).*exp(-
A2.*x2)-(C12-C22)./A2;
int3=(B./A3.^2).*x3+(C13./A3).*exp(A3.*x3)-(C23./A3).*exp(-
A3.*x3)-(C13-C23)./A3;

D1=(invray2b-invray2t)*int2(1);
D2=(invray2b-invray2t)*integ2(1)-D1*Xcon;
D3=-(invray2b-invray2t)*int3(1)+D1;
D4=-(invray2b-invray2t)*integ3(1)+(D1-D3)*(Xcon+Lcon)+D2;

Dtherm1=-invray2b*integ1;
Dtherm2=-invray2t*integ2-D1.*x2-D2;
Dtherm3=-invray2b*integ3-D3.*x3-D4;

%Calcul de la deflexion;

Deflexion1=tair+Dinit1+Dtherm1;
Deflexion2=tair+Dinit2+Dtherm2;
Deflexion3=tair+Dinit3+Dtherm3;

Tmax=max([Tf1,Tf2,Tf3])

end
Tmax
dmax=max([Dinit1,Dinit2,Dinit3])
Dextr=Deflexion3(n3+1)

%Tracé de la courbe
figure(2)
plot(x1,Deflexion1,'b-o')
hold on;
plot(x2,Deflexion2,'r-o')
hold on;
plot(x3,Deflexion3,'g-o')
hold on;
grid

%calcul de la deflexion genere par l acceleration
N=330;
mass1=19.3e3;
mass2=2.15e3;
mtotal=w*LT*(t1*mass1+t2*mass2)+(2*w+we)*Lcon*(t3*mass1);
Dacc=-(9.81*N*mtotal*L^3)/(8*EIb)

%calcul de la frequence de resonance
fn=(3.52/6.28)*(3*(EIb)/(mtotal*L^3))^0.5

%tension de PullIn
eo=8.85e-12;
er=1;

```

```
eox=5;  
Keff=3*EIb/L^3;  
Seff=0.67*L^2*w;  
do=tair;  
Vpi=(8*Keff*(do+t2/eox)^3/(27*Seff*eo))^0.5  
  
%tension de PullOut  
Vpo=((2*Keff*(tair+dmax)*(t2)^2)/(Seff*eo*eox))^0.5
```

3. Interfaces graphiques

Programme 1

```

global HFenP BackColorDef
global BR_S1 BR_S2 BR_S3
global Chmetal

CLabel = 'Couche metallique';
CPos = [5 120 90 15];
TXT_Col = uicontrol(HFenP, ... % handle sur fenetre graphique
    'style', 'text', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'string', CLabel); % texte du controle

CLabel = 'nickel';
CPos = [5 100 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_S1, 'value', 1), '...
    'set(BR_S2, 'value', 0), '...
    'set(BR_S3, 'value', 0), '...
    'Chmetal = 'nickel';'];
BR_S1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'radio', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack); % fonction, script a appeler ou
    % commande a executer

CLabel = 'Gold';
CPos = [5 80 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_S1, 'value', 0), '...
    'set(BR_S2, 'value', 1), '...
    'set(BR_S3, 'value', 0), '...
    'Chmetal = 'gold';'];
BR_S2 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'radio', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack); % fonction, script a appeler ou
    % commande a executer

CLabel = 'Alu';
CPos = [5 60 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_S1, 'value', 0), '...
    'set(BR_S2, 'value', 0), '...
    'set(BR_S3, 'value', 1), '...
    'Chmetal = 'Alu';'];
BR_S3 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'radio', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack); % fonction, script a appeler ou
    % commande a executer

% Valeurs par defaut des controles

```

```
set(BR_S1,'Value',0);
set(BR_S2,'Value',0);
set(BR_S3,'Value',1);
```

```
Chmetal = 'Alu';
```

Programme 2

```
global HFenP BackColorDef
global BR_I1 BR_I2 BR_I3
global Choxyde

CLabel = 'Couche isolante';
CPos = [105 120 90 15];
TXT_Col = uicontrol(HFenP, ... % handle sur fenetre graphique
    'style', 'text', ... % style du controle
    'position', CPos,... % position du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'string', CLabel); % texte du controle

CLabel = 'SixNy';
CPos = [105 100 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_I1,'value',1),'...
    'set(BR_I2,'value',0),'...
    'set(BR_I3,'value',0),'...
    'Choxyde = ''SixNy'';'];

