

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN MICROMOTEUR
ÉLECTROSTATIQUE EN VUE DE SON INTÉGRATION DANS UN
MICROROBOT

MAURICE JACQUES-A. DELAFOSSE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

DÉCEMBRE 2004



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 0-494-01303-6

Our file *Notre référence*

ISBN: 0-494-01303-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

« CONCEPTION ET FABRICATION D'UN MICROMOTEUR ÉLECTROSTATIQUE EN
VUE DE SON INTÉGRATION DANS UN MICROROBOT »

présenté par : DELAFOSSE Maurice Jacques-A.

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MEUNIER Michel, Ph.D., président

M. MARTEL Sylvain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PETER Yves-Alain, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Ce travail a été accompli grâce aux contributions des personnes suivantes :

Sylvain Martel – Mon directeur, il a cru en moi et m’a accordé un soutien sans limite. Toujours ouvert à la discussion et à l’exploration de nouvelles idées. Rien ne semble pouvoir arrêter l’homme et son rêve. Bonne chance Sylvain, pour moi tu resteras à jamais un exemple de persévérance et d’abnégation.

Valérie Biron – Mon Amour, ma compagne. La seule à posséder la clé de mon univers.

Dominic – Je ne peux pas concevoir mes années au nLab sans avoir une pensée pour toi mon ami. Ta présence a rendu les moments difficiles plus supportables et les moments de joie encore plus agréables. J’ai beaucoup appris à tes côtés, probablement plus que tu ne peux l’imaginer. Merci le Kid.

Charles, Guillaume, Jean-Baptiste, Marc-Antoine, Marco, Martin, Ouajdi, Walder – Messieurs, vous êtes la petite touche magique qui fait que cette improbable aventure restera à jamais gravée dans ma mémoire. Ce fut un honneur de passer ses 2 années au NanoLab à vos côtés.

Olivier-Don et Neila – Vous êtes arrivé au bon moment. Je ne vous remercierai jamais assez de m’avoir poussé à recentrer mes efforts et à réviser mes objectifs. Merci également pour vos remarques et vos apports sur les plans technique et expérimental, leur valeur est inestimable.

Arnaud, Abou, Haritz, Nami, Pascal, Pierre-Alain – Merci pour le support et la considération que vous m’avez accordé.

Alexandre Caron – Merci pour ton aide et ton apport sur les questions mécaniques.

Kostas Piyakis – Pour sa patience et son indéfectible support.

Thomas, Guido, Alexandre – Une visite courte mais de qualité.

Chaire de Recherche du Canada en conception, fabrication et validation de micro/nanosystème pour le financement et les infrastructures.

Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG) du Canada pour le financement et les infrastructures.

Société canadienne de microélectronique (CMC) pour la fabrication du MEMS et le support technique.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de maîtrise traite de la fabrication d'un micromoteur électrostatique dans le cadre du projet Walking-Die qui vise la fabrication d'un microrobot capable d'interactions à l'échelle nanométrique. Le projet est actuellement en cours de développement au Laboratoire de NanoRobotique de l'École Polytechnique de Montréal sous la direction du professeur Sylvain Martel. Le but du projet Walking-Die est d'utiliser les techniques d'ingénierie modernes pour fabriquer un microrobot autonome. Le moteur du robot devra respecter les contraintes associées à son intégration. Il ne s'agit donc pas de fabriquer un micromoteur électrostatique mais de mettre au point l'élément principal du système de locomotion d'un microrobot.

Après comparaison de plusieurs types de micromoteurs, nous abordons les techniques de fabrication qui y sont associées pour en arriver à l'hypothèse de base de notre travail : la microfabrication en couches minces peut produire un micromoteur adéquat et suffisamment fort pour déplacer un microrobot. Si la littérature est ambivalente à ce sujet, les dimensions ciblées pour le Walking-Die permettent de considérer sérieusement ce choix. Cependant, il ne peut être définitivement validé que par des tests mécaniques sur des structures fabriquées. Les étapes à suivre pour concevoir un MEMS sont nombreuses et font appel à des compétences appartenant à plusieurs domaines du génie. Le présent travail visant la fabrication à court terme, nous avons décidé de nous appuyer sur la littérature existante de façon à créer un flot de conception abrégé mais

cohérent. Le modèle de micromoteur utilisé est le micromoteur électrostatique à contrôle latéral (le long de la tranche du rotor), la méthode de fabrication est la microfabrication en couches minces (ou de surfaces), l'outil de dessin est L-Edit de MEMsSCAP et la technologie de fabrication est MUMPS. Le nombre d'étapes d'analyse théorique a été minimisé au profit de l'usage d'un design de base conservateur souvent couvert dans les études sur les micromoteurs électrostatiques. Des équations physiques, qui caractérisent les forces en présence dans un micromoteur électrostatique, sont utilisées pour guider les décisions de design et les conséquences de la réduction d'échelle sont exposées. Ensuite, l'analyse complète d'une défaillance mécanique et une version alternative des dessins de micromoteur sont présentées. Et finalement, les valeurs théoriques de force développée par l'usage de deux de nos micromoteurs sont incluses dans un modèle mécanique logiciel du Walking-Die et en démontrent théoriquement la capacité motrice.

ABSTRACT

The object of this master thesis is the fabrication of an electrostatic micromotor which will serve as the main locomotion system of a microrobot. It is part of the Walking-Die project from the NanoRobotics laboratory of the École Polytechnique of Montreal under the supervision of Professor Sylvain Martel. The Walking-Die project is currently under development and aims the fabrication of an autonomous microrobot capable of interactions at the nanometer level built using modern engineering techniques. Since we do not intend to build a “simple” micromotor but the main principal element of the system of locomotion of a microrobot, the main constraint of the design is its integration to the final system.

After comparison of several types of micromotor and the techniques of fabrication which are associated to them, we come to the basic assumption of our work: thin films micromachining can produce an adequate micromotor which will produce enough force to move our microrobot. The dimensions of Walking-Die make it possible to consider this possibility seriously. However, it can only be definitively validated by mechanical tests on structures manufactured. To obtain reliable results in less time, to the usual stages of electromechanical modeling by finite elements and others, we substituted the adoption of a model of traditional inspiration : the side-driven electrostatic micromotor ; and the use of a mature thin films manufacturing process: the MUMPs. The layout editor is L-Edit from MEMsCAP. Physical equations, which characterize the electrostatic

forces, are used as guidance in the choices made during the design and the consequences of scale reduction are presented. The masks are drawn using computer assisted design tools. We proceed to the complete analysis of a mechanical failure and present an alternate version of the drawings which overcome the previous failure and increase the performance of the micromotor. Finally, the theoretical values of force developed by the use of two of our micromotors are included in a software mechanical model of the Walking-Die and prove its driving capacity.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT (to be updated).....	viii
TABLES DES MATIÈRES	x
LISTE DES ANNEXES.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES TABLEAUX.....	xix
LISTE DES ACRONYMES	xxi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. Cahier des charges et contraintes de conception.....	5
1.1. Introduction au projet Walking-Die	5
1.2. Comparaison avec le Nanowalker.....	6
1.3. Extraction des requis	9
1.4. Évaluation de la puissance et de la force nécessaires	12
CHAPITRE 2. Technologie de fabrication.....	13
2.1. Choix du type de micromoteur.....	15
2.2. Comparaison entre micromoteurs électrostatiques et électromagnétiques	16
2.3. Microfabrication en couches minces ou bulk-micromachining	17
CHAPITRE 3. Outils de conception et procédé d'usinage.....	22
3.1. Présentation de l'outil de dessin L-Edit	24

3.2.	Présentation du procédé MUMPS	26
3.3.	Éléments de librairie	30
3.3.1.	L'élément "ROTARY SIDE DRIVE MOTOR"	31
3.3.2.	L'élément "JOURNAL BEARING"	34
CHAPITRE 4.	Fonctionnement et caractéristiques	36
4.1.	Les forces électrostatiques	37
4.1.1.	Identification des forces en présence	38
4.1.2.	Limitation de la fabrication en couches minces	39
4.2.	Impact de la réduction d'échelle	40
4.2.1.	Les effets de bord	40
4.2.2.	Tension de claquage	41
4.2.3.	Inertie	42
4.2.4.	Stiction	42
CHAPITRE 5.	Résultats	45
5.1.	Présentation des résultats du design IMUPMRPM	47
5.1.1.	Présentation des dessins de masques	48
5.1.2.	RPM1-3 versus RPM2-4	53
5.2.	Valeurs théoriques de la force disponible	57
5.2.1.	Force tangentielle	57
5.2.2.	Force normale	58
5.2.3.	Pertes	58
5.3.	Analyse des structures sorties de l'usine	59

5.3.1.	Manque de trous dans le Poly1	62
5.3.2.	Bris de coussinets.....	65
5.3.3.	Disparité de surface dans la zone de pivot.....	66
5.3.4.	Électrodes et rotor	69
5.4.	Interprétation et conclusion des observations d'analyse.....	71
5.5.	Décisions de design visant à améliorer IMUPMRPM.....	74
5.6.	Présentation des résultats du design IMUPMRPN	75
5.6.1.	La distribution des traces d'alimentation	75
5.6.2.	Renforcement du rotor	76
5.6.3.	Augmentation du potentiel électrostatique.....	77
5.6.4.	Présentation des dessins de masques	79
5.6.5.	Inspection visuelle et mécanique des structures fabriquées.....	83
5.6.6.	Analyse et interprétation du bris et des deux anomalies.....	87
CONCLUSION.....		96
RÉFÉRENCES.....		99
ANNEXES		104

LISTE DES ANNEXES

A.	Visualisation masque par masque du IMUPMRPM	104
B.	Visualisation masque par masque du IMUPMRPN.....	110
C.	Feuilles de formules et exemples de calcul.....	118
D.	Calculs théoriques des forces normales et tangentielles	123
E.	Analyse mécanique du prototype Beta-EDM	129

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Image 3D du robot Nanowalker	6
Figure 1.2 : Pattes et convertisseurs DC-DC du Nanowalker [MCOF01].....	7
Figure 1.3 : Modèle 3D de la première version du robot Walking-Die	10
Figure 1.4 : Modèle 3D de la deuxième version (Beta EDM) du robot Walking-Die.....	10
Figure 1.5 : Modèle 3D de la troisième et dernière version du robot Walking-Die	10
Figure 2.1 : Vue éclatée d'un micromoteur électromagnétique [KEMN00]	16
Figure 3.1 : Les 7 couches du procédé MUMPS.	27
Figure 4.1 : Patron d'activation des électrodes du stator.....	36
Figure 4.2 : Représentation des forces normale et tangentielle entre 2 armatures de potentiels différents.....	38
Figure 5.1 : Vue d'ensemble des masques principaux IMUPMRPM	48
Figure 5.2 : Présentation de la zone de pivot du IMUPMRPM (délimitée en pointillets)	50
Figure 5.3 : Deux sortes de points d'alimentation (IMUPMRPM)	51
Figure 5.4 : Vue d'ensemble du design IMUPMRPM	52
Figure 5.5 : Distribution A (dessins de masques)	54
Figure 5.6 : Distribution B (dessins de masques)	54
Figure 5.7 : Coupe transversale d'une trace d'alimentation.....	55
Figure 5.8 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPM brisée	60
Figure 5.9 : Vue au MEB d'une structure IMUPMRPM brisée	61

Figure 5.10 : Gros plan de zone de pivot de structures du IMUPMRPM brisées.....	62
Figure 5.11 : Observation au MEB des trous résultant de l'usage du masque HOLE1 ...	63
Figure 5.12 : Observation au MEB du résultat de la libération de l'extrémité d'une pale	64
Figure 5.13 : Gros plan sur les coussinets de structures du IMUPMRPM brisées	65
Figure 5.14 : Gros plan au MEB d'un coussinet intact (IMUPMRPM).....	65
Figure 5.15 : Observation de la disparité de surface sur une structure du IMUPMRPM	66
Figure 5.16 : Vue 1 - Mise en évidence au MEB d'une fissure dans la zone de pivot (IMUPMRPM).....	67
Figure 5.17 : Vue 2 - Mise en évidence au MEB d'une fissure dans la zone de pivot (IMUPMRPM).....	68
Figure 5.18 : Gros plan au MEB sur une fissure entre la fracture et un DIMPLE (IMUPMRPM).....	68
Figure 5.19 : Gros plan au MEB de l'interface entre une pale et une électrode (IMUPMRPM).....	70
Figure 5.20 : Gros plan au MEB du dégagement sous le coin d'une pale (IMUPMRPM)	70
Figure 5.21 : Contrôle par les tranches/extrémités.....	78
Figure 5.22 : Contrôle entre couches	78
Figure 5.23 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle par la tranche (simple épaisseur).....	80
Figure 5.24 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle par la tranche (double épaisseur)	80

Figure 5.25 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle sous la pale (simple épaisseur).....	80
Figure 5.26 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle sous la pale (double épaisseur)	80
Figure 5.27 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN simple couche à contrôle par la tranche.....	83
Figure 5.28 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN double couches à contrôle par la tranche.....	83
Figure 5.29 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN simple couche à contrôle par le dessous	84
Figure 5.30 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN double couches à contrôle par le dessous	84
Figure 5.31 : Vue au microscope optique de l'anomalie visuelle et du bris affectant le IMUPMRPN	85
Figure 5.32 : Test de la pointe pour vérifier le bon relâchement d'une rotor à contrôle par la tranche.....	86
Figure 5.33 : Test de la pointe pour vérifier le bon relâchement d'une rotor à contrôle par en dessous	86
Figure 5.34 : Deux échantillons IMUPMRPN de même modèle dont un au rotor brisé (1).....	87
Figure 5.35 : Deux échantillons IMUPMRPN de même modèle dont un au rotor brisé (2).....	88

Figure 5.36 : Image au MEB des traces de gravure dans le Poly0.....	89
Figure 5.37 : Reconstitution des étapes ayant mené au bris du rotor et à la gravure du poly0.....	90
Figure 5.38 : Présentation d'une solution au bris du rotor et à la gravure du poly0.....	93
Figure 5.39 : Image au MEB du relief d'une pale de rotor à contrôle par le dessous.....	94
Figure 5.40 : Image au MEB de la zone de blocage d'une pale de rotor à contrôle par le dessous	94
Figure 5.41 : Image au MEB du relief du dos d'une pale de rotor à contrôle par le dessous	95
Figure A.1 : IMUPMRPM - Toutes les couches.....	105
Figure A.2 : IMUPMRPM - POLY0.....	105
Figure A.3 : IMUPMRPM - ANCHOR1	105
Figure A.4 : IMUPMRPM - POLY1.....	105
Figure A.5 : IMUPMRPM - ANCHOR2 (surdimensionné).....	106
Figure A.6: IMUPMRPM - P1P2VIA	106
Figure A.7 : IMUPMRPM - POLY2.....	106
Figure A.8: IMUPMRPM - MÉTAL	106
Figure B.1 : Contrôle par la tranche - Toutes les couches (rotor simple couche).....	111
Figure B.2 : Contrôle par la tranche - POLY0.....	111
Figure B.3 : Contrôle par la tranche - ANCHOR1.....	111
Figure B.4 : Contrôle par la tranche - POLY1	111

Figure B.5 : Contrôle par la tranche - ANCHOR2.....	112
Figure B.6 : Contrôle par la tranche - P1P2VIA (rotor simple couche)	112
Figure B.7 : Contrôle par la tranche - POLY2 (rotor simple couche).....	112
Figure B.8 : Contrôle par la tranche - MÉTAL.....	112
Figure B.9 : Contrôle par la tranche - Toutes les couches (rotor double couche).....	113
Figure B.10 : Contrôle par la tranche - P1P2VIA (rotor double couche)	113
Figure B.11 : Contrôle par la tranche - POLY2 (rotor double couche)	113
Figure B.12 : Contrôle par le dessous - Toutes les couches (rotor simple couche)	114
Figure B.13 : Contrôle par le dessous - POLY0	114
Figure B.14 : Contrôle par le dessous - ANCHOR1	114
Figure B.15 : Contrôle par le dessous - POLY1	114
Figure B.16 : Contrôle par le dessous - ANCHOR2.....	115
Figure B.17 : Contrôle par le dessous - POLY2 (rotor simple couche).....	115
Figure B.18 : Contrôle par le dessous - P1P2VIA (rotor simple couche).....	115
Figure B.19 : Contrôle par le dessous - MÉTAL.....	115
Figure B.20 : Contrôle par le dessous - Toutes les couches (rotor double couche).....	116
Figure B.21 : Contrôle par le dessous - POLY2 (rotor double couche).....	116
Figure B.22 : Contrôle par le dessous - P1P2VIA (rotor double couche).....	116
Figure E.1 : Plan 3D du prototype Beta-EDM du Walking-Die	129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Comparaison entre bulk-micromachining et microfabrication de surface [Mado97].....	20
Tableau 3.1 : Description des couches du procédé MUMPs.	28
Tableau 3.2 : Paramètres de l'élément ROTARY SIDE DRIVE MOTOR.....	32
Tableau 3.3 : Légende de la Figure 3.3.....	33
Tableau 3.4 : Paramètres de l'élément JOURNAL BEARING.....	34
Tableau 3.5 : Légende de la Figure 3.5.....	35
Tableau 5.1 : Paramètres de l'élément de librairie ROTARY SIDE DRIVE MOTOR pour IMUPMRPM (valeurs en μm)	49
Tableau 5.2 : Paramètres de l'élément de librairie JOURNAL BEARING pour IMUPMRPM (valeurs en μm)	49
Tableau 5.3 : Résumé du code de couleurs des dessins de masques.....	50
Tableau 5.4 : Codes combinaisons IMUPMRPM.....	52
Tableau 5.5 : Distributions des échantillons reçus pour IMUPMRPM	59
Tableau 5.6 : Paramètres de ROTARY SIDE DRIVE MOTOR pour IMUPMRPN (en μm)	81
Tableau 5.7 : Paramètres de l'élément de librairie JOURNAL BEARING pour IMUPMRPN (en μm).....	81
Tableau C.1 : Tableau récapitulatif des données nécessaires au calcul des forces	118

Tableau C.2 : Tableau des distances pale/électrode.....	119
Tableau C.3 : Tableau des rayons moyens des rotors à l'interface électrode/pale	120
Tableau C.4 : Tableau des surfaces d'interface aux électrodes	122
Tableau D.1 : Forces tangentielles (IMUPMRPM et IMUPMRPN)	126
Tableau D.2 : Forces normales (IMUPMRPM et IMUPMRPN).....	128

LISTE DES ACRONYMES

0301MU	Désigne le premier cycle de fabrication de l'année 2003 pour le procédé MUMPs dans le calendrier de la CMC.
0401MU	Désigne le premier cycle de fabrication de l'année 2004 pour le procédé MUMPs dans le calendrier de la CMC.
CMC	Société Canadienne de Microélectronique (<i>Canadian Microelectronic Corporation</i>)
DRC	<i>Design Rules Check</i>
DRIE	Deep Reactive Ion Etching
GRM	Groupe de Recherche en Microélectronique
IMUPMRPM	et (I) préfixe des codes de fabrication (MU) MUMPs (PM) École
IMUPMRPN	Polytechnique de Montréal (RPM/N) version du design
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MUMPS	<i>Multi User MEMS Processes</i>
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PSG	<i>Phospho-Silicate Glass</i>
RFI	Demande de fabrication (<i>Request For Implementation</i>)
STM	Microscope à effet tunnel (<i>Scanning Tunneling Microscope</i>)

INTRODUCTION

Ce mémoire a pour but de présenter le travail accompli en vue de concevoir un micromoteur électrostatique qui servira de mécanisme de déplacement à un microrobot. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Walking-Die mené au laboratoire de NanoRobotique de l'École Polytechnique de Montréal sous la direction du professeur Sylvain Martel. Le projet Walking-Die vise la fabrication d'un microrobot capable d'interaction à l'échelle nanométrique.

La fabrication et la mise en fonction de micromoteurs électrostatiques en couches minces à contrôle par la tranche remonte à aussi loin que le début des années 90 [HiKa91]. Déjà à l'époque, rotor et stator étaient faits dans la même couche de silicium poly-cristallin épaisse de $2\mu\text{m}$, la vitesse atteignait les 15000 tours par minute et la durée de vie dépassait la semaine. Aujourd'hui, ce même micromoteur produit typiquement une force de l'ordre du μN . C'est juste assez pour déplacer un disque de quelques millimètres de diamètre [Mado02]. Ce modèle de micromoteur et cette technique de microfabrication se complètent bien car ils tirent mutuellement profit de leurs avantages et inconvénients. Les forces électrostatiques sont le fruit d'un effet capacitif et la microfabrication en couches minces offre une haute densité de courant en contre partie du faible rapport d'aspect des structures produites [TSME03]. Elle offre également un très faible courant de fuite et un bon contrôle des distances jusqu'au micron près. La densité de courant par unité de volume est d'ailleurs un des gros avantages du

micromoteur électrostatique sur sa version électromagnétique [XSS02]. À cela s'ajoute une plus grande capacité de miniaturisation et la simplicité d'assemblage.

Pour représenter fidèlement le comportement d'une microstructure électrostatique en couches minces, un travail minutieux de simulation est nécessaire [KFJa03]. Plusieurs paramètres sont à surveiller : la géométrie de la structure, les propriétés des matériaux après la fabrication, les variations de procédé (variations d'épaisseurs de couche, restes d'oxyde, sur/sous gravure, désalignement de masques, etc.), la variation de la capacité avec la tension appliquée ou le déplacement de la structure, et le caractère non rigide des couches minces. Plusieurs de ces paramètres sont interdépendants. Ne pas les considérer tous revient à faire une simulation par modèle d'ordre réduit. Cette simulation substitue à l'exhaustivité des variables l'établissement d'hypothèses de départ. Le modèle ainsi obtenu ne peut plus être qualifié de fidèle mais de satisfaisant et la fiabilité des résultats s'en ressent car ils doivent toujours être pris dans un contexte précis.

Trouver la géométrie optimale pour un micromoteur électrostatique à contrôle latéral est également fastidieux car il faut évaluer des combinaisons rotor/stator en jouant, entre autres, sur le nombre de pales et d'électrodes et les distances les séparant [JDBG94]. Cette tâche itérative doit impérativement être automatisée pour avoir un intérêt parce que les minimum/maximum locaux sont nombreux pour certaines combinaisons de paramètres. Les règles de base suivantes ont été tirées de ces expériences : le rotor doit être excité symétriquement (par des électrodes diamétralement opposées du stator) pour minimiser la force radiale sur l'axe de rotation et le torque potentiel diminue avec l'augmentation du rapport longueur de pale sur rayon du rotor. Après vient la question

du contrôle optimal de la rotation du rotor [KuGa00] afin d'obtenir des transitions douces et précises lorsque les pales passent d'une électrode à l'autre.

Il y a peu de « design kits » (environnements complets de développement) MEMS sur le marché car les différentes tentatives de montage d'un flot de conception ont montré qu'un tel flot couvrirait les domaines des génies physiques (simulation du procédé de fabrication), mécaniques (modélisation par éléments finis) et électriques (schémas équivalents) en plus d'avoir une forte dépendance au procédé de fabrication [CMC02]. Pour répondre à de tels besoins les outils ont doivent évoluer encore afin d'offrir un ensemble homogène. Trois compagnies s'affrontent actuellement sur ce terrain : Coventor inc., Intellisense Corp. et MEMSCAP inc.

Contrairement aux procédés CMOS qui accommodent plusieurs produits, les fonderies MEMS commerciales n'ont, à l'heure actuelle, que deux solutions pour rester sur le marché : offrir une plateforme multi-produits (comme le procédé MUMPS) ou développer un procédé de fabrication pour chaque client. L'avantage de la plateforme multi-produits est qu'elle permet à la fonderie de rentabiliser ses coûts de développement de procédé tout en donnant aux clients un moyen contraignant mais rapide de tester la faisabilité de son projet. La seconde option est réservée exclusivement à la production de masse et elle présente la particularité de lier le client à la fonderie que ce soit dans les succès comme dans les échecs. Les négociations sont donc généralement assez longues entre les deux parties car quand il est question de MEMS, les coûts de départ sont gros et ils ne peuvent être amortis que sur plusieurs millions de dispositifs vendus, c'est-à-dire plusieurs années.

Les choix de technologie de fabrication, les dessins de masques pour plusieurs modèles de micromoteurs, des éléments de modélisation théorique permettant d'évaluer la force disponible et le comportement des structures en plus d'images de structures fabriquées sont exposés dans le présent document. Suite à des erreurs de design, aucun résultat de tests mécaniques ne peut être présenté mais une analyse détaillée des problèmes rencontrés, des solutions et des versions de design alternatives sont proposées. Ce mémoire se concentre avant tout sur les parties dessin technique et compréhension du procédé de microfabrication attachées à la conception d'un micromoteur électrostatique en couches minces.

Dans le présent mémoire, les noms des masques de photolithographie seront écrits en majuscules pour les différencier des noms de couches du procédé. Ainsi, le masque POLY0 décrit la géométrie dans le plan de la couche Poly0).

CHAPITRE 1. Cahier des charges et contraintes de conception

Le présent chapitre fait la présentation des requis du système en terme de performances mécaniques et de dimensions physiques, ainsi que celle des contraintes de conception associées à l'intégration du micromoteur.

1.1. Introduction au projet Walking-Die

Le projet Walking-Die vise la fabrication d'un microrobot autonome capable d'interactions à l'échelle nanométrique [ADM03]. Par autonome, nous entendons que le Walking-Die gère son alimentation électrique et embarque la totalité des éléments nécessaires à son activation. Ainsi, l'alimentation électrique du microrobot se fait par captation d'énergie au sol et il porte une pointe de STM [Chen93] qui lui permettra de faire l'analyse nano et microscopique d'éléments sur son chemin.

Le projet Walking-Die nécessite une capacité de déplacement submicronique. L'objectif ultime étant la possibilité de déplacer la pointe de STM avec une précision d'une dizaine de nanomètres. Les dimensions maximales cibles du robot sont inférieures à 5mm. Toute l'électronique de contrôle sera implantée sur une puce unique selon une architecture System On Chip. La gravure sera faite en $0.18\mu\text{m}$ et un système de vérification sera intégré.

1.2. Comparaison avec le Nanowalker

Le présent travail de maîtrise intervient au niveau de la nécessité de fournir au Walking-Die une source de motricité. Notre point de départ étant le travail qui a été effectué par les équipes précédentes sur le projet Nanowalker [MSHQ01, MDMH99] dont le système moteur est constitué de deux transformateurs DC-DC et de trois pattes piézo-électriques. Un troisième convertisseur est dévolu au contrôle de la pointe de STM. Les DC-DC transforment les 12V captés du plancher d'alimentation en 150V nécessaires à la déflexion des pattes dont le contrôle entraîne le déplacement du Nanowalker. Ce projet est également en développement mais à un stade plus avancé. Il vise la construction d'un mini-robot autonome et précis au nanomètre près dans ses déplacements et ses manipulations. Sa hauteur et son diamètre sont d'environ 3cm. Il est muni d'une pointe de microscope à effet tunnel fixe qui lui sert à analyser la surface au dessus de laquelle il évolue.

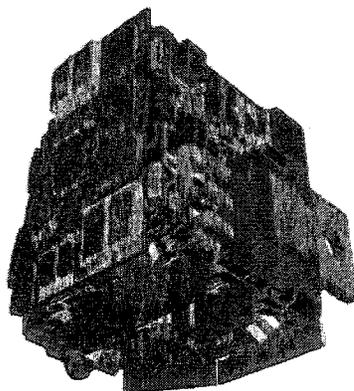


Figure 1.1 : Image 3D du robot Nanowalker

Avec une dimension maximale de moins de 5mm, le Walking-Die permettra d'atteindre une plus haute densité de robots par unité de surface. De plus, la diminution des dimensions par rapport au Nanowalker entraînera un abaissement significatif de la fréquence de résonance du Walking-Die et lui confèrera une meilleure tolérance aux vibrations ambiantes. Pour parvenir à cette miniaturisation, les éléments les plus volumineux du Nanowalker ont été identifiés comme étant ses pattes et ses transformateurs DC-DC (Figure 1.1 : Image 3D du robot NanowalkerFigure 1.1).

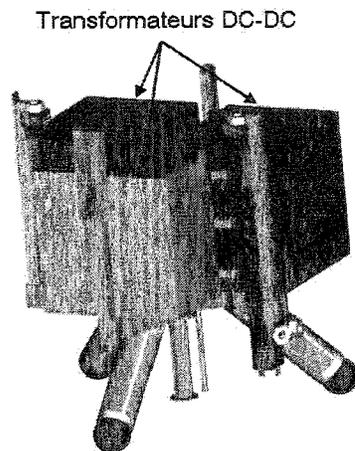


Figure 1.2 : Pattes et convertisseurs DC-DC du Nanowalker [MCOF01]

Le choix de la longueur des tubes piézo-électriques des pattes a été dicté par l'amplitude de déflexion de ces dernières tandis que les dimensions des transformateurs sont justifiées par le gain nécessaire pour passer de 12 à 150V en tension continue. Cependant, cette amplification passe par une dissipation de chaleur de l'ordre des 1.25W par transformateur. Une telle dissipation pour de si petites surfaces s'accompagne d'une surchauffe importante du robot. Surchauffe qui nécessite l'usage d'une chambre de

refroidissement [MSBR03] afin de garder le robot dans sa plage de températures de fonctionnement. Donc pour réduire la taille des pattes il faudrait des transformateurs plus gros alors que réduire les transformateurs demanderait des pattes plus longues.

La situation peut se résumer ainsi : la céramique utilisée est déjà l'une des plus efficaces disponibles sur le marché et les convertisseurs DC-DC génèrent une quantité de chaleur considérable en plus de prendre de l'espace. Ce constat se solde par la nécessité de développer un autre système de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. Et pour augmenter le champ de recherche, il est décidé de privilégier la taille et la précision sur la vitesse des déplacements dans la conception du Walking-Die.

1.3. Extraction des requis

Avec le temps il y a eu une évolution notable du design du robot. Tout ce travail de modélisation échoit au responsable de la partie intégration du projet. Comme la motricité est la pierre angulaire du projet, la première version numérique du Walking-Die est basée sur les couches minces (cf. Figure 1.3). Chaque pièce du robot est imaginée avec un important rapport épaisseur sur largeur (longueur). Le poids envisagé est d'environ 1 à 3mg et la hauteur du robot : 5mm. Il n'y a alors pas de considération détaillée des questions d'alimentation électrique, de friction et d'assemblage. Il faut comprendre que cette première version servait véritablement d'esquisse et que la continuité du projet se basait sur la capacité motrice. Donc il était attendu du moteur la capacité de propulser 5 à 6mg plutôt que 1 à 3mg. Cette différence permettait de tenir compte du fait que la moitié de la force motrice serait consommée par les forces de friction.

Entre l'obtention des premiers résultats théoriques et la réception des premiers échantillons, un modèle plus élaboré fut commencé (cf. Figure 1.4). Comme les échantillons reçus étaient tous mécaniquement inutilisables, de nouveaux devaient être commandés. Avec une meilleure définition des spécifications du robot, un poids et des dimensions précis les plans des anciens échantillons ont été réajustés. Les détails des calculs sont disponibles aux annexes D et E.

La troisième version du robot est présentée à titre indicatif seulement. Elle est le fruit du raffinement de la version précédente avec prise en compte des questions de routage et d'assemblage.

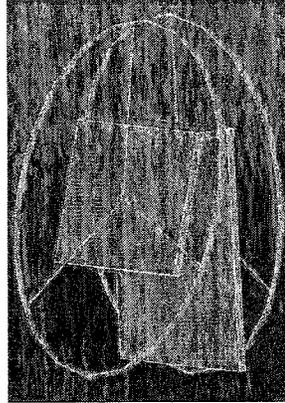


Figure 1.3 : Modèle 3D de la première version du robot Walking-Die

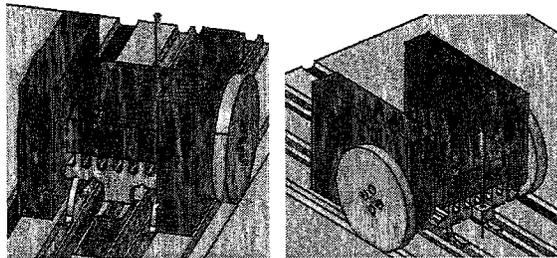


Figure 1.4 : Modèle 3D de la deuxième version (Beta EDM) du robot Walking-Die

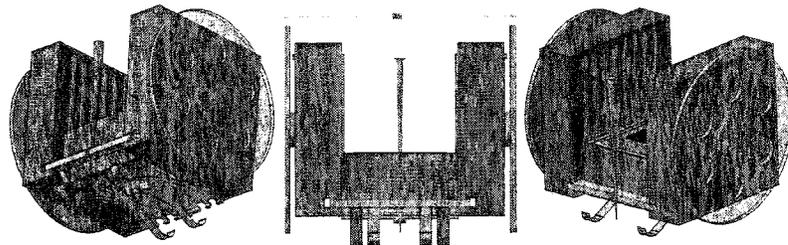


Figure 1.5 : Modèle 3D de la troisième et dernière version du robot Walking-Die

En partant des points soulevés au début de la présente section, les requis qui guideront la conception de notre moteur sont résumés ici :

- Dimensions respectant les limites fixées pour le Walking-Die (moins de 5mm) ;
- Masse minimale pour maximiser l'efficacité du moteur ;
- Faible consommation de puissance pour une faible dissipation thermique ;
- Fonctionnement électrique pour faciliter l'intégration avec l'électronique et favoriser l'homogénéité du système ;
- Précision contrôlable.

Ces requis sont relativement larges car le robot est construit autour de son moteur. Et ce moteur est principalement soumis à un besoin important de diminution de ces dimensions et de maximisation de sa force. Comme nous le verrons dans les sections suivantes, toutes les catégories de micromoteurs ne peuvent pas satisfaire ces requis.

Afin d'atteindre un facteur d'intégration maximale des éléments mécaniques et électriques, l'usage d'un substrat unique a été considéré pour loger l'ensemble des éléments du robot. Cependant, la réduction importante de la liberté de design et le coût d'accès à la technologie écartent cette option.

Il est important de souligner la particularité du micromoteur que nous cherchons à concevoir. En effet, si la majorité des designs rencontrés dans la littérature ont pour finalité de déplacer un rotor le plus vite possible, notre micromoteur devra être intégré dans un système robotique complet. Il devra permettre son interfaçage à de l'électronique et assurer la mobilité contrôlée d'un microrobot.

1.4. Évaluation de la puissance et de la force nécessaires

La puissance et la force d'un micromoteur sont mesurées par des tests mécaniques sur des structures déjà fabriquées. Elles peuvent cependant être évaluées par des équations physiques qui permettent de calculer la borne inférieure de la force qui peut être développée. Ces équations sont présentées dans le CHAPITRE 4.

Notre objectif primaire lors de la conception des premiers échantillons était d'obtenir un micromoteur fonctionnel reproduisant les résultats de la littérature (cf. INTRODUCTION). Des forces de l'ordre du μN ont déjà été obtenues mais pour les quelques milligrammes du Walking-Die quelques nano Newton suffiront. Selon la seconde loi de Newton : 1N est la quantité de force nécessaire pour accélérer une masse de 1 kg à 1m/s^2 . Notre objectif sera donc de produire l'équivalent d'une dizaine de nN pour être en mesure de contrer les forces de friction et d'avoir encore de la force disponible à l'accélération.

Avec la fabrication de la deuxième génération de moteur, les valeurs requises se sont précisées et la démarche de calcul est exposée à l'annexe E.

CHAPITRE 2. Technologie de fabrication

Ce chapitre se veut une discussion sur le choix du type de micromoteur et de la technique de microfabrication qui sont employés. En regroupant toutes les techniques utilisées en microfabrication, il est possible de distinguer cinq catégories de matériaux [Fedd03]: les matériaux-substrats, les matériaux structurels, les matériaux sacrificiels, les matériaux de surface et les matériaux actifs.

Les matériaux-substrats et les matériaux structurels sont respectivement les constituants de la base mécanique sur laquelle repose une microstructure et les constituants des microstructures elles-mêmes. Ils se distinguent des autres catégories de matériaux principalement par leur persistance à travers le procédé. Leurs caractéristiques clés dépendent du domaine d'usage de la microstructure constituée. Elles sont généralement : le module de Young, le stress résiduel, les conductivités thermique et électrique, en plus de la stabilité à long terme de ces caractéristiques. Ces matériaux peuvent être de même nature. Parmi eux nous pouvons citer : le nitrure de silicium, le polysilicium (ou silicium poly-cristallin), le silicium monocristallin et le carbure de silicium.

Les matériaux sacrificiels sont gravés en partie ou complètement durant le procédé. Ils servent généralement de moule pour les matériaux structurels : une fois déposés, les matériaux structurels sont « libérés » par gravure du matériau sacrificiel qui les a tenus dans la position (avec la forme) désirée. Ces matériaux sont généralement des oxydes et leurs caractéristiques clés sont : un comportement diélectrique et la capacité de capturer les impuretés, de protéger de l'humidité, de transférer des dopants et d'encaisser des

égratignures. Comme exemple, nous pouvons citer le dioxyde de silicium (SiO_2) et les Phospho-Silicate Glass (PSG).

Les matériaux de surface servent de protection temporaire ou permanente aux microstructures. Dans cette catégorie se retrouve à peu près n'importe quel matériau compatible chimiquement, mécaniquement ou électriquement avec le matériau dont la microstructure est constituée. La différence entre les matériaux sacrificiels et les matériaux de surface tient dans leur ordre d'intervention au cours du procédé : avant la constitution de la microstructure pour les matériaux sacrificiels et après pour les matériaux de surface.

Finalement les matériaux actifs sont ceux qui ont la capacité d'interagir sur plus d'un domaine d'énergie : mécanique à électrique, thermique à électrique, etc. Les matériaux piezorésistifs et piezoélectriques en sont des exemples. Ces matériaux ont toujours un usage lié directement à la fonction de la microstructure et ils sont assimilables aux matériaux structurels. Cependant ils sont répertoriés séparément car tous les matériaux structurels ne sont pas actifs et les éléments faits en matériaux actifs sont rarement intégrés à la microstructure : ils s'y ajoutent comme un appendice.

Les références qui se rapportent aux MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) [Mado02] dans la littérature sont abondantes. La superposition des requis du Walking-Die (cf. CHAPITRE 1) sur les caractéristiques des microstructures électromécaniques indique que se trouvent parmi elles la solution recherchée.

2.1. Choix du type de micromoteur

En terme de transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, il existe quatre grandes catégories de micromoteurs MEMS : les piézo-électriques, les électrostatiques et les électromagnétiques.

Les moteurs piézo-électriques offrent les plus grandes densité d'énergie et tolérance à la rugosité de surface des pièces. Ils permettent que le couple moteur soit maintenu même sans application de tension, ne nécessitent que quelques volts pour fonctionner et ne présentent pas de restriction dans le choix de matériau du rotor [Mado02]. Cependant, la quantité de matériau nécessaire au déplacement du rotor est proportionnelle à la déflexion voulue ce qui en limite les possibilités de miniaturisation vers l'ordre de grandeur recherché. Les deux options restantes sont donc les micromoteurs électrostatiques et électromagnétiques.

2.2. Comparaison entre micromoteurs électrostatiques et électromagnétiques

À travers la littérature, cette comparaison revient souvent et la préférence des auteurs ne va que rarement aux micromoteurs électromagnétiques [XSS02]. En effet, ils souffrent du fait que leur constitution (enroulements et de matériaux ferromagnétiques) limite leur dimension minimale au millimètre (cf. Figure 2.1). De plus le poids de ces éléments pénalise grandement l'efficacité du moteur.

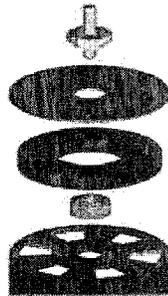


Figure 2.1 : Vue éclatée d'un micromoteur électromagnétique [KEMN00]

De l'autre côté, le fonctionnement des micromoteurs électrostatiques fait appel à une force qui agit entre des surfaces dont l'épaisseur peut être réduite aux limites mécaniques de la structure. Ainsi, leurs poids et leurs tailles sont beaucoup plus faibles que ceux des micromoteurs électromagnétiques pour une même puissance disponible. De plus, les micromoteurs électrostatiques intégrés dans un circuit électronique ont un effet capacitif qui réduit de beaucoup les parasites, les pertes en énergie [Mado02] et le courant nécessaire. Contrairement à l'effet inductif des micromoteurs

électromagnétiques qui engendre des pertes en chaleur et des possibilités de saturation qui sont un autre facteur jouant contre leur capacité à être miniaturisés.

La littérature rapporte d'autres points de comparaison mais dans l'ensemble elle indique que si les micromoteurs électromagnétiques sont applicables à notre projet, les micromoteurs électrostatiques pour un même résultat permettraient de réduire encore plus les dimensions de design.

2.3. Microfabrication en couches minces ou bulk-micromachining

La microfabrication en couches minces (ou de surfaces) et le bulk-micromachining sont les deux principaux procédés de fabrication disponibles pour obtenir un actuateur MEMS [Fedd03]. Passer à travers les différentes étapes de ces procédés permet d'observer que plusieurs techniques communes les rapprochent : la photolithographie, l'oxydation, la déposition chimique à basse pression (LPCVD) et la déposition chimique au plasma (PECVD) [Mado02].

En microfabrication de surfaces, tous les matériaux sont déposés ou crus en couches sur le substrat. Ces couches sont généralement comprises entre quelques dizaines de angströms et 2 à 4 microns en fonctions du matériau et de la technique de dépositions (croissances). L'usage de résines épaisses en conjugaison avec les matériaux sacrificiels permet de déposer jusqu'à une dizaine de microns de matériaux structurels. Le matériau

structurel de prédilection pour ce procédé est le silicium poly-cristallin ou polysilicium. Comme toutes les couches sont déposées les unes sur les autres, chaque couche fait subir aux précédentes ses étapes de procédé et subit les contraintes mécaniques (topologie) ou chimiques (dopant) de celle qui la précède. Or les propriétés de chaque couche sont déjà intimement liées à son étape du procédé. Il y a donc surmultiplication des variables à contrôler durant la microfabrication en couches minces pour obtenir une uniformité des produits du procédé. Il est à noter que ces mêmes variables donnent une grande possibilité de création de formes et d'agencement des couches. Ainsi les structures complexes sont souvent plus faciles à bâtir en couches minces car la complexité des formes se prête bien au caractère interactif des couches. De plus l'assemblage se fait au fur et à mesure que la structure est construite tandis qu'en bulk-micromachining, fabrication et assemblage sont souvent deux étapes distinctes.

Le bulk-micromachining est basé sur la gravure directe du substrat. La matière première d'une structure ainsi fabriquée est donc le monocristal de silicium qui constitue le substrat. Ce matériau a de meilleures caractéristiques électroniques et mécaniques que polysilicium. Selon la technique de gravure employée, la forme de la structure sera plus ou moins affectée par l'orientation cristalline des mailles moléculaires du substrat. Les gravures par Deep Reactive Ion Etching (DRIE) peuvent creuser des tranchées de 300 μm de profond aux parois quasiment orthogonales à une vitesse de 2 à 5 $\mu\text{m}/\text{minute}$ [Mado02]. Typiquement un substrat de silicium a une épaisseur variant entre 300 μm et 600 μm . Les dimensions structurelles étant le fruit de la conjugaison de la technique de gravure et du matériau structurel, les structures obtenues par bulk-micromachining sont

potentiellement plusieurs dizaines de fois plus hautes que celles en couches minces [Fres98]. Quant aux dimensions latérales, les limites du contrôle du stress résiduel dans les couches minces permettent rarement de dépasser les 500 μ m tandis qu'une structure en monocristal de silicium peut atteindre les 5mm d'envergure.

Pour fabriquer un micromoteur électrostatique à des fins d'intégration, il faut considérer deux facteurs propres au moteur : les aires des interfaces d'interaction électrostatique et le poids du moteur ; en plus de la force requise pour le fonctionnement du système. Dans le cadre de notre projet, un facteur supplémentaire s'ajoute à l'équation : l'accessibilité, principalement en terme d'infrastructure. Pour nos requis, la comparaison entre ces deux techniques [Mado02] ne donne pas vraiment de vainqueur. La microfabrication de surface s'intègre mieux à une circuiterie CMOS et permet une plus grande flexibilité de design mais le bulk-micromachining permet de profiter d'un plus important rapport d'aspect au niveau des structures mécaniques, donc plus de force. La dimension maximale acceptable pour le Walking-Die est, certes, de 5mm mais le but est également de le réduire à des dimensions minimales. Le tableau suivant (cf. Tableau 2.1) présente un résumé des principaux points de comparaison entre les deux techniques :

Tableau 2.1 : Comparaison entre bulk-micromachining et microfabrication de surface [Mado97]

Bulk-micromachining	Microfabrication de surfaces
Dimensions larges avec des masses et des épaisseurs substantielles (jusqu'à 300 μ m)	Petites dimensions avec faibles épaisseurs (1 à 10 μ m) et masses
Utilisation des deux côtés de la gaufre	Besoin de plusieurs dépôts et gravures de couches pour obtenir une structure
Une à plusieurs gaufres d'épaisseur possible	Hauteur de la structure finale limitée par l'épaisseur des couches déposées avec possibilité d'adhérences non désirées
Applications piézorésistives, mécanismes de captation capacitive et par résonance	
Les gaufres peuvent être fragiles en bout de chaîne de production	La propreté de l'espace de production est critique vers la fin de la chaîne de production
Assemblage, emballage et test difficiles	
Plusieurs produits et unités de production matures en fonction	
Problèmes de compatibilité avec les circuits électroniques (contamination de procédé)	Intégration naturelle quoique compliquée avec les circuits électroniques

Dans le but d'atteindre une intégration et une homogénéité maximale du système final (le microrobot Walking-Die), c'est la microfabrication de surfaces qui devrait être choisie. De plus, il y a une grande disponibilité des ressources de conception lui étant associées à l'École Polytechnique de Montréal. L'École possède d'ailleurs une grande

expertise de génie Physique dans ce domaine. Et en tant que membres du GRM, la CMC nous donne accès à des outils de conception logiciel et à un procédé de fabrication éprouvé pour cette technique. Finalement d'un point de vue structural, il y a deux façons de faire croître une force électrostatique : en agrandissant l'aire des interfaces ou en diminuant la distance qui les sépare. Agrandir l'aire des interfaces équivaut à accroître la taille de la microstructure dans au moins une dimension. Pour le bulk-micromachining, cette augmentation peut se faire sur les trois axes (x, y, z) tandis qu'en couches minces, elle est limitée en hauteur (épaisseur : z). De plus, comparée au bulk-micromachining, l'augmentation est aussi limitée dans le plan car le stress résiduel aura vite fait de courber, voire même briser, une couche trop vaste. Donc dépendamment de la taille du micromoteur, les deux technologies sont équivalentes et avec l'accroissement des dimensions, l'avantage va au bulk-micromachining. Concernant la distance entre les interfaces, c'est une question de résolution de gravure pour le bulk-micromachining mais également d'épaisseur de couche pour la microfabrication en couches minces. La résolution de gravure relève des capacités du procédé et le contrôle d'épaisseur de couche l'emporte sur la finesse de gravure. Donc avantage aux couches minces dont les faibles épaisseurs permettent une meilleure résolution.

C'est la question des outils de développement qui fait vraiment pencher la balance. Nous sommes beaucoup plus familiers avec ceux de la fabrication en couches minces que ceux du bulk-micromachining.

CHAPITRE 3. Outils de conception et procédé d'usinage

Il n'existe pas de flot de conception standard pour un MEMS. D'une part parce qu'il en existe plusieurs catégories et d'autres parts parce que la technologie associée à ces structures est encore relativement jeune. Si le premier MEMS recensé, à savoir une grille de MOS résonante [Nath67], date des années 60, les différentes initiatives prises à ce jour commencent seulement à converger vers un flot de conception unifié.

Dans le cas spécifique de la conception d'un micromoteur électrostatique, il existe également plusieurs approches. Certaines demandent des compétences pluridisciplinaires importantes (notamment dans les domaines des génies électrique, physique et mécanique), d'autres sont étroitement liées à des outils logiciels particuliers [CMC02]. Cependant elles convergent toutes vers les mêmes étapes : dessin des plans, modélisations électriques et mécaniques pour prévision de la force disponible et du comportement, puis fabrication. L'étape de modélisation est très souvent la plus importante et elle fait intervenir outils mathématiques et moteurs de calculs par éléments finis [JHB96]. En nous appuyant sur des designs classiques et documentés, nous réduisons la durée de l'étape de modélisation. Cette étape à elle seule peut compter jusqu'à 60% du temps total de conception. Cependant, il est bon de préciser que la plupart des outils de conception de MEMS en couches minces peuvent être couplés avec un outil de simulation multi-physique ou multi-domaine (mécanique, électrique,

thermique, etc.) quand ils n'en intègrent pas déjà un. Le module de conversion vers l'outil multi-physique nécessite souvent l'achat d'une licence logicielle supplémentaire. Le principe est le suivant : un module d'émulation de procédé de fabrication en couches minces génère un modèle tridimensionnel à partir des dessins de masques du MEMS et d'une description des étapes du procédé par masque. Le modèle 3D est ensuite introduit dans le simulateur multi-physique à l'aide d'un module de conversion. La capacité de génération du module d'émulation de procédé de fabrication vient alors jouer sur la qualité de la simulation. Mais elle en est généralement augmentée car le modèle généré est plus réaliste qu'une simple extraction verticale des dessins de masques. Le concepteur sauve ainsi l'étape de dessin de son MEMS dans l'outil multi-physique mais doit encore définir et raffiner ses paramètres de simulation.

3.1. Présentation de l'outil de dessin L-Edit

Notre principal outil de conception est un éditeur de dessins de masques : L-Edit v8.20. Ce logiciel fait partie de la suite d'outils d'aide à la conception de MEMS : MEMS Pro v3.00 de la compagnie MEMsCAP. Principalement orientée vers la microfabrication de surface, cette suite est accompagnée d'une librairie de composants. Ces composants sont des dessins de masques d'éléments de base pour les principaux types de structures concevables en couches minces. Il est à noter que MEMS Pro offre également un outil de modélisation électrique : S-Edit. Cependant, il n'existe pas de module de transfert automatique de l'éditeur de dessins de masques vers le modélisateur électrique ni inversement. En lieu et place vient s'ajouter un autre outil qui permet d'extraire le comportement électrique de la structure dessinée et d'en faire la correspondance avec des éléments électroniques de base (résistances, condensateurs, inductances, sources de tension, sources de courant, etc.) passifs et actifs : L-Edit/Extractor. Finalement, ce dernier outil permet de comparer le modèle obtenu par extraction avec celui que le concepteur aura précédemment utilisé pour simuler le comportement électrique de sa structure.