BR_I1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'radio', ... % style du controle
    'position', CPos,... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback',CCallBack); % fonction, script a appeler ou
    % commande a executer

CLabel = 'SiO2';
CPos = [105 80 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_I1,'value',0),'...
    'set(BR_I2,'value',1),'...
    'set(BR_I3,'value',0),'...
    'Choxyde = ''SiO2'';'];

BR_I2 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'radio', ... % style du controle
    'position', CPos,... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback',CCallBack); % fonction, script a appeler ou
    % commande a executer

CLabel = 'Si3N4';
CPos = [105 60 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_I1,'value',0),'...
    'set(BR_I2,'value',0),'...
    'set(BR_I3,'value',1),'...
    'Choxyde = ''Si3N4'';'];

BR_I3 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'radio', ... % style du controle
```

```

    'position', CPos, ...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...   % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback); % fonction, script à appeler ou
                           % commande à exécuter

% Valeurs par défaut des contrôles
set(BR_I1, 'Value', 1);
set(BR_I2, 'Value', 0);
set(BR_I3, 'Value', 0);

Choxyde = 'SixNy';

```

Programme 3

```

global HFenP BackColorDef
global BR_C1 BR_C2 BR_C3
global Chcontact

CLabel = 'Contacteur';
CPos = [205 120 90 15];
TXT_Col = uicontrol(HFenP, ... % handle sur fenêtre graphique
    'style', 'text', ...      % style du contrôle
    'position', CPos, ...     % position du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'string', CLabel);       % texte du contrôle

CLabel = 'Tungsten';
CPos = [205 100 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_C1, 'value', 1), '...
    'set(BR_S2, 'value', 0), '...
    'set(BR_S3, 'value', 0), '...
    'Chcontact = 'Tungsten''; ];
BR_C1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'radio', ...    % style du contrôle
    'position', CPos, ...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...    % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback); % fonction, script à appeler ou
                           % commande à exécuter

CLabel = 'Gold';
CPos = [205 80 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_C1, 'value', 0), '...
    'set(BR_C2, 'value', 1), '...
    'set(BR_C3, 'value', 0), '...
    'Chcontact = 'gold''; ];
BR_C2 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'radio', ...    % style du contrôle
    'position', CPos, ...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...    % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback); % fonction, script à appeler ou
                           % commande à exécuter

```

```

CLabel = 'Alu';
CPos = [205 60 90 15];
CCallBack = [ 'set(BR_C1,'value',0),'...
              'set(BR_C2,'value',0),'...
              'set(BR_C3,'value',1),'...
              'Chcontact = 'Alu'';'];
BR_C3 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
                'style', 'radio', ... % style du contrôle
                'position', CPos,... % position du contrôle
                'string', CLabel, ... % texte du contrôle
                'BackgroundColor', BackColorDef, ...
                'callback',CCallBack); % fonction, script à appeler ou
                                     % commande à exécuter

% Valeurs par défaut des contrôles
set(BR_C1,'Value',0);
set(BR_C2,'Value',1);
set(BR_C3,'Value',0);

```

```
Chcontact = 'gold';
```

Programme 4

```

% Variables globales
global HFenP BackColorDef
global CL Cw Cwe CLcon CXcon
global Ct1 Ct2 Ct3 Ctair
global CI CTa

CLabel = 'L = ';
CPos = [5 220 30 15];
CCallBack = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
                  'style', 'text', ... % style du contrôle
                  'position', CPos,... % position du contrôle
                  'string', CLabel, ... % texte du contrôle
                  'BackgroundColor', BackColorDef, ...
                  'callback', CCallBack);

CLabel = '';
CPos = [45 220 30 15];
CCallBack = '';
CL = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
              'style', 'edit', ... % style du contrôle
              'position', CPos,... % position du contrôle
              'string', CLabel, ... % texte du contrôle
              'Max', 1,... % zone uniligne
              'BackgroundColor', BackColorDef, ...
              'callback', CCallBack);

CLabel = 'W = ';
CPos = [5 200 30 15];
CCallBack = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
                  'style', 'text', ... % style du contrôle
                  'position', CPos,... % position du contrôle
                  'string', CLabel, ... % texte du contrôle
                  'BackgroundColor', BackColorDef, ...

```

```

        'callback', CCallback);