Voici un résumé du flot de conception proposé avec l'outil :

1. Établir les spécifications électriques de la structure finale ;
2. Modéliser électriquement ces spécifications et les simuler ;
3. Faire les dessins de masques ;
4. Extraire le modèle électrique de la structure dessinée ;
5. Comparer modèle simulé et modèle extrait.
6. Reprendre le point 2 ou commencer au point 3 si besoin ait jusqu'à satisfaction.

Ce flot présente l'avantage d'être très accessible aux personnes familières avec l'électronique et possédant des notions de base en microfabrication de couches minces. Toute la partie mécanique et physique du travail de conception d'un MEMS est occultée par besoin de simplification. Une telle simplification présente le désavantage de cacher plusieurs étapes du processus réel (modélisation mécanique, défauts de fabrication, composition chimique des matériaux, etc.) en les remplaçant par des biais. L'application de ces biais a pour résultat la diminution de la fiabilité des simulations et des extractions faites par les outils de MEMS Pro. Donc au final, si la structure à un comportement prévisible, ce dernier l'est suivant des paramètres précis et sur des intervalles restreints. Notre approche de conception nous évite d'être exposés à ce genre de contraintes puisque nous adoptons un design documenté et nous l'implantons de façon à obtenir une bonne tolérance aux aléas de fabrication et de modélisation (cf. CHAPITRE 2).

3.2. Présentation du procédé MUMPS

Le procédé MUMPs (Multi User MEMS Processes) [MUMP01] est un procédé associé à une technique de microfabrication de surface à trois couches minces de polysilicium, deux couches d'oxydes et une couche de métallisation. C'est l'usage combiné et stratégique des couches de polysilicium et des oxydes (couches sacrificielles) qui résulte en une structure électromécanique. Il est à noter qu'il s'agit d'un procédé de production de masse qui permet la fabrication simultanée de plusieurs structures différentes par gaufre. Les valeurs d'épaisseurs de couches et autres paramètres de fabrication ont été choisis par le manufacturier afin d'accommoder le plus de concepteurs possibles. Le procédé est présenté comme un outil de prototypage dont la justification première est d'établir des preuves de faisabilité (proof of concept). Cependant il a été amélioré en plusieurs itérations depuis le Berkeley Sensors and Actuators Center (BSAC) de l'Université de Californie (début des années 90) jusqu'au manufacturier américain Cronos Integrated Microsystems. Cronos est aujourd'hui le fournisseur exclusif des services de fabrication selon le procédé MUMPs et ses dérivés. Ancienne division MEMS de la compagnie JDS Uniphase, Cronos a été acquis à la fin de l'année 2002 par la compagnie MEMScAP [SCAP02].

Le procédé MUMPs compte 7 couches (en ordre d'application) : nitrure de silicium, polysilicium 0, oxyde 1, polysilicium 1, oxyde 2, polysilicium 2 et métal (cf. Figure 3.1). La gravure des oxydes est faite par immersion dans du HF et le procédé se termine par une vaporisation de CO₂ à l'état supercritique.

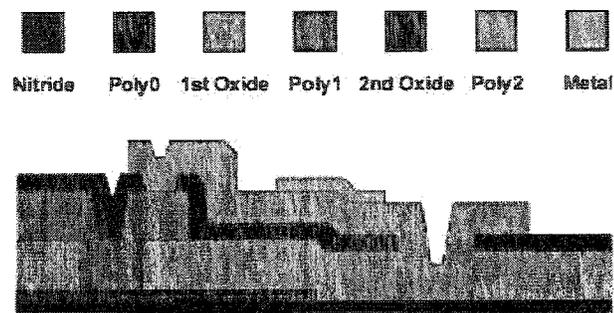


Figure 3.1 : Les 7 couches du procédé MUMPs.

Tableau 3.1 : Description des couches du procédé MUMPs.

NOM DE COUCHE	MATÉRIAU	ÉPAISSEUR TYPIQUE (en μm)	NOM DE MASQUE
Nitruire	Si_3N_4	0.6	
Poly0	Poly-Si	0.5	POLY0 (HOLE0)
Ox1	PSG	2.0	DIMPLE
			ANCHOR1
Poly1	Poly-Si	2.0	POLY1 (HOLE1)
Ox2	PSG	0.75	POLY1_POLY2_VIA
			ANCHOR2
Poly2	Poly-Si	1.5	POLY2 (HOLE2)
Métal	Or	0.5	METAL (HOLEM)

Seules les six dernières couches sont configurables à l'aide de huit masques. La couche de nitruire de silicium sert d'isolant thermique, électrique, chimique et mécanique entre le substrat et la structure. Les propriétés de ce composé, que l'on assimile à une céramique, en font une couche de base idéale [Mado02] dans le processus de fabrication d'un MEMS : faible stress de surface, haute rigidité, tolérance aux hautes températures, aux chocs thermiques, à l'usure, à la fatigue et à l'oxydation.

Les oxydes, dont la principale fonction est celle de couche sacrificielle, sont constitués de dioxyde de silicium (SiO_2) dopé au phosphore (Phospho-Silicate Glass ou PSG) dans

une concentration massique de 2 à 8%. Ce dopage a pour but principal d'abaisser le point de fusion du SiO_2 d'environ 300°C [Mado02] afin de permettre la déposition de vapeur chimique à faible pression ambiante (LPCVD).

La forme de la première couche d'oxyde obéit à 2 masques dont les effets sont identiques mais pas les fonctions. Le masque ANCHOR1 indique les portions de couche volontairement absentes pour produire un contact entre Poly0 et Poly1 (cf. Figure 3.1). Le masque DIMPLE permet de faire des ouvertures carrées de faibles dimensions (2 microns de côtés) dans l'oxyde. L'application de la couche de polysilicium suivante (Poly1 sur Ox1) mènera à la formation de pointes de polysilicium à travers l'oxyde. Ces pointes, telles des pieds de table, tiennent Poly1 au-dessus de Poly0 après la libération de la structure. La hauteur des pointes correspond à l'épaisseur de l'oxyde.

Dans le cas de la seconde couche d'oxyde, les masques fournis sont : POLY1_POLY2_VIA et ANCHOR2. Le premier sert à indiquer les ouvertures dans l'oxyde courant s'il y a une couche de Poly1 en dessous tandis que ANCHOR2 sert à indiquer les ouvertures lorsqu'il y a directement le premier oxyde en dessous. Après l'application du second oxyde, Poly1 est pris entre deux couches de PSG et durant le recuit du second oxyde, Poly1 reçoit des ions phosphore de Ox1 et Ox2, ce qui lui confère une conductivité supérieure à celle des couches Poly0 et Poly2.

3.3. Éléments de librairie

L'outil de dessins de masques est accompagné d'une librairie d'éléments paramétrables dont l'usage permet d'accélérer le processus de dessin. À cette librairie, ont été empruntés, les deux éléments de base de notre design. Leur choix a été motivé par le fait qu'ils représentent exactement les alignements de masques que nous recherchions et qu'ils sont suffisamment paramétrables pour permettre leur adaptation à nos besoins.

3.3.1. L'élément "ROTARY SIDE DRIVE MOTOR"

Élément principal du design, il regroupe stator et rotor. La Figure 3.2 présente les différents paramètres de l'élément tandis que la Figure 3.3 en donne une vue éclatée afin d'en identifier les différents masques.

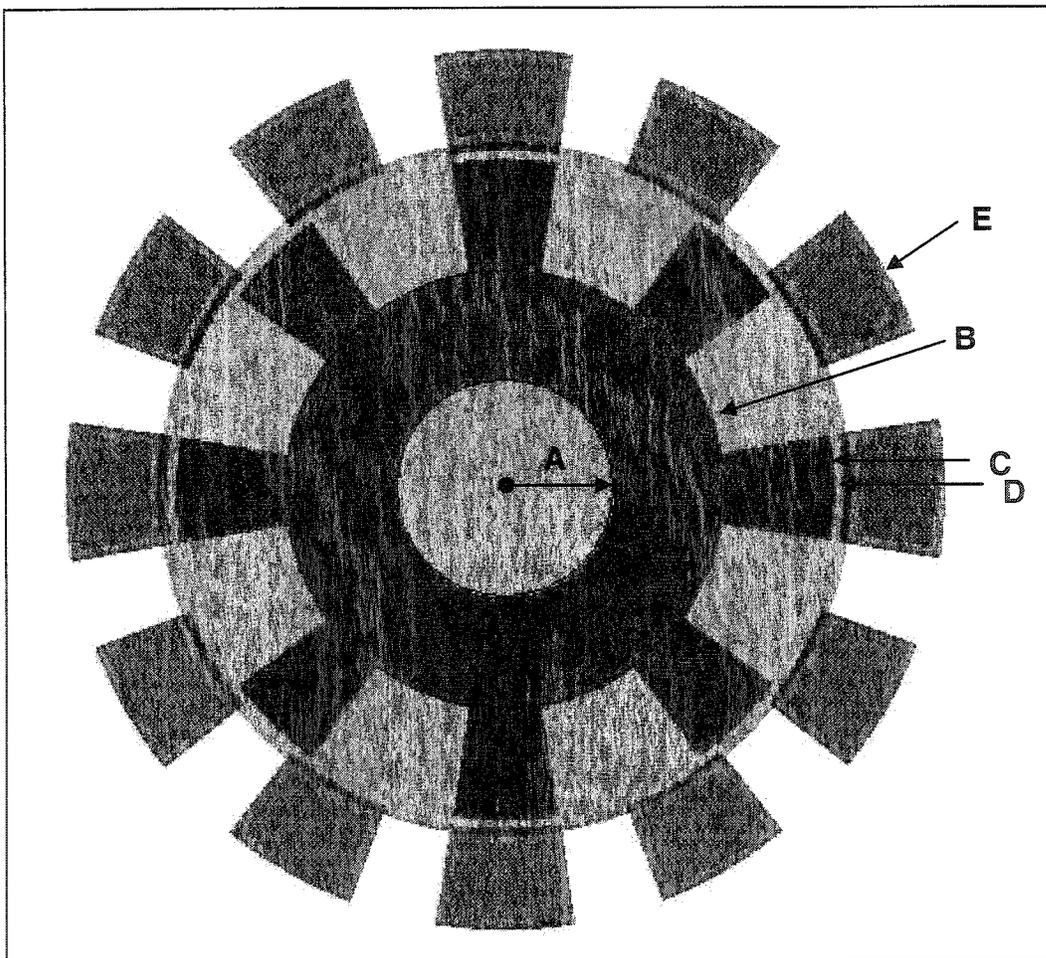


Figure 3.2 : Élément ROTARY SIDE DRIVE MOTOR (extrait de librairie MEMSPro)

Le tableau suivant constitue la légende de la Figure 3.2. Les cellules grisées signifient que le paramètre n'est pas représenté sur la figure.

Tableau 3.2 : Paramètres de l'élément ROTARY SIDE DRIVE MOTOR

A	Rayon intérieur du rotor		Largeur angulaire des dents du rotor
B	Rayon intérieur des dents du rotor		Largeur angulaire de l'espace entre les dents du rotor
C	Rayon extérieur du rotor (des dents du rotor)		Largeur angulaire des électrodes
D	Rayon intérieur des électrodes		Largeur angulaire de l'espace entre les électrodes
E	Rayon extérieur des électrodes		Décalage angulaire des dents du rotor par rapport aux électrodes

Le paramètre « Décalage angulaire des dents du rotor par rapport aux électrodes » est utilisé pour ajuster la position angulaire du rotor par rapport aux électrodes lors de la gravure.

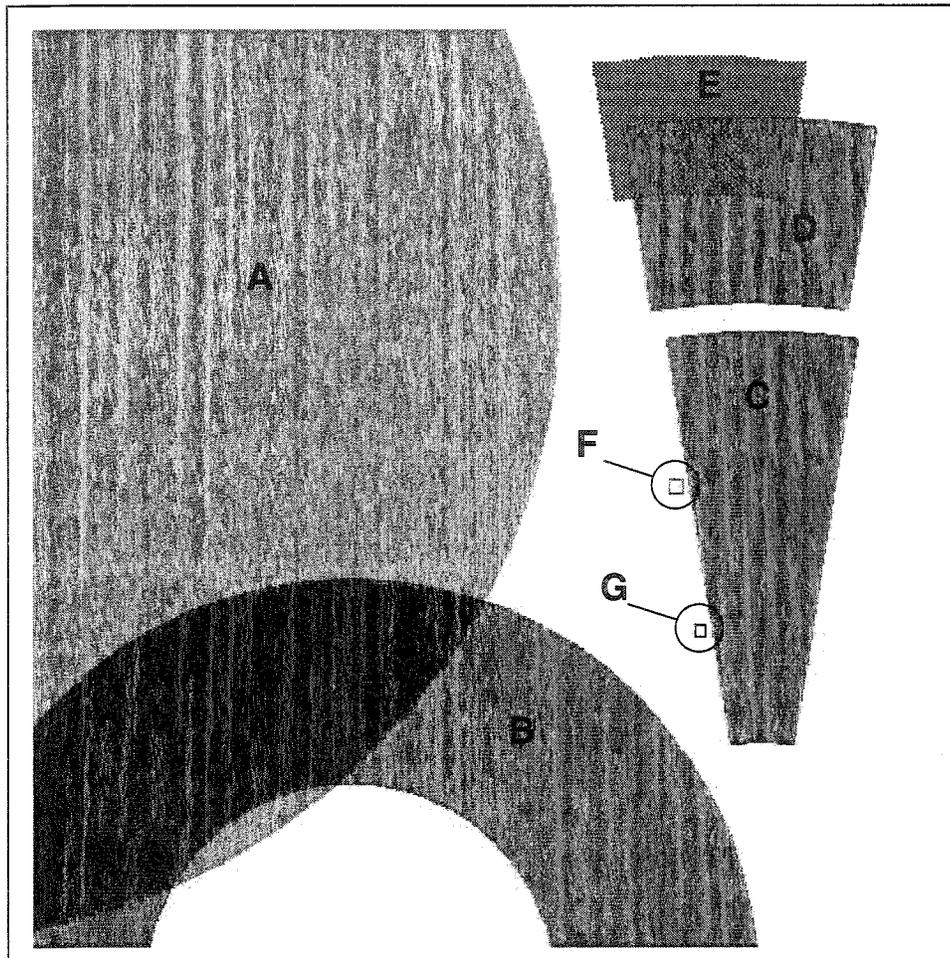


Figure 3.3 : Vue éclatée de l'élément ROTARY SIDE DRIVE MOTOR

Le tableau suivant constitue la légende de la Figure 3.3.

Tableau 3.3 : Légende de la Figure 3.3

A	Base du rotor (POLY0)	E	Fixation de l'électrode (ANCHOR1)
B	Anneau du rotor (POLY1)	F	Trou de pénétration de l'agent chimique de gravure (HOLE1)
C	Dent du rotor (POLY1)	G	Pointe de soutien du rotor au-dessus de sa base (DIMPLE)
D	Électrode (POLY1)		

Il est à remarquer que le masque HOLE1 n'existe pas physiquement, il s'agit d'un outil logiciel pour indiquer les trous dans le Poly1.

3.3.2. L'élément "JOURNAL BEARING"

Élément clé de la zone de pivot du micromoteur, il regroupe une portion de raccord au rotor et une structure de rétention de ce dernier. La Figure 3.4 présente les différents paramètres de l'éléments tandis que la Figure 3.5 en donne une vue éclatée afin d'en identifier les différents masques.

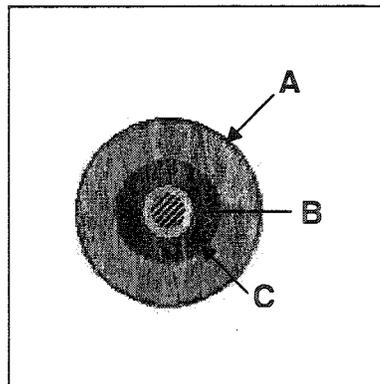


Figure 3.4 : Élément JOURNAL BEARING (extrait librairie MEMSPro)

Tableau 3.4 : Paramètres de l'élément JOURNAL BEARING

A	Rayon extérieur du coussinet/rotor (Poly1)	C	Rayon extérieur du col qui retient le coussinet/rotor (Poly2)
B	Rayon intérieur du coussinet/rotor (Poly1)		

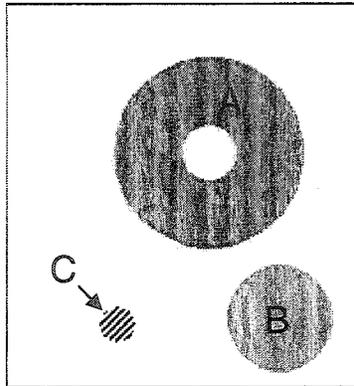


Figure 3.5 : Vue éclatée de l'élément JOURNAL BEARING

Tableau 3.5 : Légende de la Figure 3.5

A	Coussinet/rotor (Poly1)	C	Fixation du col sur la base du rotor du moteur (ANCHOR2)
B	Col qui retient le coussinet/rotor (Poly2)		

CHAPITRE 4. Fonctionnement et caractéristiques

Le fonctionnement des micromoteurs électrostatiques repose sur le principe suivant : les déplacements du rotor par rapport au stator sont contrôlés par l'application d'une différence de potentiels électriques entre les pales du rotor et les électrodes disposées sur le stator autour et en direction du rotor. Il n'y a ni contact mécanique ni contact électrique entre rotor et stator. Dans notre design, deux électrodes par pale sont utilisées et les couples pales/électrodes sont activées par paires diamétralement opposées (cf. Figure 4.1). Cela permet un contrôle plus précis des mouvements du rotor en plus de multiplier les zones d'application de force.

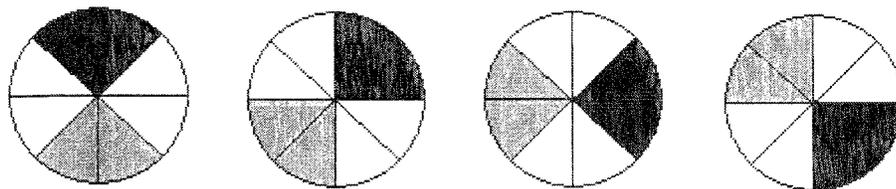


Figure 4.1 : Patron d'activation des électrodes du stator

4.1. Les forces électrostatiques

Le contrôle par forces électrostatiques n'est que rarement utilisé à l'échelle macroscopique compte tenu du haut niveau des tensions électriques impliquées [MBao00]. Dans le domaine des microstructures, il est également souvent écarté car il ne permet pas de déplacer autre chose que des éléments dont la dimension maximale n'excède pas les quelques millimètres [Mado02]. Mais comme les dimensions visées pour le Walking-Die n'excèdent pas les 5 millimètres, cette méthode devient applicable.

La manifestation de la force électrostatique peut se résumer ainsi : lorsqu'une différence de potentiel électrique suffisamment élevée est imposée entre une électrode et une pale du rotor, il en résulte l'apparition d'un champ électrique et le développement de forces électrostatiques [Polla71]. Ce phénomène est en relation directe avec la loi de Coulomb qui exprime l'intensité de la force électrostatique F_e entre deux particules chargées séparées par une distance r :

$$F_e = \frac{k_e \times q_1 \times q_2}{r^2}$$

où

(4.1)

$k_e = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$: constante de Coulomb

q_1 et q_2 : les particules chargées en coulomb (C)

Pour étudier les interactions électrostatiques dans les microstructures, les éléments impliqués sont assimilés à des armatures de condensateur dont le modèle est plus accessible aux néophytes mais également très proche de la réalité.

4.1.1. Identification des forces en présence

Il y a 2 forces qui agissent sur des armatures porteuses de potentiels électriques différents (cf. Figure 4.2) [MBao00]. F_T est la force tangentielle qui tend à aligner les armatures de façon à minimiser leur décalage. Il est à noter que F_T ne varie pas avec l'alignement des armatures tant que la distance de chevauchement de ces dernières vaut plusieurs fois celle qui les sépare [MBao00]. F_N est la force normale qui tend à rapprocher les armatures.

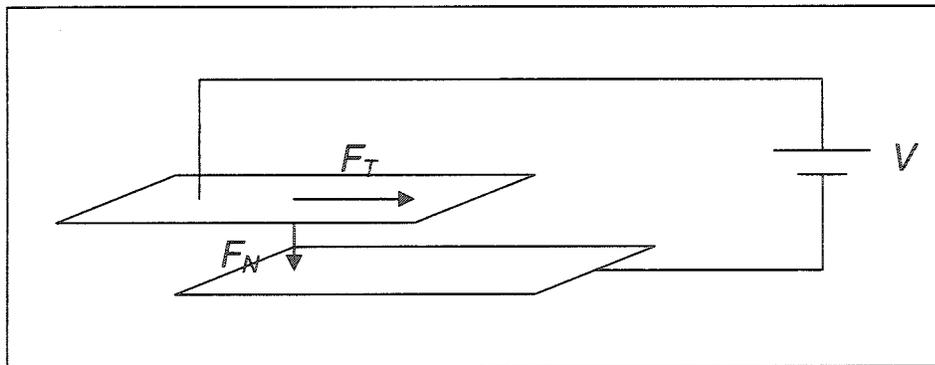


Figure 4.2 : Représentation des forces normale et tangentielle entre 2 armatures de potentiels différents

$$F_T = \frac{L_{Interface} \times \epsilon \epsilon_0}{2d_0} \times V^2 \quad \text{et} \quad F_N = -\frac{A \epsilon \epsilon_0}{2d_0^2} \times V^2$$

où

d_0 : Distance entre les armatures ;

V : Différence de potentiel électrique entre les armatures ;

$\epsilon \cong 1$: Permittivité relative du médium entre les armatures ;

$\epsilon_0 = 8.854 \text{E} - 12$: Permittivité du vide ;

$L_{Interface}$: Dimension principale (la plus grande) de l'interface ;

y_0 : Dimension normale à la direction de déplacement des armatures (et, typiquement, à $L_{Interface}$) ;

$$A = L_{Interface} \times y_0 \quad (4.2)$$

Lorsque la force normale aura tendance à faire léviter le rotor à la hauteur des électrodes, la force tangentielle les alignera. La mise en commun des équations de ces forces montre que F_N est plus grande que F_T dans les mêmes proportions que y_0 par

$$\text{rapport à } d_0 : \frac{F_N}{F_T} = \frac{y_0}{d_0}.$$

4.1.2. Limitation de la fabrication en couches minces

L'utilisation de la microfabrication de surface pour construire nos micromoteurs implique l'obtention de structures de faibles hauteurs mais de grandes surfaces. Or la majorité des designs de micromoteurs en couches minces implique l'utilisation de la même couche de polysilicium pour constituer le rotor et les électrodes. Donc ces éléments sont au même niveau et se font face par leurs sections. L'épaisseur de la couche de polysilicium est alors le facteur limitant dans la maximisation des surfaces en

interaction électrostatique [Mado02] (un design qui permet de contourner cette restriction est présenté plus tard dans ce mémoire).

4.2. Impact de la réduction d'échelle

4.2.1. Les effets de bord

Dans un micromoteur, les dimensions des éléments en interaction électrostatique, à savoir les bouts de pales de rotor et les bouts d'électrodes, sont comparables à la distance entre ces éléments [MBao00]. Dans ce cas le modèle des armatures de condensateur, utilisé jusque là, est incomplet. Il donne une bonne idée de l'intensité des forces mais il néglige l'effet des autres surfaces des éléments en interaction. Avec des structures en couches minces, lorsqu'une pale est en interaction avec une électrode, une bonne partie des surfaces adjacentes participe également à l'interaction. La quantité des surfaces interférentes dépend de la géométrie des éléments en interaction. Cependant, la surface équivalente dans le modèle des armatures de condensateur est toujours plus importante que celle représentée par la hauteur et la largeur de la section de pale/électrode. Les forces développées sont incidemment plus élevées.

L'effet de bord est fortement sensible à la géométrie des éléments. Il n'est pas possible d'en calculer la valeur exacte qu'avec des méthodes numériques sur une équation de Poisson [MBao00] ($\nabla^2 u = f(x, y)$). Dans notre cas, nous ne chercherons pas à en faire le calcul mais nous prenons le fait que nos valeurs calculées en soient augmentées comme une marge de sécurité.