CLabel = '';
CPos = [45 200 30 15];
CCallback = '';
Cw = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'edit', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'Max', 1, ... % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = 'We = ';
CPos = [5 180 30 15];
CCallback = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'text', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = '';
CPos = [45 180 30 15];
CCallback = '';
Cwe = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'edit', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'Max', 1, ... % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = 'Lcon = ';
CPos = [5 160 30 15];
CCallback = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'text', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = '';
CPos = [45 160 30 15];
CCallback = '';
CLcon = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'edit', ... % style du controle
    'position', CPos, ... % position du controle
    'string', CLabel, ... % texte du controle
    'Max', 1, ... % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = 'Xcon = ';
CPos = [5 140 30 15];
CCallback = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le controle
    'style', 'text', ... % style du controle

```

```

    'position', CPos,...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...  % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = '';
CPos = [45 140 30 15];
CCallback = '';
CXcon = uicontrol(HFenP, ...    % handle sur le contrôle
    'style', 'edit', ...    % style du contrôle
    'position', CPos,...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...    % texte du contrôle
    'Max', 1,...    % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = 't1 = ';
CPos = [105 220 30 15];
CCallback = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ...    % handle sur le contrôle
    'style', 'text', ...    % style du contrôle
    'position', CPos,...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...    % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = '';
CPos = [145 220 30 15];
CCallback = '';
Ct1 = uicontrol(HFenP, ...    % handle sur le contrôle
    'style', 'edit', ...    % style du contrôle
    'position', CPos,...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...    % texte du contrôle
    'Max', 1,...    % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = 't2 = ';
CPos = [105 200 30 15];
CCallback = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ...    % handle sur le contrôle
    'style', 'text', ...    % style du contrôle
    'position', CPos,...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...    % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = '';
CPos = [145 200 30 15];
CCallback = '';
Ct2 = uicontrol(HFenP, ...    % handle sur le contrôle
    'style', 'edit', ...    % style du contrôle
    'position', CPos,...    % position du contrôle
    'string', CLabel, ...    % texte du contrôle
    'Max', 1,...    % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = 't3 = ';
CPos = [105 180 30 15];

```

```

CCallBack = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'text', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack);

CLabel = '';
CPos = [145 180 30 15];
CCallBack = '';
Ct3 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'edit', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'Max', 1, ... % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack);

CLabel = 'tair = ';
CPos = [105 160 30 15];
CCallBack = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'text', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack); % fonction, script à appeler ou
    % commande à exécuter

CLabel = '';
CPos = [145 160 30 15];
CCallBack = '';
Ctair = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'edit', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'Max', 1, ... % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack); % fonction, script à appeler ou
    % commande à exécuter

CLabel = 'I = ';
CPos = [205 220 30 15];
CCallBack = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'text', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallBack); % fonction, script à appeler ou
    % commande à exécuter

CLabel = '';
CPos = [245 220 30 15];
CCallBack = '';
CI = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'edit', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'Max', 1, ... % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...

```

```

        'callback', CCallback); % fonction, script à appeler ou
                                % commande à exécuter

CLabel = 'Ta = ';
CPos = [205 200 30 15];
CCallBack = '';
TxtSt1 = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'text', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback); % fonction, script à appeler ou
                                % commande à exécuter

CLabel = '';
CPos = [245 200 30 15];
CCallBack = '';
CTa = uicontrol(HFenP, ... % handle sur le contrôle
    'style', 'edit', ... % style du contrôle
    'position', CPos, ... % position du contrôle
    'string', CLabel, ... % texte du contrôle
    'Max', 1, ... % zone uniligne
    'BackgroundColor', BackColorDef, ...
    'callback', CCallback); % fonction, script à appeler ou
                                % commande à exécuter

```

4. Programme principal

```

global HFenP BackColorDef
BackColorDef = [0.9 0.9 0.9];

FPos = [120 100 300 250];
HFenP = figure('Name', 'Tracé de Courbes', ...
    'NumberTitle', 'off', ...
    'Resize', 'off', ...
    'Visible', 'off', ...
    'Position', FPos ...
);

affichage
materiau1
materiau2
materiau3

CLabel = 'Fin';
CPos = [10 10 120 20];
CCallBack = 'close all; clear all';
BPFin = uicontrol(HFenP, ...
    'style', 'push', ...
    'position', CPos, ...
    'string', CLabel, ...
    'callback', CCallback);