4.2.2. Tension de claquage

Au 19^e siècle, le scientifique allemand Friedrich Paschen a mené d'importants travaux de recherche sur les décharges électriques entre deux éléments conducteurs. Ses travaux ont donné naissance aux « courbes de Paschen » [Pasc89] qui représentent la tension de claquage entre des conducteurs en fonction du produit de la distance qui les sépare et de la pression du gaz ambiant [Mado02]. Les courbes de Paschen montrent qu'au-delà d'une certaine limite, la diminution de l'espacement entre deux électrodes entraîne une augmentation importante du seuil de claquage. Ainsi des valeurs de champ électrique de 1.7×10^8 V/m ont déjà été observées pour des espacements de $2 \mu\text{m}$ dans l'air. La limite supérieure des champs électriques mesurés entre armatures à faible espacement dans le vide est de 3×10^8 V/m [Mado02]. Les courbes de Paschen montrent comment la miniaturisation peut être comparée à une réduction de la pression du gaz ambiant. En effet, avec la miniaturisation, la diminution des espacements tend à atteindre la dimension des molécules. Il y a alors de moins en moins de candidates à l'ionisation qui est nécessaire à la conduction puis à la décharge entre les électrodes. Des micromoteurs de 300V avec $2 \mu\text{m}$ d'espacement ont déjà tourné à 15000 tours/minutes pendant 1 semaine [Mado02].

4.2.3. Inertie

L'effet Paschen, exposé dans la section précédente, suggère un autre avantage de la miniaturisation : soit l la dimension principale d'une microstructure (proportionnelle à l'espacement entre les armatures et à la hauteur des structures), l'allure de la courbe de Paschen suggère que le champ électrique varie selon $l^{-1/2}$ alors que la force est directement proportionnelle à l (cf. section 4.1.1). De plus avec une diminution de l d'un facteur 10, l'inertie diminue de 10^3 (l'inertie est proportionnelle au volume) alors que la force diminue seulement d'un facteur 10 (la force est proportionnelle à l'espacement des armatures). Il en résulte de meilleures accélérations et des temps de retournement plus faibles [Mado02] (exemple : temps de changement du sens de rotation du moteur).

4.2.4. Stiction

Le terme stiction désigne l'adhérence entre des éléments d'une microstructure électromécanique en contact mais normalement indépendants. Il existe deux formes de stiction [STIC]. La première intervient durant la fabrication et la seconde se produit à l'usage de la structure.

Stiction durant la fabrication

Ce phénomène est courant dans la fabrication des MEMS en couches minces et par bulk-micromachining. Il intervient notamment au moment de la libération des structures par gravure liquide des oxydes. Il arrive en effet que des éléments, issus de couches de polysilicium superposées, capturent une particule liquide entre eux et s'en trouvent soudés. D'un procédé de fabrication à l'autre, plusieurs moyens sont employés pour l'éviter. Dans le cas du procédé MUMPs, des mesures complémentaires sont prises :

- Usage du masque DIMPLE ;
- Usage des masques HOLE ;
- Séchage au dioxyde de carbone (CO₂) supercritique.

L'usage du masque DIMPLE résulte en la formation de pointes de Poly1 à travers l'oxyde la séparant de Poly0 (cf. CHAPITRE 3). Ainsi un espace équivalent à la hauteur des pointes est maintenu entre Poly1 et Poly0 même après la gravure de l'oxyde. De plus, ces pointes minimisent les contacts entre ces couches. L'acide peut donc circuler plus facilement entre les couches de polysilicium. L'usage d'un masque HOLE résulte en la distribution de petits trous (3µm de diamètre) sur la surface du polysilicium dont on désire graver l'oxyde sous-jacent. Cette mesure augmente encore la capacité de circulation de l'acide.

La gravure du PSG au HF est fortement isotrope, ce qui donne une excellente uniformité de gravure et des géométries nettes. Cependant l'usage de l'acide sous sa forme liquide à travers des géométries espacées de seulement quelques microns (épaisseur du PSG) à pour conséquence l'emprisonnement de plusieurs particules liquides à travers la

structure durant la gravure. Après un rinçage à l'eau déionisée (DI) pour stopper l'action du HF par dilution et un autre à l'alcool isopropylique (IPA) pour enlever l'eau, le séchage au CO₂ supercritique intervient pour éliminer toute trace de liquide [MUMPO2]. Ces mesures sont parmi les plus efficaces employées dans le domaine et leur présence permet de conclure que l'emploi du procédé MUMPs diminue, autant que possible, les risques de stiction à la fabrication.

Stiction à l'usage

Ce phénomène intervient lorsque deux éléments d'une structure entrent en contact et adhèrent l'un à l'autre. La cause de cette adhérence peut être la capillarité de surface, l'électricité statique ou même la jonction chimique. Les mesures énoncées précédemment pour contrer la stiction à la fabrication permettent également de réduire les risques de stiction à l'usage. En effet, le séchage au CO₂ supercritique, en minimisant les traces de corps liquides, réduit de beaucoup les risques d'adhérence par forces capillaires. Le masque DIMPLE qui minimise les points de contact entre Poly0 et Poly1 et surélève la couche Poly1, diminue aussi les risques d'adhérence par capillarité en plus de réduire la prise d'une éventuelle jonction chimique à la zone de contact entre pointe de Poly1 et surface de Poly0. Pour ce qui est de la stiction par électricité statique, elle ne peut s'appliquer à nous étant donné que les éléments à risque dans notre design (le rotor et sa base) sont toujours au même potentiel électrique. Nous sommes donc bien protégés contre la stiction sous ses deux formes car nous utilisons un procédé de fabrication adéquat et avons un design adapté.

CHAPITRE 5. Résultats

Après la familiarisation avec la microfabrication en couches minces, la technologie MUMPS et l'outil de dessin assisté par ordinateur, il reste à :

- Choisir les composants répondant le mieux aux requis du système ;
- Déterminer les paramètres permettant d'ajuster mutuellement les composants et d'atteindre les dimensions visées ;
- Ajouter et organiser les traces d'alimentation des électrodes.

Tout cela en accord avec les règles de dessin afin que soient générés les fichiers à envoyer vers l'usine pour fabrication après une deuxième et dernière étape de DRC.

Ce mémoire s'étend sur deux rondes de fabrication de la CMC. La première, qui aura servi de « brouillon », a permis de récolter des résultats enrichissants mais loin de nos objectifs. La deuxième ronde a été tout aussi riche en enseignement mais toujours aussi loin de permettre que le projet atteigne son terme. Dans ce mémoire, il est fait référence à ces rondes en utilisant le numéro de design associé à chacune :

- 1) Ronde 0301MU (soumission du RFI en février 2003, sortie d'usine fin juin et réception des structures courant juillet) : IMUPMRPM ;
- 2) Ronde 0401MU (soumission du RFI en février 2004, sortie d'usine fin juin et réception des structures courant septembre) : IMUPMRPN ;

Les résultats initialement escomptés sont de trois types :

1. Les dessins de masque élaborés pour répondre aux requis et spécifications du système ;
2. L'analyse au microscope des structures sorties de l'usine ;
3. Tests mécaniques et électriques des micromoteurs.

Cependant, les structures issues de la ronde IMUPMRPM ne permettant pas d'aborder le troisième type de résultats (pour des raisons qui sont présentées plus tard dans ce chapitre), ce dernier est remplacé par trois éléments : une étude des défaillances qui ont empêché de mener à terme le travail à partir du design IMUPMRPM et la présentation des décisions prises pour contrer ces défaillances. Les structures de la ronde IMUPMRPN ne permettant pas non plus de développer le troisième type de résultat, elles seront traitées comme celle de la IMUPMRPM. Cette décision se base sur la volonté de tirer profit de nos erreurs afin d'identifier un maximum de pièges inhérents aux projets de microfabrication de micromoteurs en couches minces et ainsi bâtir une expertise solide et durable.

5.1. Présentation des résultats du design IMUPMRPM

Pour répondre aux requis énoncés dans le CHAPITRE 1, des dessins de masques pour le procédé de fabrication MUMPS sont élaborés. Rappelons que le procédé MUMPS est un procédé de microfabrication en couches minces aux paramètres génériques (cf. CHAPITRE 3). Ces dessins de masques sont réalisés sur ordinateur et les codes de couleurs, de transparence et les espacements minimum/maximum respectent le fichier d'usine dont les paramètres se retrouvent dans la description du procédé MUMPS [MUMP01].

5.1.1. Présentation des dessins de masques

Le design du IMUPMRPM s'inspire largement des dessins proposés en exemple par l'usine et l'outil de dessin afin de maximiser nos chances de succès. Le dessin de masques ci-dessous (cf. Figure 5.1) est le résultat de l'assemblage de deux composants paramétrables empruntés à la librairie de l'outil de dessin. Une présentation de ces composants et de leurs paramètres est faite dans le CHAPITRE 3, tandis que les paramètres propres au IMUPMRPM sont résumés par le Tableau 5.1.

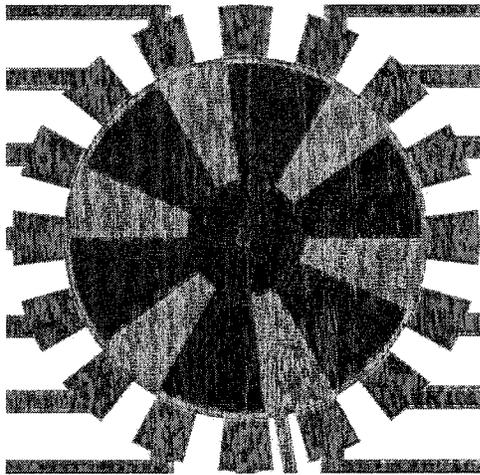


Figure 5.1 : Vue d'ensemble des masques principaux IMUPMRPM

**Tableau 5.1 : Paramètres de l'élément de librairie ROTARY SIDE DRIVE
MOTOR pour IMUPMRPM (valeurs en μm)**

Rayon intérieur du rotor	50	Largeur angulaire des dents du rotor	36
Rayon intérieur des dents du rotor	125	Largeur angulaire de l'espace entre les dents du rotor	24
Rayon extérieur du rotor (des dents du rotor)	375	Largeur angulaire des électrodes	13.5
Rayon intérieur des électrodes	387.5	Largeur angulaire de l'espace entre les électrodes	9
Rayon extérieur des électrodes	500	Décalage angulaire des dents du rotor par rapport aux électrodes	18

**Tableau 5.2 : Paramètres de l'élément de librairie JOURNAL BEARING
pour IMUPMRPM (valeurs en μm)**

Rayon extérieur du coussinet/rotor (Poly1)	55	Rayon extérieur du col qui retient le coussinet/rotor (Poly2)	30
Rayon intérieur du coussinet/rotor (Poly1)	35		

Ces grandeurs trouvent leur première justification dans l'énoncé des règles de base dans la fabrication d'un micromoteur électrostatique en couches minces. Cet énoncé est exposé dans l'introduction du présent mémoire. Autre justificatif de ces valeurs, la force motrice requise.

Les codes de couleurs, dont la description est disponible dans le manuel du procédé MUMPS [MUMP01], peuvent se résumer ainsi :

Tableau 5.3 : Résumé du code de couleurs des dessins de masques

ROUGE	Superposition POLY0-POLY1
ORANGE	POLY0
BRUN	Superposition POLY0-ANCHOR1-POLY1

Le tableau présenté ci-dessus est donné à titre indicatif seulement et ne permet pas d'interpréter convenablement la zone centrale du dessin qui compte plus de trois masques.

Le IMUPMRPM compte trois parties importantes qui sont la zone de pivot, les points d'alimentation et l'alignement des pales du rotor avec les électrodes. La figure ci-dessous (Figure 5.2) présente la zone de pivot. Cet élément, issu de la librairie, est composé de trois masques : POLY1, ANCHOR2 et POLY2 (cf. CHAPITRE 3).

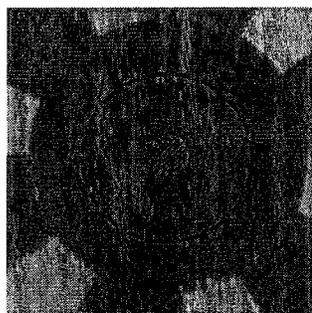


Figure 5.2 : Présentation de la zone de pivot du IMUPMRPM (délimitée en pointillets)

Sa fabrication résulte en un bras de pivot passant au centre du rotor, dont il est indépendant, et fixé sur la couche de polysilicium en dessous de ce dernier. Ce bras constitue l'axe de rotation du rotor en l'empêchant d'effectuer des déplacements planaires en translation. Le rotor est retenu contre la base du moteur par un coussinet (traduction libre de « mushroom cap », littéralement : « tête de champignon »).

L'autre élément de librairie utilisé intègre la distribution de points d'alimentation et l'alignement pales/électrodes qui sont paramétrables. Nous distinguons deux sortes de points d'alimentation : la première conduit le potentiel vers la couche POLY0 qui soutient le rotor et la seconde ce sont les électrodes (cf. Figure 5.3).

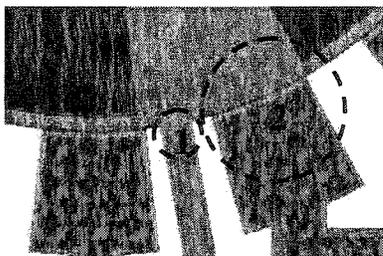


Figure 5.3 : Deux sortes de points d'alimentation (IMUPMRPM)

Le CHAPITRE 4 explique tout ce qu'il y a à savoir sur les électrodes, le potentiel de la couche POLY0 à la base du rotor et l'alignement pales/électrodes. Pour compléter cette présentation des dessins de masques associés au IMUPMRPM, l'annexe A propose une décomposition masque par masque du design.

IMUPMRPM se caractérise par deux différentes distributions de traces d'alimentation et deux diamètres (cf. Figure 5.4). Les codes suivants (Tableau 5.4) sont utilisés pour désigner les quatre combinaisons obtenues :

Tableau 5.4 : Codes combinaisons IMUPMRPM

	DIAMÈTRE (en μm)		DISTRIBUTION DES TRACES	
	750	600	A	B
RPM1	X			X
RPM2	X		X	
RPM3		X		X
RPM4		X	X	

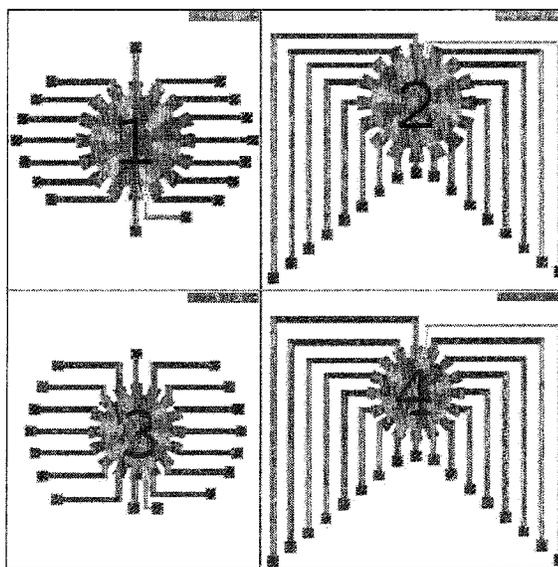


Figure 5.4 : Vue d'ensemble du design IMUPMRPM

5.1.2. RPM1-3 versus RPM2-4

Les deux principales incidences du changement de distribution des traces d'alimentation sont la modification de l'effort de routage requis pour placer le moteur au cœur du système final et l'espace occupé par le micromoteur. Il faut garder à l'esprit qu'un moteur plus lourd diminue sa propre efficacité.

Première observation : avec la distribution A, la course du signal d'alimentation est plus longue (cf. Figure 5.5 et Figure 5.6). Les traces d'alimentation sont faites en polysilicium. La couche Poly0 est utilisée dans le cas du contact à la base du rotor. Une superposition des couches Poly0 et Poly1 est utilisée pour les contacts aux électrodes. Les résistances par carreau du Poly0 et du Poly1 sont respectivement : 30 et 10 ohms/carreau (valeurs typiques [MUMP01]). La résistance plus faible du Poly1 s'explique par un dopage au phosphore inhérent au procédé MUMPS lors de la mise en contact du Poly1 et du PSG (cf. CHAPITRE 3). À ce sujet, il est à prévoir que le Poly1 des traces sera moins dopé en ions phosphore que décrit dans le procédé de fabrication étant donné l'usage du masque ANCHOR1 pour obtenir la superposition des traces. Les traces ont la même largeur en distribution A et en distribution B.

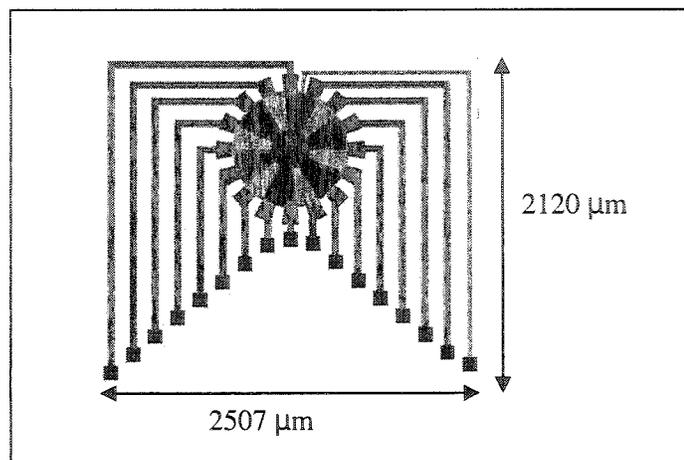


Figure 5.5 : Distribution A (dessins de masques)

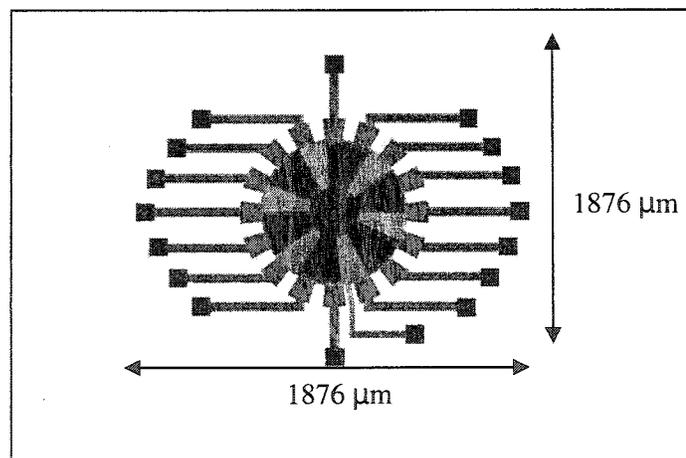


Figure 5.6 : Distribution B (dessins de masques)

Pour chaque distribution la plus longue trace, excluant point d'interconnexions et électrode, mesure :

- Distribution A : 3303 μm ;
- Distribution B : 410 μm .

Une coupe transversale des traces (cf. Figure 5.7) permet d'en apprécier le rapport des largeurs. Rapport qui est d'ailleurs identique d'une distribution à l'autre.

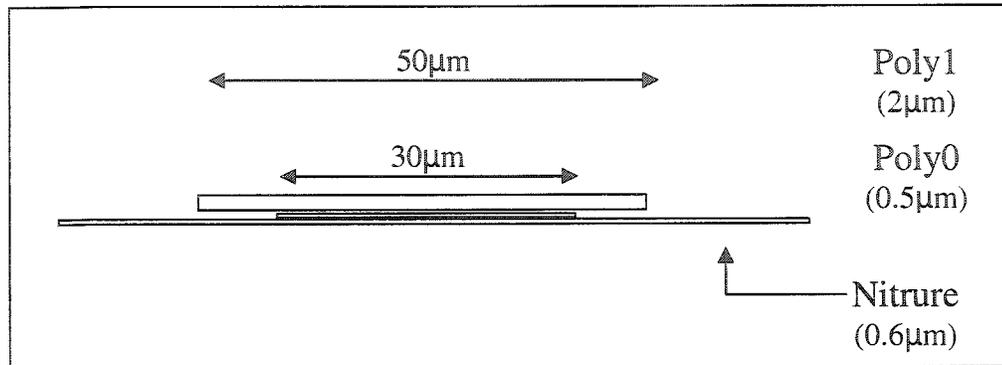


Figure 5.7 : Coupe transversale d'une trace d'alimentation

La couche de nitrure qui sert de base mécanique et d'isolant électrique entre notre design et le substrat n'entre bien entendu pas en compte dans notre évaluation. En assimilant la trace d'alimentation de la base du rotor aux autres traces, nous évaluons un facteur d'environ 8 entre les résistances ($\frac{3303\mu m}{410\mu m} \cong 8.0561$) équivalentes à la distribution A et à

la distribution B.

L'annexe D détaille le calcul des valeurs théoriques de capacités équivalentes aux interfaces électrodes/pales. Elles sont de l'ordre de 10^{-16} , au mieux 10^{-14} Farads (F).

Pour évaluer convenablement la surface des traces en Poly1 disponible à la conduction, il faut tenir compte la partie inférieure de la trace d'alimentation qui déborde d'une dizaine de micromètres de chaque côté de la trace en Poly0 (cf. Figure 5.7). Il en résulte une largeur équivalente d'environ $(50\mu m + 2 \times 10\mu m)$ soit $70\mu m$.

En prenant la distribution A et en considérant que les quatre électrodes activées sont alimentées par une trace de longueur maximale (pire cas) nous pouvons évaluer la résistance équivalente instantanée des traces par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 & \frac{4 \times \text{Longueur maximal des traces}}{\text{Largeur des traces}} \times R_{\text{PolyI}} \\
 & = \left(\frac{4 \times 3303 \mu\text{m}}{70 \mu\text{m}} \right) \times 10 \Omega / \text{carreau} \quad (5.1) \\
 & \cong 1.9 \text{k}\Omega
 \end{aligned}$$

Les ordres de grandeur des différentes valeurs sont donc de 10^{-14} F de capacité, $2\text{k}\Omega$ de résistance et des différences de potentiels de 70V sur quelques nanosecondes. Comme le courant dans un circuit capacitif est égale au produit de la capacité par la variation de la tension électrique dans le temps $\left(i = C \times \frac{de_c}{dt} \right)$, cela équivaut à quelques dixièmes de milliampère et autour de quelques cent millièmes de watt ($p = e_c \times i$) dissipé par les traces.

Étant donné la surface de dissipation, l'arrangement du design et les autres facteurs qui influenceront l'impédance finale de l'ensemble du système, l'impact de l'utilisation de la distribution A ou B n'a qu'une conséquence négligeable du point de vue électrique. Seul l'effort d'intégration au Walking-Die est donc à prendre en considération.

5.2. Valeurs théoriques de la force disponible

Comme mentionné dans le CHAPITRE 1, il n'est pas possible de calculer de façon théorique la valeur exacte de la force qui sera développée par une microstructure. Le CHAPITRE 4 présente les équations qui permettent de quantifier la force développée à l'interface d'un couple pale/électrode. L'annexe D regroupe les applications numériques qui accompagnent ces équations et nous nous en servons dans le paragraphe suivant pour calculer notre écart de l'objectif d'une dizaine de nN (cf. CHAPITRE 1).

5.2.1. Force tangentielle

Une différence de 70V entre une électrode et la section de la pale lui faisant face, entraîne le développement d'une force tangentielle de $(7.08 \times 10^{-13} \times 70^2) = 3.47 \times 10^{-9} \text{N}$ (cf. Tableau D.1 colonne IMUPMRPM). Le IMUPMRPM prévoit que chaque mouvement du rotor est commandé par quatre électrodes simultanément. Ces quatre électrodes sont distribuées sur deux pales diamétralement opposées. La force tangentielle totale pour un moteur est donc quatre fois supérieure : $13.88 \times 10^{-9} \text{N}$.

5.2.2. Force normale

Pour une tension de 70V, entre une électrode et la section de la pale lui faisant face, une force normale de $(5.1 \times 10^{-12} \times 70^2) = 25 \times 10^{-9} \text{N}$ (cf. Tableau D.2 colonne IMUPMRPM) est développée. En considérant les quatre électrodes de contrôle, la force normale totale pour un moteur sera donc quatre fois supérieure : $100 \times 10^{-9} \text{N}$.

5.2.3. Pertes

Les valeurs calculées ci-dessus ne tiennent pas compte des pertes en friction à l'intérieur du moteur, auxquelles il faudra ajouter les pertes en friction entre les autres éléments du Walking-Die et surtout celles de la friction avec le plancher.

La valeur de friction finale du système se mesure une fois la fabrication terminée mais elle toujours préalablement estimée par des équations physiques et des outils de modélisation physique. Durant la conception du IMUPMRPM, il n'y avait pas encore assez de données sur la forme finale du Walking-Die et la distribution de son poids pour mener une application numérique complète et pertinente sur le système complet. Pour la friction interne au moteur, nous avons trouvé que pour une structure telle que la notre le coefficient de friction couche sur couche du polysilicium dopé avoisine 0.04 [MNET]. Cette valeur est inférieure au coefficient de friction typique des graisses (0.09) et amène à la conclusion la valeur de la friction à l'intérieur du moteur sera noyée dans les autres pertes inhérentes au système final.

5.3. Analyse des structures sorties de l'usine

Plusieurs exemplaires des quatre différentes structures du design IMUPMRPM (RPM1, RPM2, RPM3 et RPM4) ont été reçus. Rappelons que ces quatre structures sont la combinaison de deux diamètres de rotor (750 et 600 μ m) et de deux distributions de traces d'alimentation différentes. À l'usine, quinze copies du IMUPMRPM ont été fabriquées mais, au moment de la séparation des structures, la proximité des structures RPM1 et RPM2 (cf. Figure 5.4) a nécessité le sacrifice de plusieurs échantillons :

Tableau 5.5 : Distributions des échantillons reçus pour IMUPMRPM

	NOMBRE DE LOOSE-DIE	NOMBRE DE 40DIP
RPM1	6	1
RPM2	15	0
RPM3	11	4
RPM4	15	0

Plusieurs structures RPM1 ont été sacrifiées au profit de structures RPM2, candidates idéales aux tests d'assemblage du fait de leur taille de rotor et de la distribution de leurs traces d'alimentation.

Quarante-sept échantillons sont en « Loose-die », c'est-à-dire simplement coupé de la plaquette de silicium, et cinq sont empaquetés dans des boîtiers à fenêtre qui donnent un accès mécanique aux structures et ont les traces routées vers les broches du boîtier. Les

structures empaquetées sont destinées à l'implantation sur une plateforme de tests électromécaniques. Les structures en Loose-die sont destinées aux tests d'assemblage et au montage d'un prototype du Walking-Die.

Toutes les structures sont déjà libérées. La libération a été faite par immersion dans du HF suivie d'un séchage au CO₂ supercritique.

La première inspection visuelle des structures est faite au microscope optique et les images sont prises avec un appareil photo digital. Cette inspection révèle que tous les échantillons sont des micromoteurs brisés. Si six d'entre eux ont un rotor qui compte une seule pale (cf. Figure 5.8), les autres n'ont pas de rotor ou au mieux ils n'ont que la partie centrale du rotor, celle qui correspond à la zone de pivot : l'anneau sur lequel sont attachées les pales.

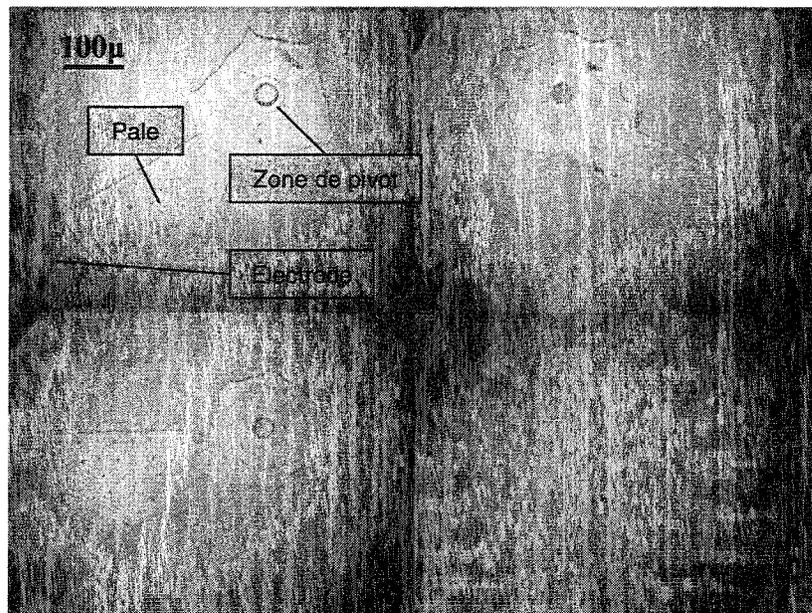


Figure 5.8 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPM brisée

Afin de mieux apprécier les détails de surface et l'aspect tridimensionnel des structures, nous complétons nos observations au microscope optique par des observations au microscope électronique à balayage (cf. Figure 5.9).

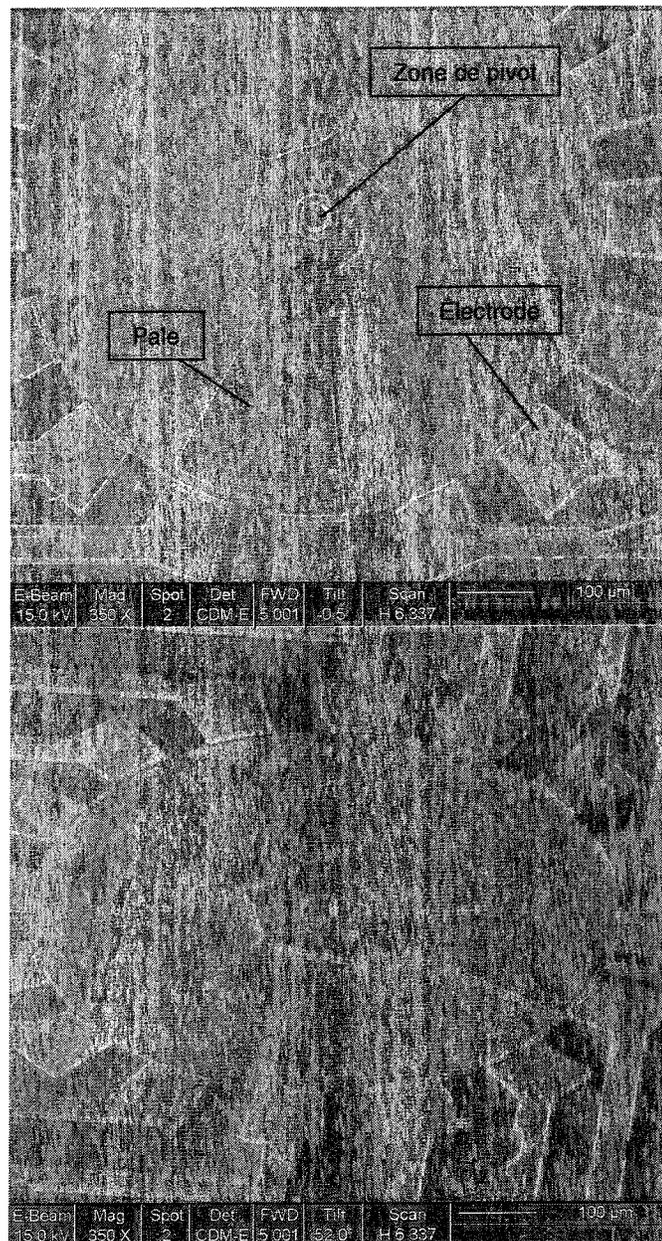


Figure 5.9 : Vue au MEB d'une structure IMUPMRPM brisée

5.3.1. Manque de trous dans le Poly1

La Figure 5.8 montre bien l'effet du masque HOLE1 sur les pales et l'anneau de Poly1 proche de l'axe de rotation. Cependant, elle ne montre pas de trous dans l'anneau du rotor qui relie pales et zone de pivot. Rappelons le masque HOLE1 joue un rôle majeur dans la libération du rotor : il fait des trous dans le Poly1 pour donner à l'acide de gravure un accès à l'oxyde sous le rotor.

Pour confirmer cette observation, un gros plan de la zone incriminée est pris (cf. Figure 5.10). Il confirme alors l'absence de trous dans le Poly1 entre la zone de pivot et les pales.

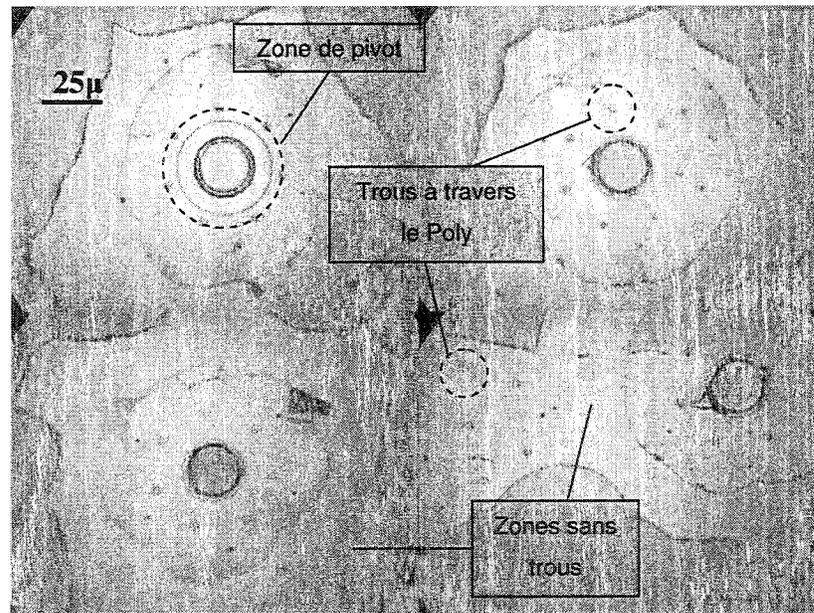


Figure 5.10 : Gros plan de zone de pivot de structures du IMUPMRPM brisées

Les trous présents semblent avoir bien accomplis leur tâche. Cette affirmation se base sur la visibilité de la couleur du Poly0 à travers ces trous. L'image prise au MEB en Figure 5.11 présente une autre vue des trous dans la couche Poly1 du rotor. Les trous ont environ $3\mu\text{m}$ de diamètre et un espacement réciproque maximum de $30\mu\text{m}$ afin de tenir compte de la capacité de gravure latérale de l'acide du procédé. La Figure 5.12 permet d'observer ce qui a tout lieu d'être le résultat de la libération des pales.

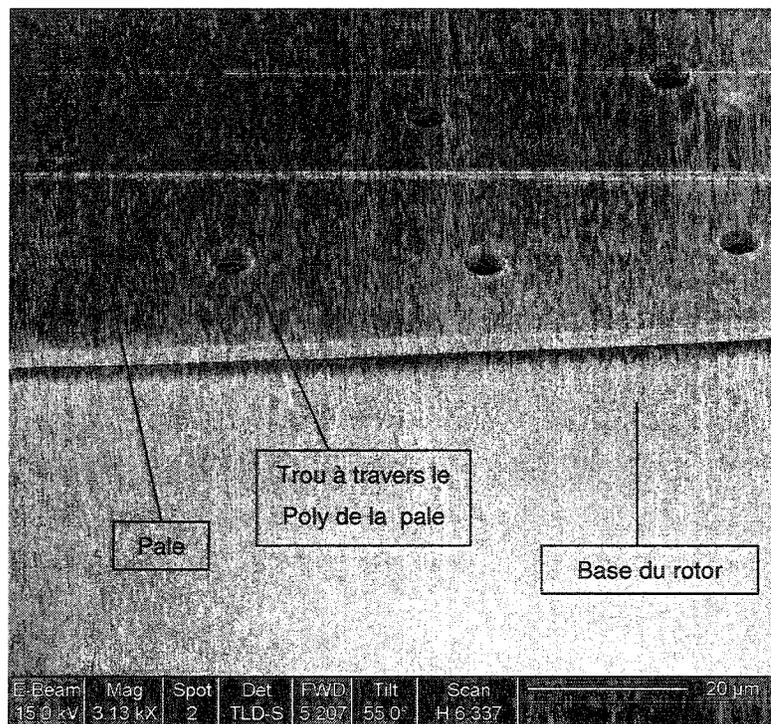


Figure 5.11 : Observation au MEB des trous résultant de l'usage du masque HOLE1

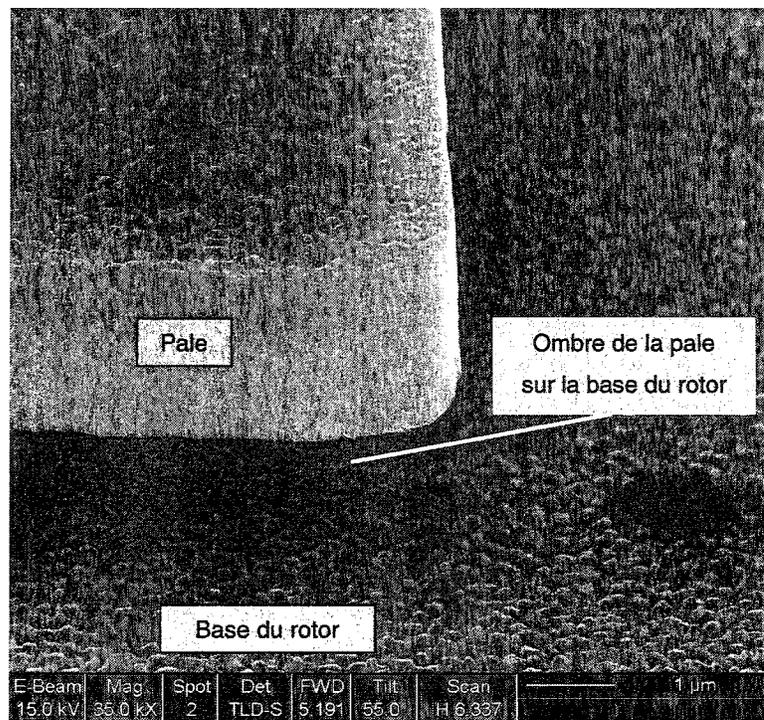


Figure 5.12 : Observation au MEB du résultat de la libération de l'extrémité d'une pale

5.3.2. Bris de coussinets

Seulement six des structures ont un coussinet complet. La Figure 5.13 montre un coussinet complet (image de gauche) et deux coussinets brisés. La Figure 5.14 présente une observation au MEB du coussinet complet.

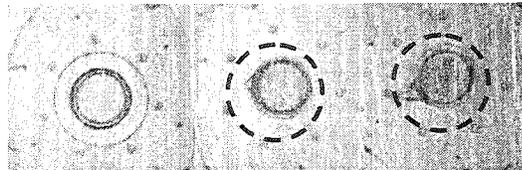


Figure 5.13 : Gros plan sur les coussinets de structures du IMUPMRPM brisés

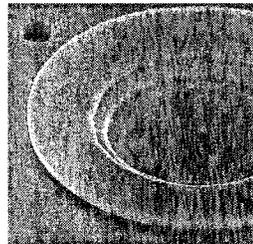


Figure 5.14 : Gros plan au MEB d'un coussinet intact (IMUPMRPM)

Le coussinet de la zone de pivot est en Poly2. Il présente une teinte différente du rotor en Poly1 et de sa base en Poly0. C'est ainsi que sur l'image de gauche de la Figure 5.13, nous identifions le coussinet comme étant l'aurole claire qui entoure le cercle en double trait noir au centre de l'image. Dans les images du centre et à droite de la figure, l'aurole est absente mais à la périphérie du cercle en double trait, des pointes de même

teinte que l'auréole de l'image de gauche sont observables. Nous identifions ces pointes comme étant des morceaux d'un coussinet brisé.

5.3.3. Disparité de surface dans la zone de pivot

Tous les échantillons qui comptent une zone de pivot présentent une différence de teinte du Poly1 entre la zone de pivot et l'anneau du rotor qui lie les pales (cf. Figure 5.15).

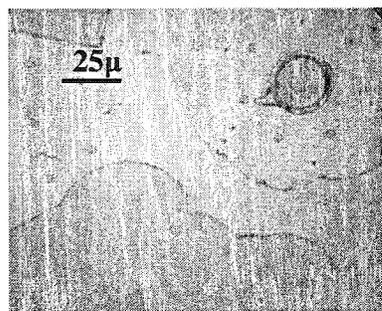


Figure 5.15 : Observation de la disparité de surface sur une structure du IMUPMRPM

Tous les éléments en Poly1 devant normalement arborer une teinte unie sous le microscope optique, nous identifions cette différence de teinte comme étant un signe d'anomalie dans cette région de la couche de Poly1. Ajoutons à l'observation précédente que la zone de disparité est toujours délimitée de façon circulaire et que cette délimitation passe à une vingtaine de micromètres des trous du masque HOLE1 autour des coussinets.

La Figure 5.16 et la Figure 5.17 présentent des images prises au MEB qui permettent de préciser nos observations. En mettant en évidence une fracture le long de la délimitation

identifiée dans le paragraphe précédent, ces figures apportent une explication à la différence de teinte sur la couche Poly1. En effet, la fracture s'est accompagnée d'un changement local de la pente de la couche, celle-ci ayant levé, produisant ainsi une réflexion différente de la lumière observée au microscope optique.



Figure 5.16 : Vue 1 - Mise en évidence au MEB d'une fissure dans la zone de pivot (IMUPMRPM)

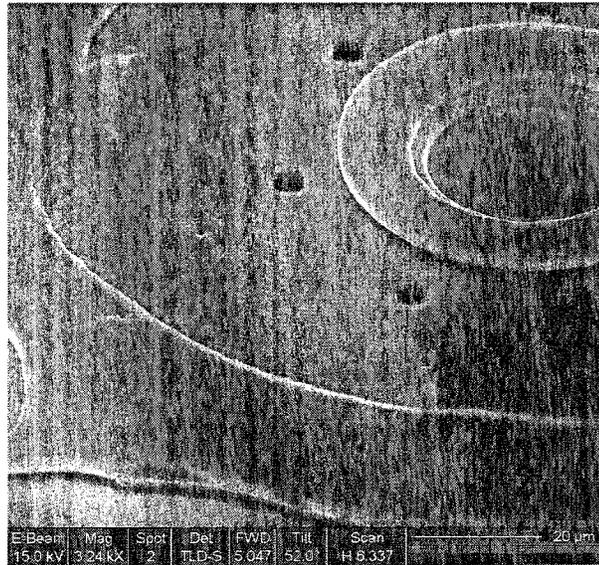


Figure 5.17 : Vue 2 - Mise en évidence au MEB d'une fissure dans la zone de pivot (IMUPMRPM)

Les deux images précédentes montrent également que la fracture propage des fissures vers les pointes du masque DIMPLE (cf. CHAPITRE 3). La Figure 5.18 présente un gros plan d'une de ces fissures.



Figure 5.18 : Gros plan au MEB sur une fissure entre la fracture et un DIMPLE (IMUPMRPM)

5.3.4. Électrodes et rotor

Les images suivantes permettent d'observer la bonne séparation de la zone de Poly0, servant de base au rotor, et celle en dessous des électrodes, ainsi que la bonne libération du rebord des pales.

La séparation des zones de Poly0 est nécessaire étant donné qu'elles se verront imposer des potentiels électriques différents au même moment. La Figure 5.19 montre bien la surélévation du Poly1 de l'électrode au-dessus du Poly0 à la base du rotor. Elle permet également d'apprécier le rapport d'aspect entre les distances électrode/pale et électrode/Poly0 (à la base du rotor). Quant à la libération des pales, c'est le garant de la mobilité du rotor. La Figure 5.20 donne une bonne idée du succès de cette libération mais pour confirmer cet état de fait, une vérification mécanique s'impose. Ainsi, avec la pointe d'un testeur de circuit microélectronique, une faible force dans l'axe de rotation du rotor a été appliquée sur l'extrémité de la pale. La déflexion de la pale a été observée par un changement dans la réflexion de la lumière, mettant en évidence la bonne libération de la pale du rotor.

Cependant l'application d'une force dans le sens de rotation du micromoteur sur le bord de la pale n'a pas entraîné de rotation du rotor. Et en augmentant la force appliquée, la pale s'est brisée.

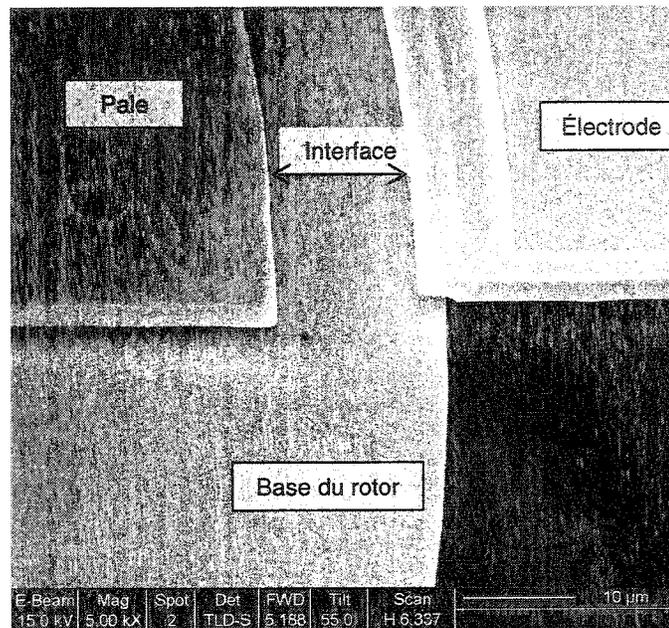


Figure 5.19 : Gros plan au MEB de l'interface entre une pale et une électrode (IMUPMRPM)

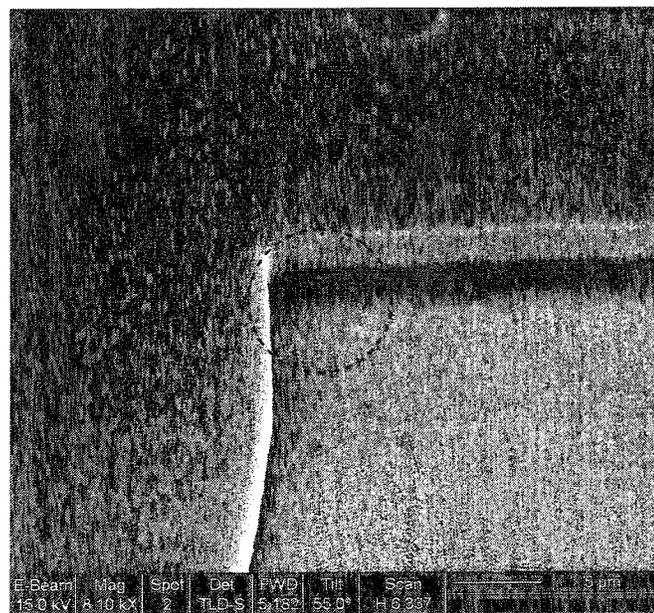


Figure 5.20 : Gros plan au MEB du dégagement sous le coin d'une pale (IMUPMRPM)

5.4. Interprétation et conclusion des observations d'analyse

L'impossibilité de déplacer le rotor par contact mécanique sur les pales, et surtout le bris de la pale en lieu et place du déplacement escompté conduit à la conclusion qu'une partie du rotor est soudée avec la couche de Poly0 en dessous. Étant donné que des images mettent en évidence la surélévation des rebords extérieurs du rotor et que nous avons réussi à faire fléchir la pale rescapée, le masque HOLE1 semble avoir accompli sa tâche, à savoir donner un accès vers Ox1 à l'acide de libération.

Cela étant dit, il est possible de poser l'hypothèse que la soudure se situe sous la zone identifiée comme zone manquant de trous dans le Poly1 du rotor. En effet, en l'absence de masque HOLE1, la gravure de l'oxyde Ox1 sous le Poly1 du rotor s'est arrêtée entre la base des pales et les trous entourant le coussinet. En prenant cette hypothèse comme point de départ pour expliquer la fracture observée, nous disons que le manque de trous dans le Poly1 de la zone de pivot a causé une libération incomplète du rotor. Une bonne partie de l'anneau central de ce dernier est donc restée fixée au Poly0 par une couche d'oxyde. La gravure du PSG (l'oxyde) au HF étant fortement isotrope : le coussinet, les rebords intérieurs et extérieurs de l'anneau du rotor, ainsi que la pale ont été libérés. Cependant il est resté un anneau, plus ou moins régulier, d'oxyde qui lie solidement une partie du Poly1 au Poly0. Avec les variations de températures inhérentes au procédé MUMPS, ces zones de soudure non homogènes ont contré les mouvements et variations

mécaniques de la couche de Poly1. Résultant en des concentrations de contraintes qui ont mises au jour des faiblesses mécaniques dans le rotor.

À partir de ce moment, le bris a pu se produire n'importe quand entre la libération du rotor à l'usine est son observation au microscope optique.

Concernant la propagation de fissures vers les pointes de DIMPLE, rappelons que le masque DIMPLE résulte en la formation d'une pointe de faible largeur (environ 3 microns) en Poly1. Ainsi, une fois la structure libérée, le DIMPLE se traduit par une irrégularité dans la couche de Poly1. Or dans le cas d'un dépôt de couches minces, cette irrégularité est assimilable à un point de concentration de contraintes dans la couche de polysilicium. Donc en se produisant, la fracture a tenté de se propager à toutes les zones propices à une réaction mécanique permettant de libérer l'énergie emmagasinée par les points de concentration de contraintes.

Finalement, nous entrevoyons deux raisons possibles aux bris de rotor. La première étant le stress dans la couche de Poly1 qui en se déformant a induit une inclinaison suffisante des pales pour qu'elles entrent en contact avec le Poly0 sous le rotor et ci brisent. La seconde étant la fracture dans la zone de pivot. Dans les images présentées, la fracture est circulaire mais jamais ses extrémités ne se rencontrent. Il est donc envisageable que sur plusieurs structures, cette fracture est réussie à faire le tour du coussinet et ainsi causée un détachement du rotor. Les deux explications sont plausibles mais puisque la pale restante ne présente pas d'inclinaison notable, la seconde est favorisée.

Dans un cas comme dans l'autre, nous aurions pu espérer trouver des morceaux de rotor, voire même des rotors complets, dans l'emballage de nos structures. Cependant, comme nous le soulignons plus haut, les bris ont pu intervenir n'importe quand entre la libération des structures et les premières observations au microscope. Et il y a fort à parier qu'ils se sont produits dès la libération des rotors ou au moment du séchage au dioxyde de carbone supercritique. Que ce soit l'un ou l'autre des moments, l'étape de nettoyage subséquente aura vite fait de balayer les morceaux qui se seront désolidarisés des structures.