CLabel = 'OK';
CPos = [170 10 120 20];
CCallBack = 'calcul';
BPMaj = uicontrol(HFenP, ...

```

```
'style', 'push', ...  
'position', CPos, ...  
'string', CLabel, ...  
'callback', CCallBack);
```

```
set(HFenP, 'Color', [1 1 1])  
set(HFenP, 'Visible', 'on');
```

```
drawnow;
```

VI. Liste de publications

STUDY AND REALISATION OF A MICROMECHANICAL RELAY FOR USE IN A HARSH ENVIRONMENT

François Conseil, Dominique Collard, Lionel Buchaillot, Patrick Derderian, Marie-France Ravat.,
DTIP 2003, Design, Test, Integration and Packaging of MOEMS/MEMS, Cannes, France, May 05-07, 2003

RELIABLE MICRORELAY FOR SAFETY APPLICATIONS IN HARSH ENVIRONMENT

François Conseil, Dominique Collard, Lionel Buchaillot, Patrick Derderian, Marie-France Ravat.
EMPC 2003, 14th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition, Friedrichshafen, Germany, June 23-25, 2003

THERMALLY ACTUATED PROBE ARRAYS FOR MANIPULATION AND CHARACTERIZATION OF INDIVIDUAL BIO-CELLS

Beomjoon Kim, Dominique Collard, Matthieu Lagouge, François Conseil, Bernard Legrand, Lionel Buchaillot,
TRANSDUCER'03, 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuator and Microsystems, Boston, USA, June 8-12, 2003

CHARACTERIZATION OF INDIVIDUAL BIO-CELLS WITH THERMALLY ACTUATED PROBE ARRAYS

Y.H. Cho, F. Conseil, L. Buchaillot, D. Collard, B.J. Kim,
DTIP 2004, Design, Test, Integration and Packaging of MOEMS/MEMS, Montreux, Suisse, May 05-07, 2004

TITRE DE LA THESE :

**SIMULATION, CONCEPTION ET REALISATION D'UN COMMUTATEUR EN TECHNOLOGIE
MICROSYSTEME POUR DISPOSITIFS LOGIQUES SECURITAIRES**

RESUME :

Cette thèse présente un microrelais dédié à la commutation de signaux continus en environnement sévère. Il est composé d'un cantilever bilame Al/SiO₂ et de contacteurs en or. Ce dispositif commute grâce à un actionnement à la fois électrostatique et électrothermique. Son intégration sur circuit intégré standard est rendue possible par l'utilisation d'un procédé de fabrication basse température. Une approche analytique complète décrivant le comportement du dispositif a été développée pour la phase de conception. Un courant est injecté à travers la couche métallique du bilame ce qui provoque une augmentation de température par effet Joule. Le chauffage et les différents coefficients de dilatation thermique des matériaux provoquent la déflexion du cantilever. L'actionnement thermique a été retenu car il permet d'effectuer des déplacements d'amplitude importante. De plus, comme l'actionnement électrostatique n'est intéressant que dans le cas d'un faible entrefer, l'actionnement électrothermique est complété par un actionnement électrostatique. Ceci permet d'obtenir une force suffisante au verrouillage du dispositif, améliorant du coup la fiabilité du contact.

MOTS-CLES :

**Microsysteme Microrelais Cantilever Bilame Actionnement électrostatique
Actionnement électrothermique Environnement sévère**

A robust DC microrelay designed in order to be used in a harsh environment is presented in this thesis. It consists of Al/SiO₂ bimorph cantilever with a gold contactor. This device switches through combined electrostatic and thermal actuations. Further integration of the safety system on standard IC (Integrated circuit) is possible thanks to a cold manufacturing process. An analytical approach describing the electrical, thermal, and mechanical coupled-modeling has been developed for a better understanding of the device behavior and to optimize its design. A current flow is applied through the metallic layer to increased temperature by Joule effect. The heating and the different thermal expansion coefficients of the bilayer provide the vertical displacement of the beam. We have preferred an actuation based on the thermal expansion effect because it offers greater displacement. And since an electrostatic actuator operates with significant force when a small gap is reached, the electrothermal actuation is assisted by an electrostatic actuation to provide an additional contact force in order to locked the device and improve the reliability of the contact

KEYWORDS :

**Microsystem Microrelay Bimorph cantilever Electrostatic actuation
Electrothermal actuation Harsh environment**