La conclusion de cette analyse des défaillances du IMUPMRPM est donc qu'elles sont le résultat de la mauvaise utilisation d'un masque, en l'occurrence le masque HOLE1. Le masque HOLE1 est normalement un masque auto-généré lors de l'intégration des éléments importés de la librairie. Quelques tests ont suffi pour révéler que le script qui ajuste la distribution des trous en fonction de la dimension voulue pour le rotor, en met partout sauf sur l'anneau de jonction des pales. Donc le masque HOLE1 doit être complété manuellement sur la zone de pivot. Avec un espacement maximum de 30 μm entre les trous, cela fait près d'une centaine de trous de 3 μm à placer.

Étant donné qu'il existe une règle de dessin entourant l'usage du masque HOLE1 lorsqu'il y a superposition des couches Poly1 et Poly0 sans usage du masque ANCHOR1, nous nous serions attendu à ce que l'un des deux modules de DRC utilisés signale une violation mais ce ne fut pas le cas. Le module DRC du logiciel de dessin utilisé ne traite pas les surfaces de forme circulaire (du moins pas dans notre version,

MEMsCAP L-Edit v8.20), il n'a pas détecté la violation. Quant au module de la CMC, bien qu'il change régulièrement de version pour le procédé MUMPS, nous préférons croire que nous en avons mal interprété les rapports plutôt que d'assumer qu'il n'a pas été en mesure de détecter la violation. Cependant nous pouvons affirmer qu'après ce dernier DRC, il ne restait qu'un ou deux avertissements mais aucune erreur.

5.5. Décisions de design visant à améliorer IMUPMRPM

Comme indiqué dans la section 5.4, la principale mesure à prendre pour éviter que se répète l'échec du IMUPMRPM est l'ajout de trous dans l'anneau du rotor. Pour le IMUPMRPN le masque HOLE1 est donc inspecté et complété manuellement à chacun de ses usages notamment dans la zone de pivot afin d'ouvrir un chemin à l'acide vers la couche Ox1 sous-jacente.

Le temps écoulé, entre l'envoi des dessins de masques du IMUPMRPM et la réception des échantillons, a été mis à profit pour développer les spécifications d'ensemble du Walking-Die (cf. annexe E) et acquérir une meilleure compréhension du procédé, de ses implications, des règles de dessin et de l'outil de dessin. Cette nouvelle tentative, est donc l'occasion de faire évoluer le design vers quelque chose de plus performant. Et pour ce faire, le rotor est renforcé, le potentiel électrostatique est augmenté et un design totalement original est présenté.

5.6. Présentation des résultats du design IMUPMRPN

Le IMUPMRPN a été développé parce que le design précédent a mené à la fabrication de structures brisées qui rendaient tous tests électromécaniques impossibles. Le IMUPMRPN est plus qu'une simple correction du IMUPMRPM. Il est constitué de quatre sous-designs différents. Un d'entre eux a des caractéristiques très proches du IMUPMRPM afin de vérifier que le problème de ce dernier a bien été identifié.

5.6.1. La distribution des traces d'alimentation

La distribution des traces est totalement différente afin de répondre à une nouvelle décision touchant l'assemblage du Walking-Die. L'interfaçage entre micromoteur et circuiterie microélectronique passe désormais par la perforation du support du micromoteur au niveau des traces d'alimentation, avant les plots. Les traces d'alimentation sont arrangées de façon à être suffisamment distantes mais aussi pour s'assurer que les points d'interconnexions avec la circuiterie ne sont pas trop éloignées du micromoteur afin d'en minimiser l'espace occupé. La distribution radiale est normalement le choix naturel dans cette situation mais elle modifiée afin de conserver la possibilité de faire emballer le micromoteur dans un boîtier à fenêtre.

5.6.2. Renforcement du rotor

À l'assemblage du Walking-Die, un bras de transmission sera fixé au rotor du micromoteur. La fixation se fera sur l'anneau du rotor et les pales ne serviront plus que d'extensions vers les électrodes. Les pales du rotor du IMUPMRPM sont donc inutilement longues et étroites par rapport à leur épaisseur : 250 μ m de longueur (hors anneau du rotor), 36° d'ouverture et 2 μ m d'épaisseur. De plus, l'anneau de rotor n'offre que peu d'espace, entre le coussinet et les pales, à la fixation d'un bras de transmission. Donc pour le IMUPMRPN, les pales sont raccourcies de 150 μ m (nouvelle longueur : 100 μ m) et l'espace entre le coussinet et les pales est augmenté par la surface de l'anneau du rotor. L'angle d'ouverture des pales est conservé pour préserver la distribution des couples pale/électrode.

Pour renforcer la structure du rotor, une des particularités du procédé MUMPS est exploitée : la double épaisseur de polysilicium. Il s'agit d'utiliser les masques POLY1, POLY2 et P1P2VIA sur la même surface de façon à obtenir un dépôt de polysilicium (Poly2) sur une couche précédente (Poly1). Et d'ensuite exploiter le fait que durant le procédé, le Poly2 est surgravé au point que son masque peut définir les limites d'une double couche. Résultat : une couche unique de 3.5 μ m d'épaisseur. Cette particularité est mentionnée à la fin du document de présentation du procédé [MUMP01]. Elle n'est pas une option standard et les résultats ne sont pas garantis. L'usage de la double épaisseur de polysilicium demande la violation de deux règles de dessin : la règle H s'intitulant *POLY1 ENCLOSE P1P2VIA* et la règle L qui s'intitule *POLY2 ENCLOSE P1P2VIA*. Lors d'un usage régulier du procédé, ces règles s'assurent que le masque

P1P2VIA est toujours recouvert et débordé sur 4 μ m par POLY1 et POLY2. Cela afin de s'assurer que le via assure un bon ancrage de la couche Poly2 sur la couche Poly1.

Finalement le coussinet et le bras de rotation ont été modifié pour tenir compte de la position des moteurs durant leur usage. Dans le Walking-Die, les moteurs sont utilisés à la verticale. Le rebord inférieur du coussinet doit donc être suffisamment solide pour tenir l'inclinaison du rotor et le bras de rotation suffisamment large pour tenir le cisaillement induit par l'anneau du rotor. Dans le design IMUPMRPN, le diamètre du coussinet et celui de l'axe de rotation ont été modifiés en conséquence.

5.6.3. Augmentation du potentiel électrostatique

La puissance d'un micromoteur électrostatique est en relation directe avec la dimension des interfaces aux électrodes permises par le design. Le IMUPMRPM fonctionnait par différence de potentiels électriques entre les tranches d'une électrode et la tranche de la pale lui faisant face. La limitation des interfaces par l'épaisseur des couches pouvant être déposées est inhérente aux procédés en couches minces [Mado02] mais il existe un moyen de la contourner.

Pour commencer, la distance électrode/pale a été réduite (cf. Tableau C.2). Ajouter à cela l'usage de la double épaisseur de silicium mentionnée dans la section 5.6.2, qui augmente la dimension des interfaces, il en résulte une nette amélioration des forces disponibles. Pour aboutir à une solution encore plus efficace il faut cependant prendre une toute autre approche. C'est ainsi qu'est née l'idée de développer un micromoteur

dont les électrodes ne sont pas vis-à-vis des pales (cf. Figure 5.23) mais en dessous de ces dernières (cf.

Figure 5.22). Ainsi les interfaces n'ont plus à être développées en hauteur mais en surface. Et le développement en surface est une caractéristique de la microfabrication en couches minces.

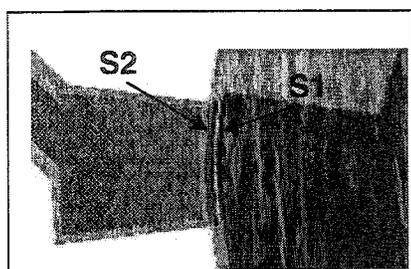


Figure 5.21 : Contrôle par les tranches/extrémités

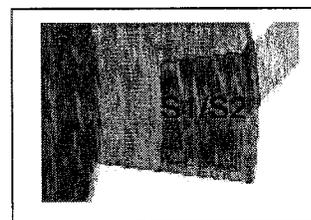


Figure 5.22 : Contrôle entre couches

À partir du Tableau C.4 (disponible à l'annexe C), nous observons que le passage de simple épaisseur à double épaisseur donne un gain en surface d'interface de 39%, tandis que le passage au contrôle de surface procure un gain de 1455%. Incidemment entre les designs IMUPMRPM et IMUPMRPN à contrôle de surface, la force normale augmente de $0.51 \times 10^{-11} \text{N/V}^2$ à $313.89 \times 10^{-11} \text{N/V}^2$ (cf. Tableau D.1) et la force tangentielle de $0.07 \times 10^{-11} \text{N/V}^2$ à $9.96 \times 10^{-11} \text{N/V}^2$ (cf.

Tableau D.2). Nous parvenons ainsi à obtenir 615 fois plus de force normale et 142 fois plus de en force tangentielle.

En appliquant ces valeurs sur la version la plus récente version de la modélisation mécanique du Walking-Die (cf. annexe E), nous obtenons une force tangentielle globale

effective de $4.89 \times 10^{-7} \text{N}$. Cette valeur est dite effective car elle inclut la pénalité induite par la friction rotor/coussinet en fonction du poids final et de la répartition de masse sur le robot. Cette force est suffisante pour surmonter la friction induite par les différents contacts avec le plancher et laisser $7.40 \times 10^{-7} \text{N}$ de disponible à l'accélération du Walking-Die (cf. annexe E).

5.6.4. Présentation des dessins de masques

Pour les dessins de masque du IMUPMRPN nous sommes partis des deux mêmes éléments de librairie que dans le cas du IMUPMRPM. Deux variantes de micromoteurs ont été développées. Pour chaque variante une version en simple et une version en double épaisseur (cf. Figure 5.23, Figure 5.24, Figure 5.25 et Figure 5.26) ont été dessinées. À l'Annexe B, se trouve une décomposition masque par masque de ces sous-designs. Ils partagent tous les mêmes dimensions de rotor et de coussinet, ainsi que la même distribution des traces d'alimentation. Le Tableau 5.6 résume ces paramètres.

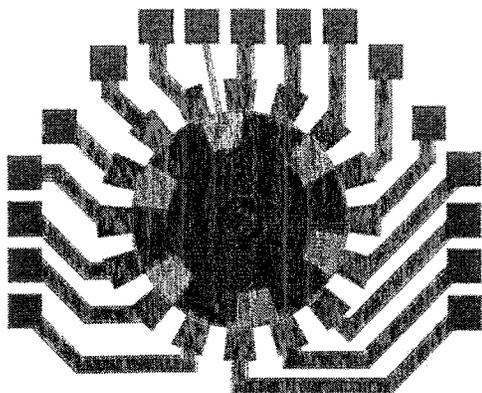


Figure 5.23 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle par la tranche (simple épaisseur)

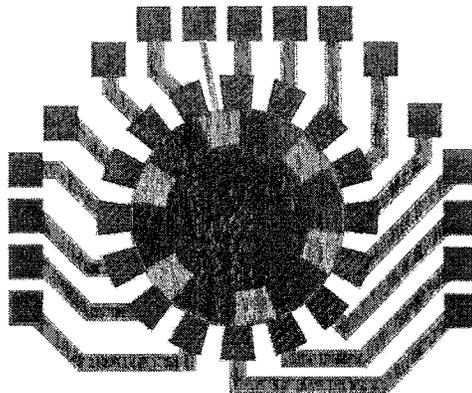


Figure 5.24 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle par la tranche (double épaisseur)

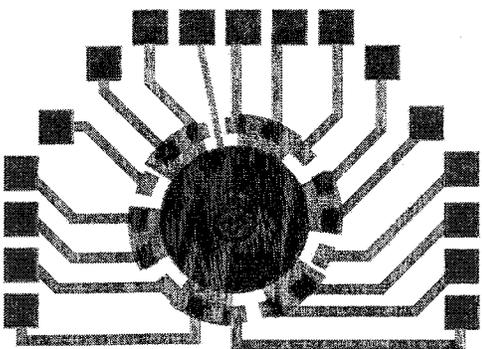


Figure 5.25 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle sous la pale (simple épaisseur)

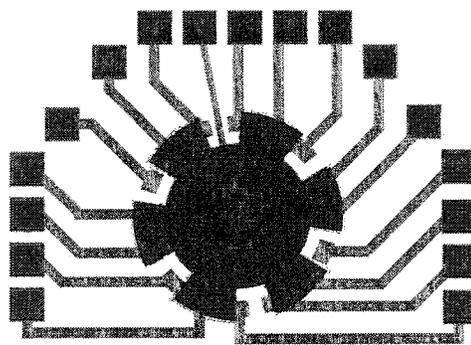


Figure 5.26 : Vue d'ensemble des masques du IMUPMRPN avec contrôle sous la pale (double épaisseur)

**Tableau 5.6 : Paramètres de ROTARY SIDE DRIVE MOTOR pour
IMUPMRPN (en μm)**

Rayon intérieur du rotor	75 (100)	Largeur angulaire des dents du rotor	36
Rayon intérieur des dents du rotor	200	Largeur angulaire de l'espace entre les dents du rotor	24
Rayon extérieur du rotor (des dents du rotor)	300	Largeur angulaire des électrodes	13.5
Rayon intérieur des électrodes	305	Largeur angulaire de l'espace entre les électrodes	9
Rayon extérieur des électrodes	400	Décalage angulaire des dents du rotor par rapport aux électrodes	18

**Tableau 5.7 : Paramètres de l'élément de librairie JOURNAL BEARING
pour IMUPMRPN (en μm)**

Rayon extérieur du coussinet/rotor (Poly1)	80	Rayon extérieur du col qui retient le coussinet/rotor (Poly2)	65
Rayon intérieur du coussinet/rotor (Poly1)	70		

Si les sous-designs à contrôle par la tranche sont similaires à ceux du IMUPMRPM, ceux à contrôle sous la pale sont totalement originaux et à notre connaissance unique dans le domaine. Les seuls micromoteurs trouvés dans la littérature qui se rapproche de ce design impliquent un contact mécanique pour le déplacement du rotor [RDVi97 et STSa00].

Pour que le contrôle électrostatique du rotor soit possible, il ne faut pas qu'il y ait contact entre les électrodes et les pales. À cet effet, des DIMPLES sont placés sous les pales à la limite du Poly0 de la zone de pivot. Ainsi, la force d'attraction électrostatique ne peut suffisamment courber les pales et les amener à entrer en contact avec le Poly0 des électrodes.

Pour ce design, il est fait un usage plus important de la couche Poly2. Elle sert encore à former le coussinet mais également à constituer la double couche de polysilicium en conjuguant les masques POLY1, POLY2 et P1P2VIA. À ce sujet, le Poly2 du coussinet et celui de la deuxième couche de polysilicium sont séparés puisque le coussinet reste fixe alors que le rotor tourne. De plus, pour permettre à la libération du rotor de se faire malgré la double épaisseur, des trous sont faits dans la couche Poly2 du rotor. Ces trous sont directement au-dessus des trous dans le Poly1. Ils sont de dimensions légèrement supérieures afin de s'assurer d'un bon recouvrement.

5.6.5. Inspection visuelle et mécanique des structures fabriquées

Pour chacun des quatre modèles envoyés à la fabrication plusieurs échantillons ont été reçus. Quelques uns sont brisés mais un nombre suffisant ont passé l'inspection visuelle et sont d'excellents candidats pour les tests électriques et mécaniques qui sont encore en cours au moment de la rédaction des présentes lignes. Les Figure 5.27, Figure 5.28, Figure 5.29 et Figure 5.30 montrent un résultat de fabrication visuellement satisfaisant pour chacun des modèles du IMUPMRPN.

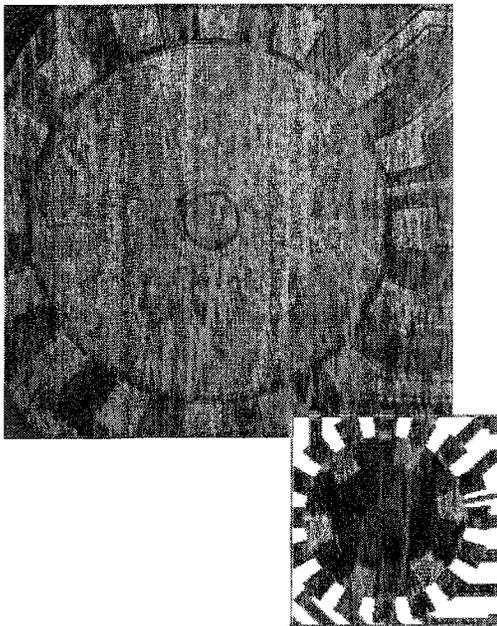


Figure 5.27 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN simple couche à contrôle par la tranche

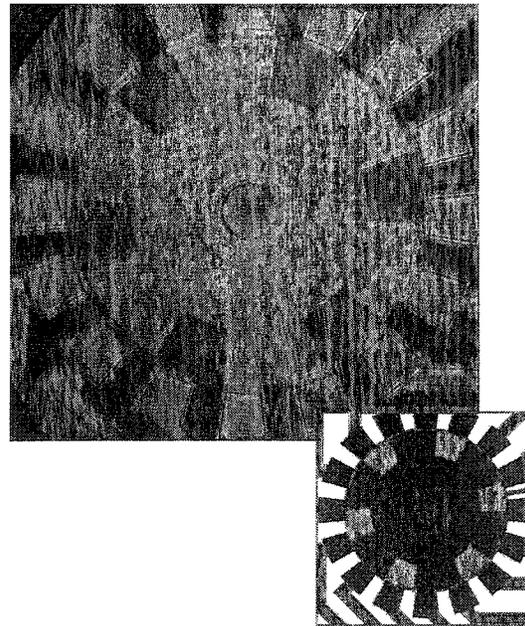


Figure 5.28 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN double couches à contrôle par la tranche

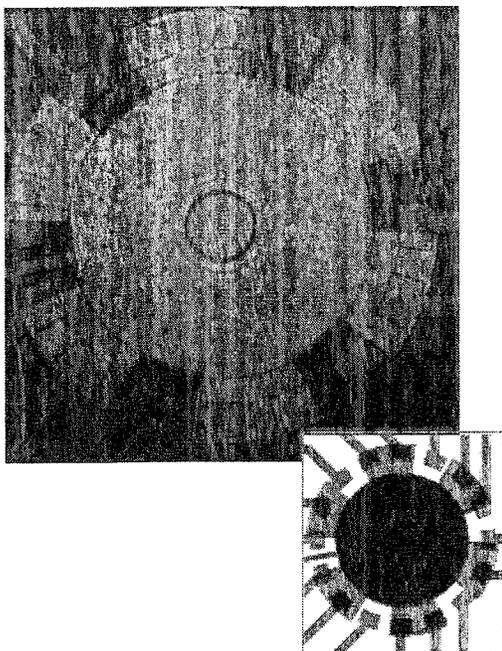


Figure 5.29 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN simple couche à contrôle par le dessous

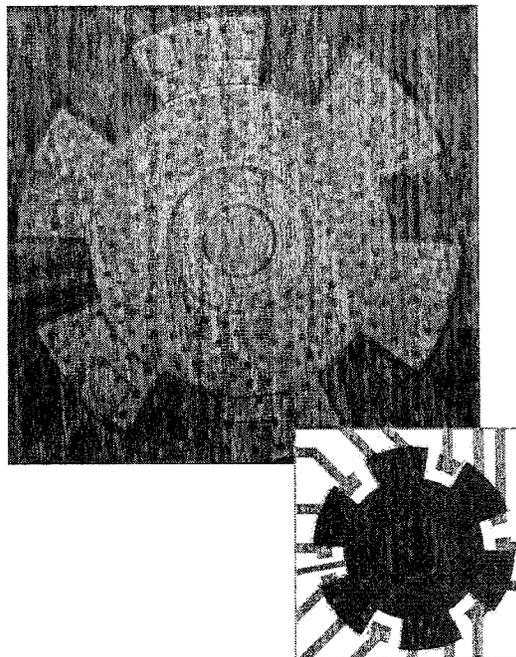


Figure 5.30 : Vue au microscope optique d'une structure IMUPMRPN double couches à contrôle par le dessous

Les bris de structures observés pour le IMUPMRPN ne ressemblent pas à ceux du IMUPMRPM. En fait nous identifions un bris et une anomalie (cf. Figure 5.31). Le bris affecte encore le rotor mais différemment du cas du IMUPMRPM quant à l'anomalie, elle touche la couche de Poly0 sur laquelle repose le rotor.

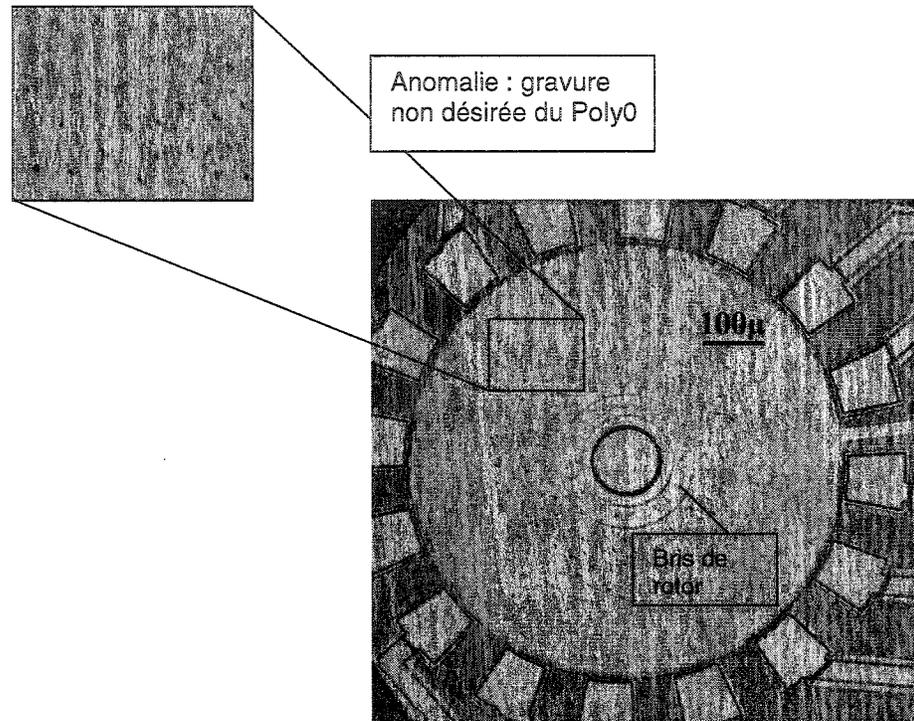


Figure 5.31 : Vue au microscope optique de l'anomalie visuelle et du bris affectant le IMUPMRPN

Dans le but de vérifier le bon relâchement des rotors, quelques structures visuellement satisfaisantes ont été testées à l'aide de la pointe d'un testeur de circuits microélectroniques. Il est important de noter que ce test est destructif puisque la pointe laisse un sillon dans la couche de Poly0. Lors de ce test, une légère pression a été appliquée sur la tranche d'une pale de rotor dans le sens de rotation de ce dernier.

Tous les échantillons à contrôle par la tranche (cf. Figure 5.32) avaient un rotor mobile alors que ceux à contrôle par le dessous (cf. Figure 5.33) semblaient ne pas bouger au

point de faire fléchir la pointe du testeur. Confiant que le relâchement du rotor est réussi, ce comportement est identifié de façon préliminaire comme une anomalie liée au choix de la méthode de contrôle du rotor.

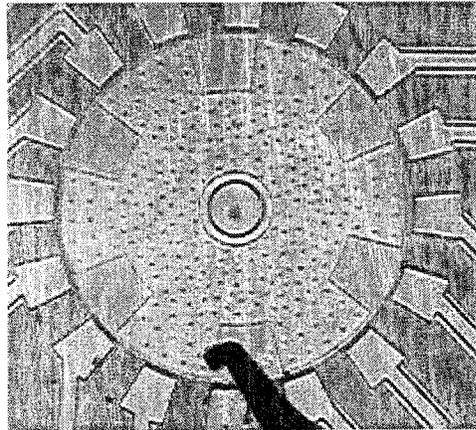


Figure 5.32 : Test de la pointe pour vérifier le bon relâchement d'une rotor à contrôle par la tranche



Figure 5.33 : Test de la pointe pour vérifier le bon relâchement d'une rotor à contrôle par en dessous

5.6.6. Analyse et interprétation du bris et des deux anomalies

Bris de rotor et gravure du Poly0

Ce bris et cette anomalie semblent affecter exclusivement les structures à rotor double épaisseur, qu'elles soient à contrôle par la tranche ou par le dessous. En juxtaposant deux échantillons d'un même modèle (cf. Figure 5.34), nous remarquons que la partie manquante du rotor est celle en double épaisseur. Rappelons que la partie du rotor retenue par le coussinet n'est pas en double couche puisque le coussinet est en Poly2. Donc le centre du rotor, qui est en Poly1 uniquement, est en place et le coussinet est intact. C'est comme si le rotor avait été découpé le long du cercle intérieur du masque POLY2 ou du masque P1P2VIA. Ce cercle se présente comme une démarcation apparente sur la surface d'un rotor complet (cf. Figure 5.34).



Figure 5.34 : Deux échantillons IMUPMRPN de même modèle dont un au rotor brisé (1)

Quant à l'anomalie qu'est la gravure du Poly0, elle n'est observée que sur les structures ayant perdu une partie de leur rotor donc affectées par le bris précédemment décrit. En juxtaposant de nouveau deux images d'un même modèle de moteur (une image avec rotor complet et l'autre avec rotor brisé, cf. Figure 5.35), il est possible de déterminer l'origine des traces gravées dans le Poly0.

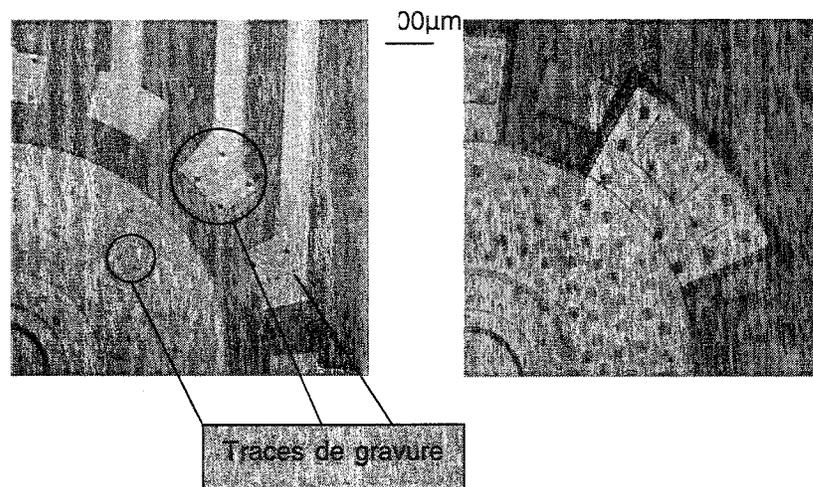


Figure 5.35 : Deux échantillons IMUPMRPN de même modèle dont un au rotor brisé (2)

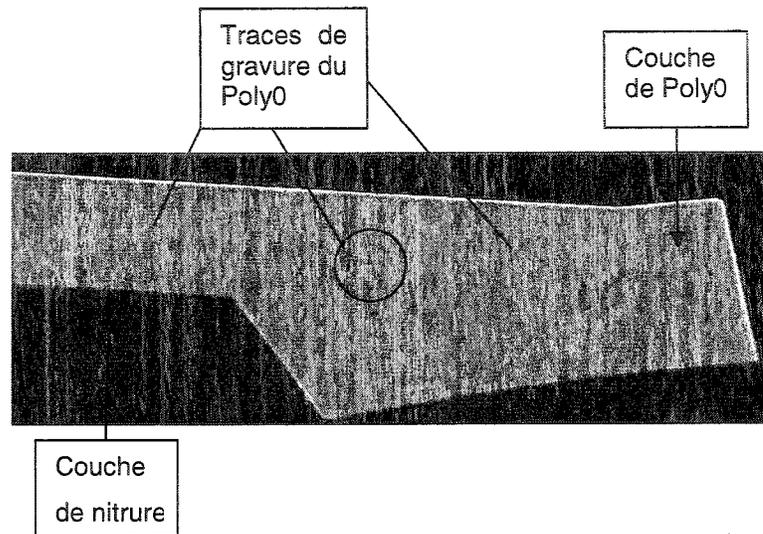


Figure 5.36 : Image au MEB des traces de gravure dans le Poly0

Ces traces qui se présentent sous la forme de points et de lignes, correspondent aux contours du rotor et aux trous dont ce dernier est recouvert. La Figure 5.36, prise au microscope électronique à balayage, permet de mieux apprécier le profil de ces gravures et leurs profondeurs. Au lieu d'être nettes, comme l'est la gravure des limites du Poly0, ces traces sont larges voire même floues ce qui accentue leur caractère accidentel.

Ces deux problèmes sont donc liés. En partant du principe qu'ils sont le fruit d'une combinaison malheureuse de masque la reconstitution des étapes (abrégées) de fabrication présentée à la Figure 5.37 permet d'expliquer leur origine.

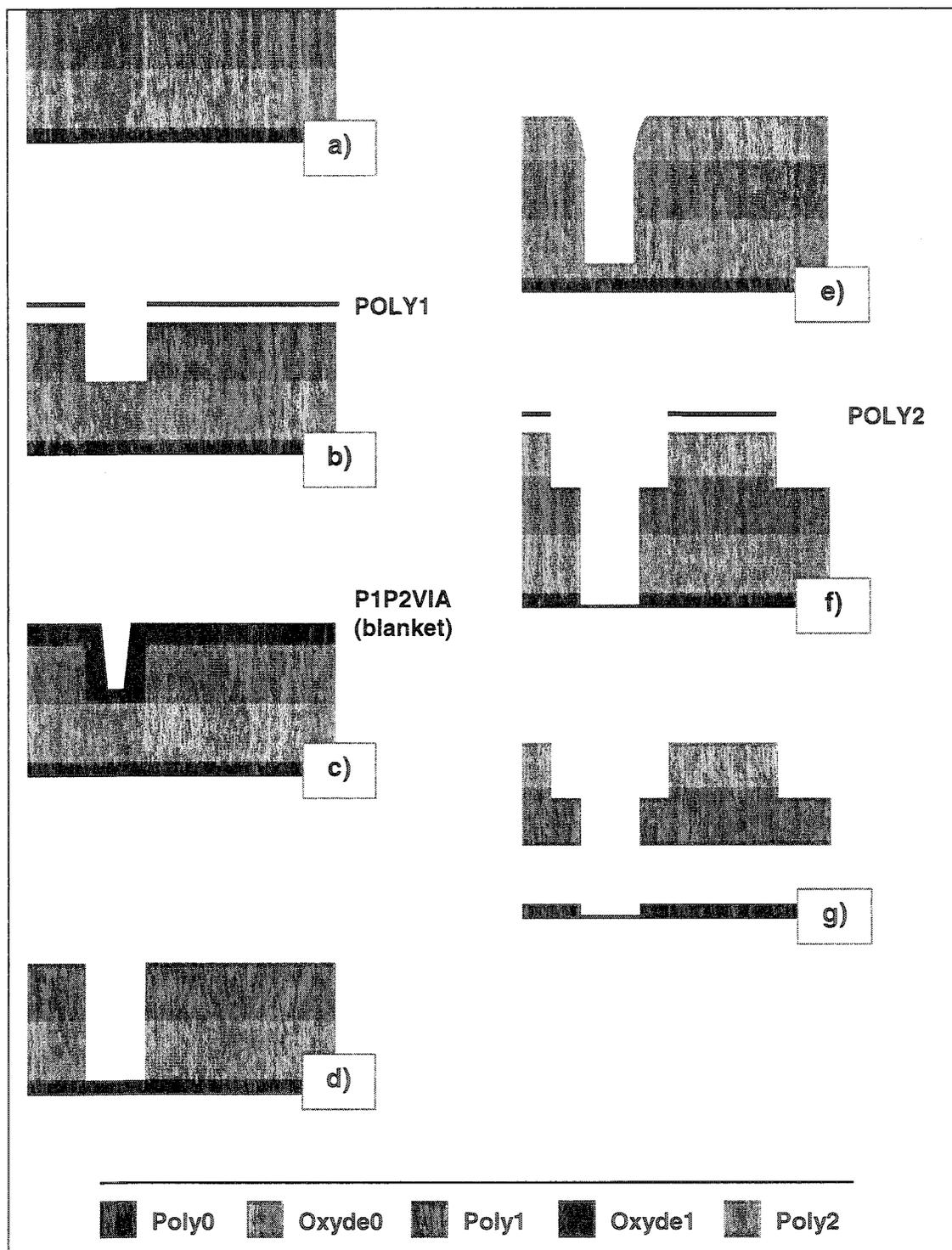


Figure 5.37 : Reconstitution des étapes ayant mené au bris du rotor et à la gravure du poly0

Rappelons d'abord que l'exploitation de la double épaisseur de polysilicium exige la violation des règles de dessin L et H. Ces règles s'assurent que le masque P1P2VIA est toujours recouvert et débordé par les masques POLY1 et POLY2. Or si elles sont suivies, il y aura toujours de l'oxyde entre le Poly1 et le Poly2 là où le masque POLY2 indique une gravure. Alors la gravure du Poly2 n'affectera pas le Poly1. La violation des règles L et H est donc nécessaire pour que la gravure du Poly2 attaque le Poly1. Ainsi le masque P1P2VIA a été dessiné plus large que l'interface POLY1-POLY2 sur le rotor. Mais en n'y mettant pas de trous correspondant à ceux du masque POLY1 (cf. Figure 5.37c et d), Ox1 a été gravé sur toute l'interface Poly1-Poly2 et dans les trous de la couche Poly1. Au dépôt de la couche Poly2, son polysilicium a partiellement rempli les trous au fond desquels le Poly0 n'est plus protégé par Ox1 (cf. Figure 5.37e). Rappelons que le masque POLY2 est identique au masque POLY1 mais avec des trous plus grands et un diamètre intérieur plus large pour éviter la soudure au coussinet lui aussi en Poly2. Ainsi lors de la gravure du polysilicium Poly2, la gravure DRIE n'étant plus arrêtée par un oxyde sous le Poly2, le Poly0 est gravé au fond des trous et le Poly1 le long du diamètre intérieur du masque POLY2 sur le rotor (cf. Figure 5.37f). Finalement, au relâchement (cf. Figure 5.37g) le Poly1 le long du diamètre intérieur de la couche Poly2 est sévèrement entamé. C'est dans le meilleur des cas que le rotor reste en place avec une zone de pivot fragilisée parce que la surgravure du Poly2 étant suffisante pour graver le Poly1, le rotor devrait systématiquement être absent.

La Figure 5.38 apporte une solution au bris de rotor et à la gravure du Poly0. Dans le dessin du masque P1P2VIA (cf. Figure 5.38d), des trous couvrent ceux du Poly1 et la surface du masque ne déborde plus l'interface Poly1-Poly2 mais elle est comprise à l'intérieur de ces limites. Ainsi, la gravure du Poly2 (cf. Figure 5.38f) s'arrête sur les régions de Ox1 préservées. Et lors du relâchement au HF (cf. Figure 5.38g), Ox1 est gravé en même temps que Ox0. Poly2 est légèrement relevée sur les bords mais bien ancrée à Poly1 et il n'y a plus de trous dans le Poly0.

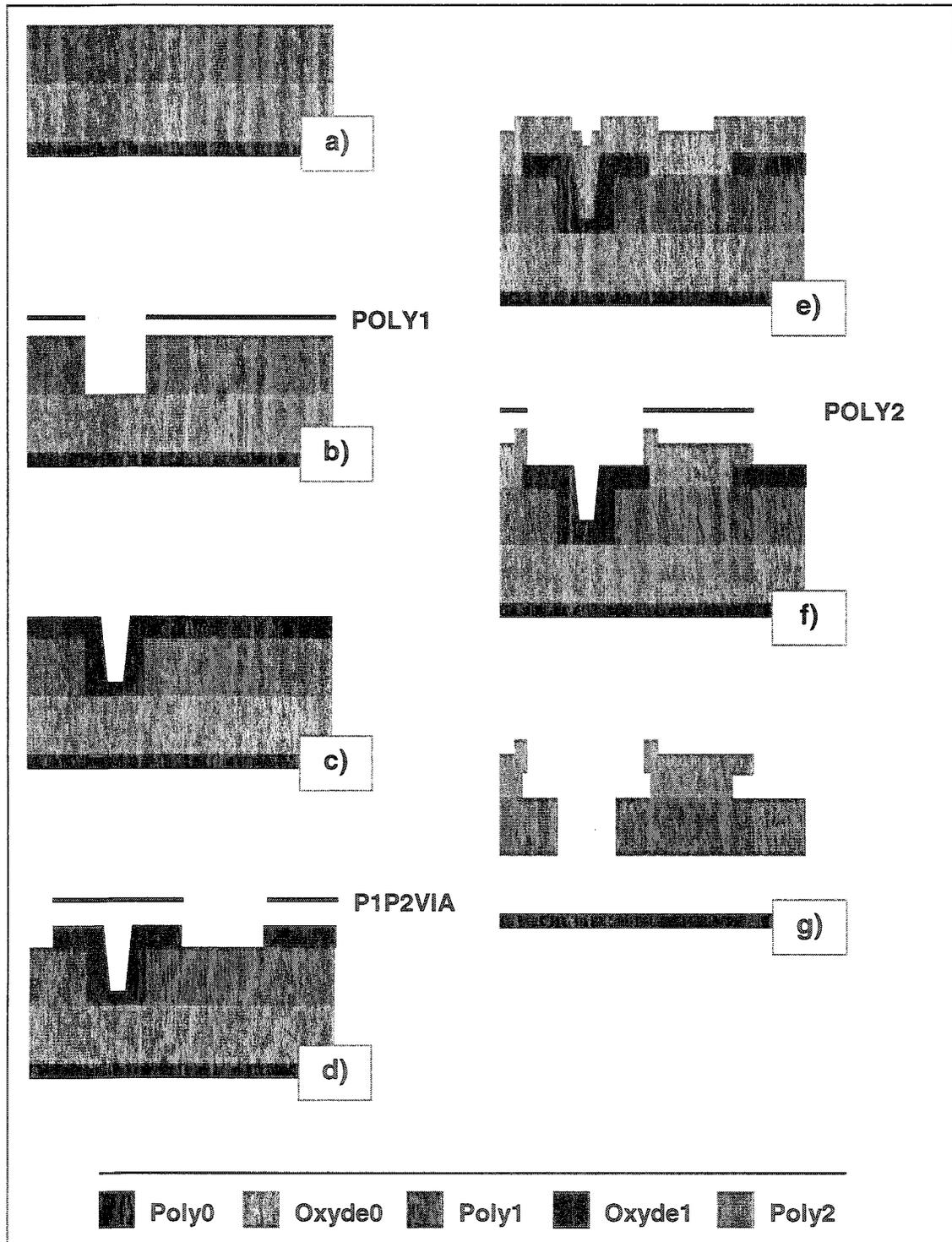


Figure 5.38 : Présentation d'une solution au bris du rotor et à la gravure du poly0

Blocage des rotors à contrôle par le dessous

Aucun des rotors de micromoteurs à contrôle par le dessous des pales sélectionnés n'a pu être déplacé avec la pointe de testeur. La Figure 5.39, la Figure 5.40 et la Figure 5.41 apportent l'explication de cette situation : La forme des électrodes est imprimée dans les pales du rotor. Il s'agit là d'un cas de "print-through".

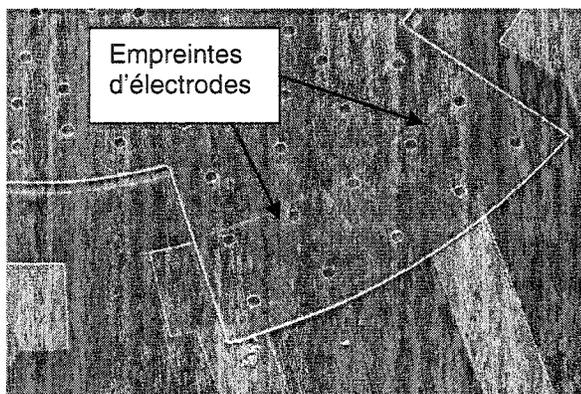


Figure 5.39 : Image au MEB du relief d'une pale de rotor à contrôle par le dessous

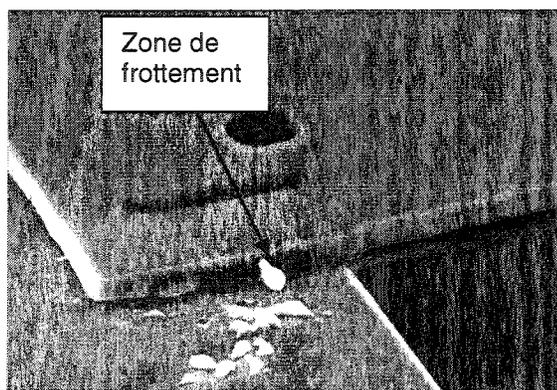


Figure 5.40 : Image au MEB de la zone de blocage d'une pale de rotor à contrôle par le dessous

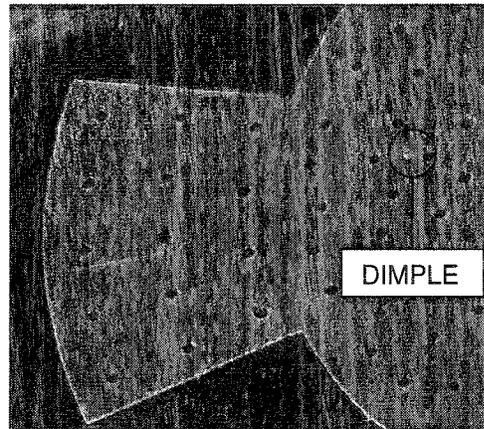


Figure 5.41 : Image au MEB du relief du dos d'une pale de rotor à contrôle par le dessous

Bien que l'oxyde (Ox1, $2.0\mu\text{m}$) déposé entre le Poly0 et le Poly1 soit 4 fois plus épais que la couche de Poly0 ($0.5\mu\text{m}$), son dépôt par LPCVD lui confère trop de conformité pour qu'il puisse absorber la topologie du Poly0. Ainsi toutes les formes du Poly0 ressortent à la surface de Ox1 et au moment du dépôt de Poly1 (également par LPCVD) elles lui sont transmises. Ce problème aurait pu être capturé avant la fabrication par une émulation du procédé mais notre outil d'émulation s'arrêtait systématiquement avant de rendre le résultat final.

Pour que se déplace le rotor, il faudrait théoriquement le lever d'au moins une fois la hauteur correspondant à l'épaisseur du Poly0. Pis, pour que fonctionne le moteur, il faudrait que le rotor reste en permanence à cette hauteur puisqu'un contact Poly0-Poly1 dans cette région du rotor équivaut à un court-circuit. Cette tâche est normalement celle des DIMPLES mais leurs 750nm de hauteur/profondeur [MUMP01] ne semblent pas suffisants. Nous n'entrevoions aucune solution par modification du design.

CONCLUSION

Nous avons présenté une approche de fabrication de micromoteurs électrostatiques visant l'obtenir de résultats probants plus rapidement que l'approche classique. En nous basant sur une liste de requis et des designs déjà existants, nous avons conçu, mené à l'usine et étudié après fabrication plusieurs designs de micromoteurs électrostatiques applicables au déplacement d'un microrobot. Toutes les étapes pour l'utilisation du procédé de fabrication MUMPS ont été suivies. Les équations physiques justifiant et validant nos décisions de design ont été présentées et appliquées. Une analyse complète de défaillances mécaniques sur des structures mécaniques en polysilicium a été menée. Et un design alternatif inédit a été développé.

Si la littérature semble déconseiller l'usage du micromoteur électrostatique comme source de motricité, c'est parce qu'elle le situe dans le contexte du déplacement d'éléments de dimensions avoisinant le centimètre. Dans notre cas, son usage est pertinent car il est employé pour le déplacement d'un robot du même ordre de grandeur que le moteur lui-même. L'application des valeurs théoriques de force développée sur le plus récent modèle mécanique logiciel du Walking-Die montre que nous avons amplement de quoi assurer les déplacements du robot. Par notre travail nous apportons une preuve théorique de l'applicabilité de la motricité électrostatique à un microrobot. Cependant, il aura fallu deux rondes de fabrication pour obtenir des échantillons viables (IMUPMRPN à contrôle par la tranche) qu'il reste encore à soumettre aux tests mécaniques. Beaucoup de données sont sorties de l'analyse des défaillances constatées.

Le travail qui a mené à la génération de ces données nous a apporté une meilleure compréhension de la problématique entourant notre projet (comment concevoir un micromoteur électrostatique pour un microrobot ?). De plus en identifiant les causes de bris et en proposant des mesures correctives tout en améliorant le potentiel moteur des structures, une expérience importante a été acquise.

Si l'approche classique de conception d'un MEMS avait été suivie, ce travail aurait consisté en une modélisation par éléments finis. L'ajout de cette étape aurait sans doute permis d'éviter quelques uns des problèmes rencontrés mais au prix de délais considérables. Avec notre approche, nous avons eu besoin d'effectuer deux rondes de fabrication. La faiblesse de notre approche n'est pas tant de sauter des étapes de simulation/modélisation que de placer trop de confiance dans les outils et le procédé. À deux reprises, les outils ont été utilisés au meilleur de nos capacités et le DRC a été respecté mais des bris de structure et des anomalies de fabrication sont survenus. Les outils logiciels peuvent aider à pallier aux lacunes mais ne sauraient apporter les compétences nécessaires pour être en mesure de couvrir toutes les étapes de conception puisque trois domaines différents du génie sont mis à contribution : physique, mécanique et électrique. La personne qui suit notre approche se devrait donc d'être suffisamment solide dans ces domaines afin de faire des choix qui ne mènent pas à des erreurs. Prenons par exemple les outils de dessins de masques. Ils sont faciles à utiliser au point que n'importe qui de suffisamment patient (pour suivre plusieurs cycles DRC/corrections) peut soumettre des dessins de masques à une usine. Cependant, très

peu mèneront à des structures viables et fiables car il faut un important bagage technique pour maîtriser les implications des décisions de design qui aboutissent aux dessins finaux. Incidemment, deux autres facteurs sont à considérer : le temps et les ressources.

La conception assistée par ordinateur permet d'accélérer le flot de design global d'un micromoteur électrostatique mais il faut s'assurer que les outils de vérification sont appropriés aux niveaux de complexité de la structure du moteur. Dans notre cas, il y avait 2 niveaux de DRC (Design Rules Check) : dans l'outils de dessin et à la CMC avant l'envoi à l'usine. Le premier faisait abstraction des formes circulaire et le second ne semblait pas vérifier les trous dans les couches de polysilicium de forme circulaire. Dans un cas comme dans l'autre, l'outil vérifiait le respect de la règle mais dans des contextes qui excluait notre design.

Étant donné le temps et les efforts mis dans leur conception, nous espérons beaucoup des structures du IMUPMRPN encore en test. Comme le projet est constamment en évolution, il est fort probable qu'il ne s'agisse pas de la version finale du micromoteur mais aucun changement majeur n'est attendu.

RÉFÉRENCES

[ADM03] W. André, J.A. Delafosse, S. Martel, "Walking-Die: Using MEMS and SoC for a miniature robot designed for nanoscale operations", CCECE/CCGEI 2003, Montréal, mai 2003.

[AnMa03] W. André, S. Martel, "Development of an embedded electronic system using system-on-chip methodology for a miniature robot designed for nanoscale operations," conférence NEWCAS, Montréal, 2003.

[Chen93] C. Chen, "Introduction to scanning tunneling microscopy", New York: Oxford University Press, 1993.

[CMC02] "MEMS Design Flow & Device Level Modeling Using T-Spice Simulator of MEMS Pro V3.0 Design Environment", CANADIAN MICROELECTRONICS CORPORATION, Version 1.0, ICI-101, August 16, 2002

[Fedd03] G.K. Fedder, "MEMS fabrication", Proceedings. International Test Conference 2003 (IEEE Cat. No.03CH37494, pt. 1, p 691-8 Vol.1), 2003.

[FreS98] P.J. French, P.M. Sarro, "Surface versus bulk micromachining: the contest for suitable applications", Journal of Micromechanics and Microengineering, v 8, n 2, p 45-53, June 1998.

[GSES03] A. A. Geisberger, Member, ASME, N. Sarkar, M. Ellis et G. D. Skidmore, "Electrothermal Properties and Modeling of Polysilicon Microthermal", Journal of Microelectromechanical Systems, vol.12, n.4, août 2003.

- [HiKa91] F. Hiroyuki, G.J. Kaigham, "New Opportunities for Micro Actuators", IEEE, 1991
- [JDBG94] T.B. Johansson, M. Van Dessel, R. Belmans, W. Greysen, "Technique for finding the optimum geometry of electrostatic micromotors", IEEE Transactions on industry applications, vol.30, n.4, juillet-août 1994
- [JHB96] T.B. Johansson, K. Hameyer, R. Belmans, "Methods and Tools for the Design of Electrostatic Micromotors", IEEE, 1996.
- [KEMN00] S. Kleen, W. Ehrfeld, F. Michel, M. Nienhaus, H.-D. Stölting, "Penny-motor: a family of novel ultraflat electromagnetic micromotors", ACTUATOR 2000, My motors and actuators, Institute of Microtechnology Mainz, 2000.
- [KFJa03] D.J. Keating, M. Farina, I. Jafri, "Electromechanical and electromagnetic analysis of two and three-plates voltage-controlled-oscillator (VCOS) with micromachined tunable capacitors", DTIP of MEMS and MOEMS, 2003
- [KuGa00] A.Kucukkomurler, S.L.Garverick, "Optimized step controllerfor salient-pole micromotor", IEEE, 2000
- [Mado02] J.-M. Madou, "Fundamentals of microfabrication", CRC Press LLC, 2002
- [Malu99] Nadim Maluf, "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering", ARTECH HOUSE MEMS LEBRARY, Boston -London: pp. 41-83, 176-200, pp. 201-235, 1999.
- [MBao00] M.H. Bao, "Micro mechanical transducers : pressure sensors, accelerometers and gyroscopes", Amsterdam : Elsevier, Handbook of sensors and actuators, v.8, 2000.

[MCOF01] S. Martel, L. Cervera Olague, J. Bautista Coves Ferrando, S. Riebel, T. Koker, J. Suurkivi, T. Fofonoff, M. Sherwood, R. Dyer, and I. Hunter, "General description of the wireless miniature NanoWalker robot designed for atomic-scale operations", *Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microassembly*, Vol. 4568, pp. 231-240, Newton, MA, Oct. 29-31, 2001

[MDMH99] S. Martel, K. Doyle, G. Martinez, I. Hunter, and S. Lafontaine, "Integrating a complex electronic system in a small scale autonomous instrumented robot: the Nano Walker project," *Proceedings of SPIE, Microrobotics and microassembly*, Vol. 3834, pp. 63-74, Boston, USA, Sept. 1999.

[MNET] <http://www.memsnet.org/material/polysiliconfilm/> (dernière visite : 30 avril 2004)

[MSBR03] S. Martel, A. Schindler, G. Baumann, S. Riebel, and T. Boitani, "Cooling platform for an automated nanofactory based on a fleet of miniature robots designed for atomic scale operations", *IEEE Automation 2003*, Taiwan, May 8-11, 2003

[MSHQ01] S. Martel, M. Sherwood, C. Helm, W. G. de Quevedo, T. Fofonoff, R. Dyer, J. Bevilacqua, J. Kaufman, O. Roushdy, and I. Hunter, "Three-legged wireless miniature robots for mass-scale operations at atomic scale," *Proceedings of the 2001 Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3423-3428, 2001.

[MUMP01] D.A. Koester, A. Cowen, R. Mahadevan, M. Stonefield et B. Hardy, "MUMPs Design Handbook", revision 10.0, MEMSCAP, 2003.

[MUMP02] "PolyMUMPs FAQ", revision 1.0, MEMSCAP, 2004.

[Nath67] H.C. Nathanson, et al., "The Resonant Gate Transistor", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 14, no. 3, pp 117-133, march 1967.

[Pasc89] Friedrich Paschen, "Über die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff and Kohlensäure bei verschiedenen Drücken erforderliche Potentialdifferenz" (Weid. Annalen der Physick, 1889.

[Polla71] H.-W. Pollack, "Applied physics", 2d ed., Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1971.

[RDVi97] Ph. Robert, J. S. Danel, P. Villard, " The electrostatic ultrasonic micromotor," Publication Journal of Micromechanics and Microengineering, v.7, n.3 , p.170, 1997.

[SCAP02] http://www.memscap.com/pr_021031.html (dernière visite : 30 avril 2004)

[Slou76] David F. Sloul, "Microprocessor Applications Handbook" (Book style), Harold B. Crawford and Ruth L. Weine, Ed. New York: McGraw-Hill, ch 5, 8, 10 et 12, 1976

[SSRW99] V. D. Samper, A. J. Sangster, R. L. Reuben, U. Wallrabe, " Torque Evaluation of a LIGA Fabricated Electrostatic Micromotor," Publication IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, v.8, n.1, p.115, 1999.

[STIC] <http://memsurface.com/stiction.html> (dernière visite : 15 juillet 2004)

[Strem90] Ferrel G. Stremler, "Introduction to Communication Systems" (Book style) 3rd Ed, ADDISON-WESLEY SERIES IN ELECTRICAL ENGINEERING: pp. 531-600, pp.610-626, 1990.

[STSa00] Y. Suzuki, K. Tani, T. Sakuhara, "Development of a new type piezoelectric micromotor," Publication Sensors and Actuators - A - Physical Sensors, v.83 , n. 1-3 , p.244, 2000.

[TSME03] N.R. Tas, T. Sonnenberg, R.Molenaar, M. Elwenspoek, "Design, fabrication and testing of laterally driven electrostatic motors employing walking motion and mechanical leverage", JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING, vol.13 N6–N15, 2003

[XSS02] W. Xinli, C. Shumei, C. Shukang, "Advantages of Electrostatic Micromotor and its Application to Medical Instruments", IEEE. 2002.

ANNEXES

A. Visualisation masque par masque du IMUPMRPM

Le design IMUPMRPM regroupe quatre déclinaisons de micromoteurs qui sont la combinaison de deux diamètres de rotors et de deux organisations des traces d'alimentation (cf. CHAPITRE 5). La variation du diamètre n'affecte en rien la distribution des électrodes, ni celle des pales du rotor. Quant à l'organisation des traces d'alimentation, elle n'affecte pas non plus le cœur du design qu'est le couple stator/rotor.

Dans cette section de l'annexe, nous désirons présenter les différentes couches des micromoteurs du IMUPMRPM qui entrent dans la structuration du couple stator/rotor. Les traces ont été conservées sur le dessin à titre indicatif et ne doivent pas être prises en compte pour respecter le mandat de cette présentation.

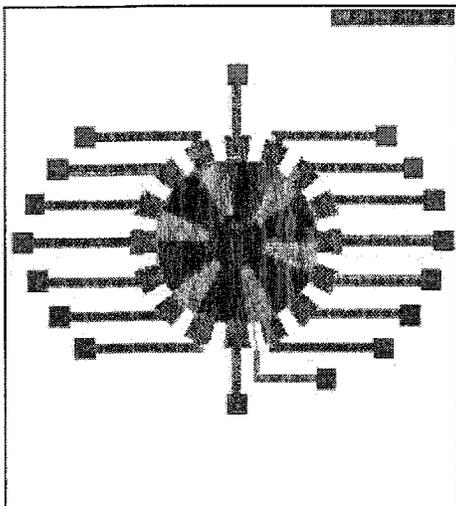


Figure A.1 : IMUPMRPM - Toutes les couches

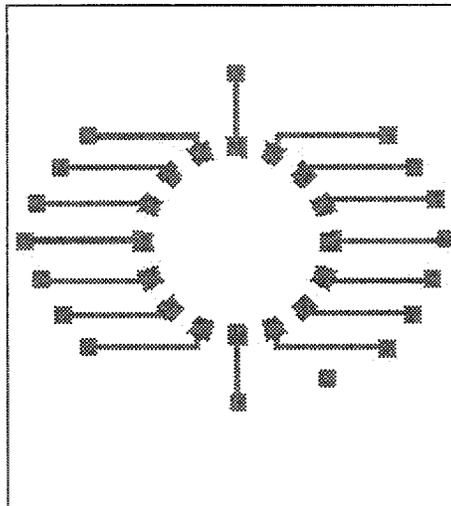


Figure A.3 : IMUPMRPM - ANCHOR1

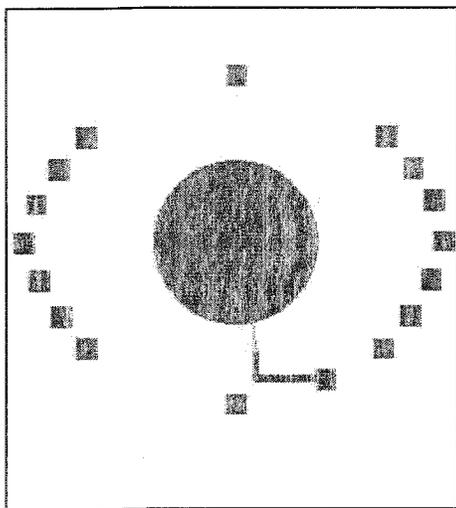


Figure A.2 : IMUPMRPM - POLY0

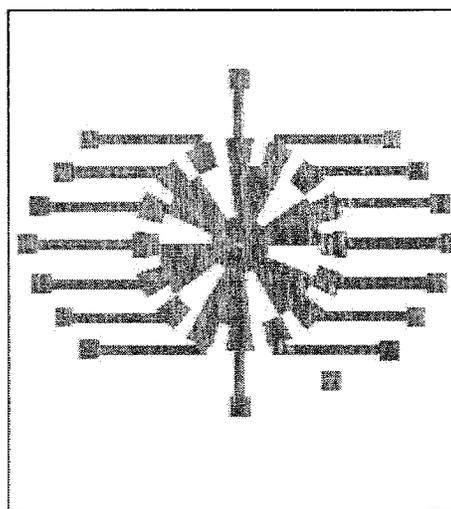


Figure A.4 : IMUPMRPM - POLY1

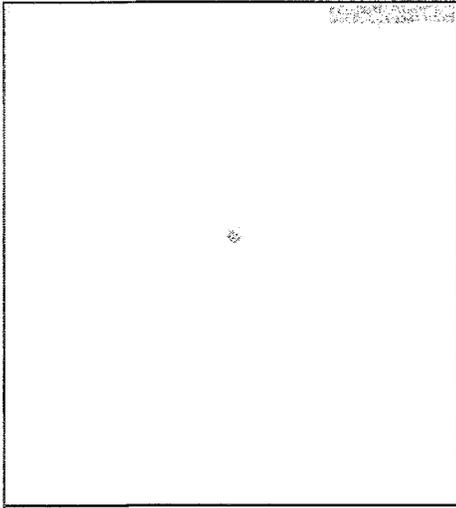


Figure A.5 : IMUPMRPM - ANCHOR2
(surdimensionné)

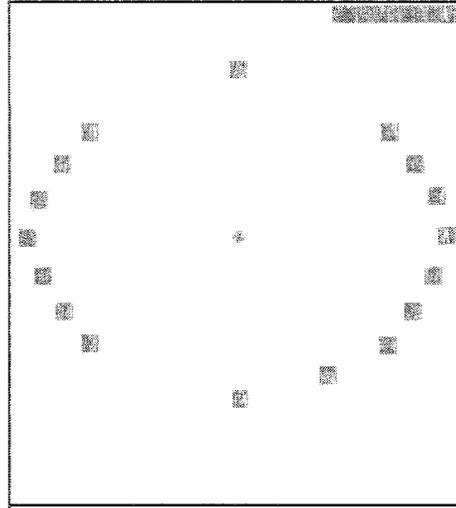


Figure A.7 : IMUPMRPM - POLY2

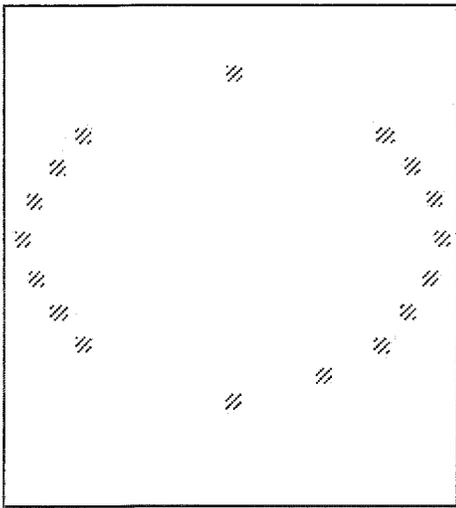


Figure A.6: IMUPMRPM - P1P2VIA

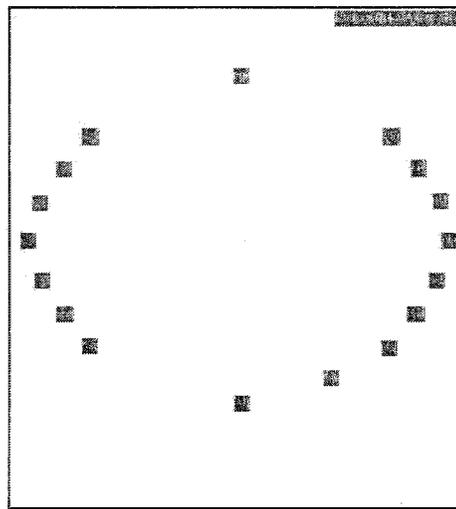


Figure A.8: IMUPMRPM - MÉTAL

Première couche de polysilicium déposée durant la procédure de microfabrication, Poly0 dont la forme obéit au masque POLY0 (cf. Figure A.2), est plus une couche de base qu'une couche structurelle. C'est sur elle que repose le rotor (en Poly1) et c'est elle qui lui impose son potentiel électrique. À cet effet, une trace de Poly0 relie la zone de Poly0 en dessous du rotor à un plot (zone de mise en contact électrique avec l'environnement extérieur au design).

Poly0 constitue la première couche des plots et des électrodes. Il est à noter que Poly0 est déposée sur une couche de nitrure qui isole électriquement et mécaniquement les différentes zones qui ne sont pas en contact direct.

Deuxième couche de polysilicium déposée, Poly1 dont la forme obéit au masque POLY1 (cf. Figure A.4) est la première véritable couche structurelle du procédé. Notre rotor est exclusivement en Poly1.

Le masque POLY1 est parsemé de trous en HOLE1 afin de permettre la gravure de l'oxyde liant Poly1 mécaniquement à Poly0. Ces trous sont générés automatiquement par l'outil de dessin MEMS Pro L-Edit de MEMsCAP sur les pales mais doivent être ajoutés manuellement sur la rondelle liant les pales avec un espacement maximum de 30 microns. Leur omission résultera en une violation de règle de dessin et en une soudure des couches Poly0 et Poly1.

Le masque POLY1 dessine également une partie des électrodes car il permet que soit déposée la couche de polysilicium qui portera les électrodes à la même hauteur que les pales du rotor.

Le trou au milieu du rotor sert à insérer le point de pivot que nous observons avec les masques ANCHOR2 (cf. Figure A.5) et POLY2 (cf. Figure A.7).

Le masque ANCHOR1 (cf. Figure A.3) permet d'indiquer les zones sur lesquelles nous désirons graver la première couche d'oxyde sacrificiel, Ox1. Comme indiqué précédemment, pour graver une zone de Ox1 sous une large surface de Poly1, il faut utiliser le masque ANCHOR1 en conjugaison avec le masque HOLE1 afin que soient gravés des trous à travers la couche de Poly1. Sinon la gravure latérale ne peut aller plus loin que quelques dizaines de microns à travers l'oxyde sous le polysilicium.

Troisième et dernière couche de polysilicium déposée, la forme du Poly2 obéit au masque POLY2 (cf. Figure A.7). Le dessin du masque POLY2 montre le point de pivot du rotor. Le masque ANCHOR2 agit sur le second oxyde (Ox2) qui se trouve entre les couches Poly1 et Poly2, comme le masque ANCHOR1 sur Ox1 entre Poly0 et Poly1. En fait, ANCHOR2 permet de graver Ox2 et Ox1 si les deux oxydes ne sont pas séparés par une couche de Poly1. Ainsi, l'absence de Poly1 ajoutée à l'usage combiné des masques ANCHOR2 et POLY2 permet d'obtenir un dépôt direct du Poly2 sur le Poly0, ce qui résulte en un ancrage du bras autour duquel tournera le rotor.

Il est à noter que la rondelle de Poly2 dessinée avec le masque POLY2 a un diamètre plus important que le trou au centre du rotor en Poly1. Contrairement au dessin de la rondelle du masque ANCHOR2 dont le diamètre est inférieur à celui du trou du rotor. C'est ainsi que l'on obtient un bras de rotation avec un coussinet : le centre de la

rondelle en Poly2 est fixé sur la base en Poly0 tandis que les rebords extérieurs de la rondelle montent au-dessus de la couche Poly1 du rotor jusqu'à ce que les deux couches se superposent suffisamment pour qu'il y ait rétention du Poly1. Résultat : un rotor retenu en son centre mais libre de tourner autour du bras.

B. Visualisation masque par masque du IMUPMRPN

Le design IMUPMRPN est une évolution du design IMUPMRPM. Nous l'avons développé principalement pour contrer les défaillances observées après un retour sur notre design IMUPMRPM dont la fabrication a résulté en une structure inutilisable en tant que moteur électrostatique. Il intègre également plusieurs améliorations et innovations.

Le design IMUPMRPN regroupe quatre déclinaisons de micromoteurs qui sont la combinaison de deux modes de contrôle du rotor et de deux épaisseurs de rotor (cf. chapitre Résultats). Contrairement au IMUPMRPM, pour le design IMUPMRPN nous avons utilisé une seule distribution de traces d'alimentation et une seule dimension de rotor. Dans cette section de l'annexe, nous désirons présenter les différentes couches du IMUPMRPN qui entrent dans la structuration du couple stator/rotor. Les traces ont été conservées sur le dessin à titre indicatif et ne doivent pas être prises en compte pour respecter le mandat de cette présentation.

Pour simplifier la lecture de la présente section et en réduire la taille, les quatre déclinaisons ont été regroupées en deux groupes : Contrôle par la tranche (des pales) et Contrôle par le dessous (des pales). Chaque groupe est caractérisé par un mode différent de contrôle du rotor. Ces modes de contrôle sont exposés et expliqués dans le CHAPITRE 4.

Dans chaque groupe nous détaillons une version dite « simple épaisseur » et une version « double épaisseur ». Ces dénominations de version font principalement référence au nombre de couches de polysilicium employées pour constituer le rotor. Plus d'informations sur ce sujet sont disponibles au CHAPITRE 5.

Contrôle par la tranche

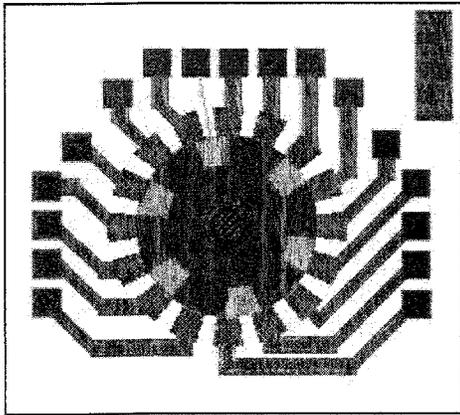


Figure B.1 : Contrôle par la tranche - Toutes les couches (rotor simple couche)

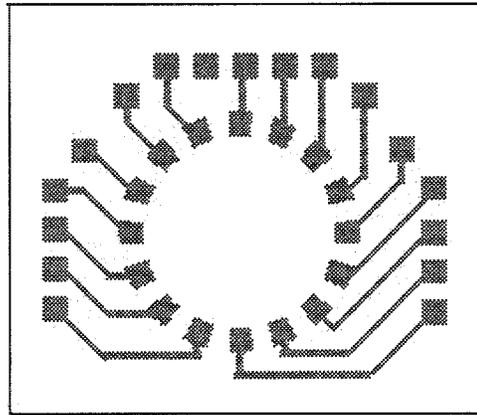


Figure B.3 : Contrôle par la tranche - ANCHOR1

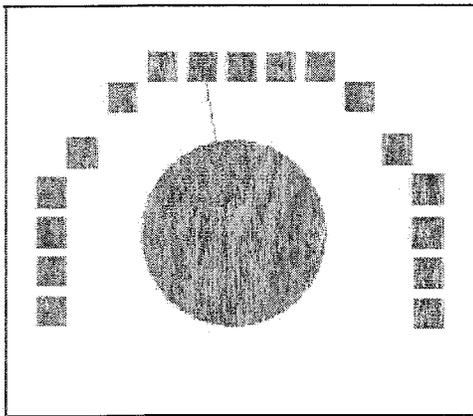


Figure B.2 : Contrôle par la tranche - POLY0

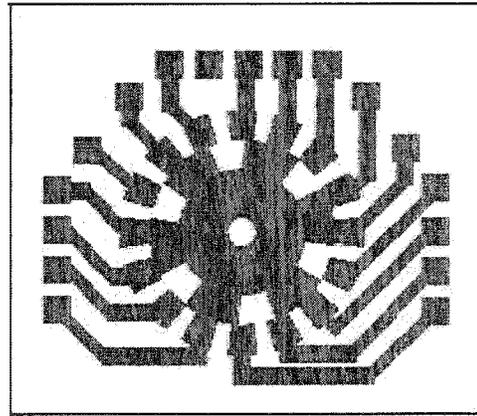


Figure B.4 : Contrôle par la tranche - POLY1

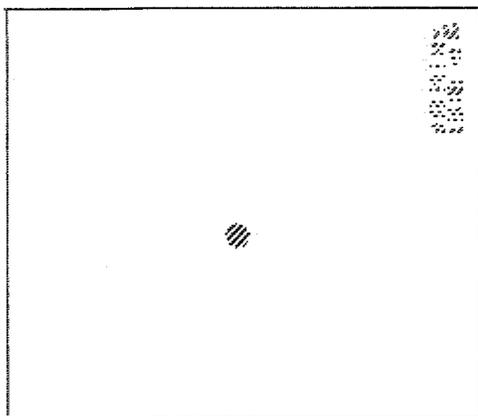


Figure B.5 : Contrôle par la tranche - ANCHOR2

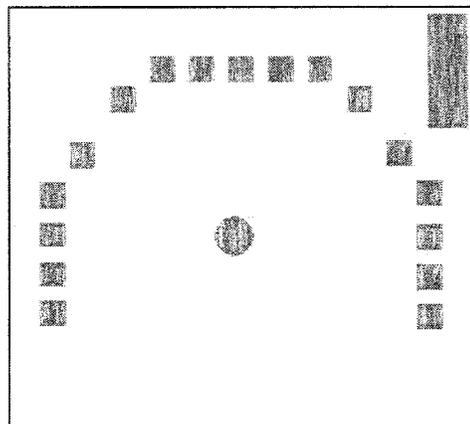


Figure B.7 : Contrôle par la tranche - POLY2 (rotor simple couche)

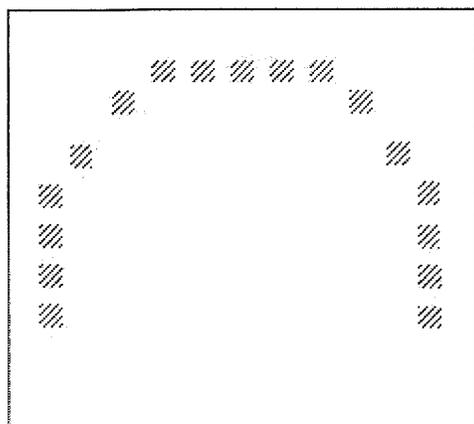


Figure B.6 : Contrôle par la tranche - P1P2VIA (rotor simple couche)

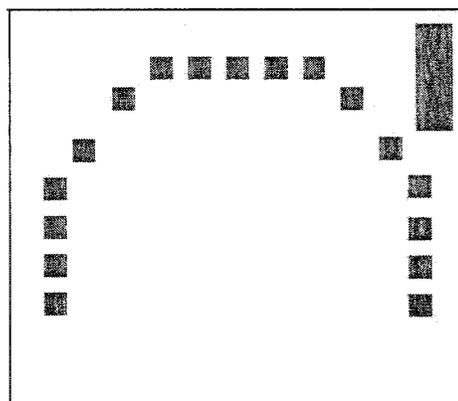
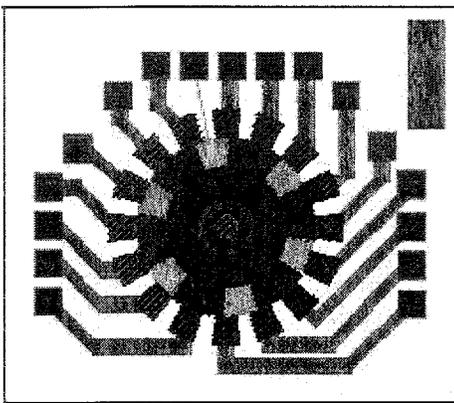


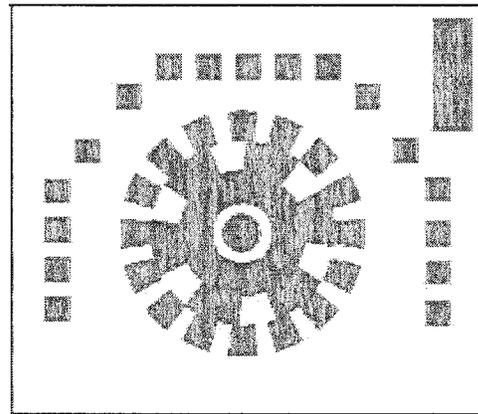
Figure B.8 : Contrôle par la tranche - MÉTAL

La Figure B.1 présente le dessin d'ensemble du micromoteur simple épaisseur à contrôle par la tranche. En double épaisseur (cf. Figure B.9) les masques P1P2VIA et POLY2 de la séquence précédente sont remplacés par ceux illustrés sur la Figure B.10 et la Figure

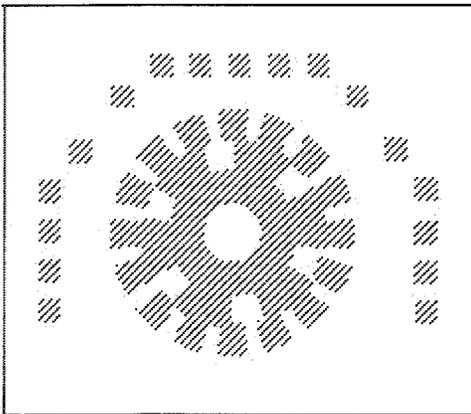
B.11 ci-après. Le résultat est un rotor et des électrodes constitués par la superposition d'une couche de Poly1 et d'une couche de Poly2. Il est à noter que la deuxième couche du rotor à une ouverture au centre plus large que celle de la couche Poly1 afin d'éviter la soudure du coussinet et du rotor (tous deux en Poly2).



**Figure B.9 : Contrôle par la tranche -
Toutes les couches (rotor double couche)**



**Figure B.11 : Contrôle par la tranche -
POLY2 (rotor double couche)**



**Figure B.10 : Contrôle par la tranche -
P1P2VIA (rotor double couche)**

Les rôles des différentes couches de cette version de micromoteur sont exactement les mêmes que pour l'ensemble des micromoteurs du design IMUPMRPM. Nous n'en reprenons donc pas la description et faisons plutôt référence à l'annexe A.

Contrôle par le dessous

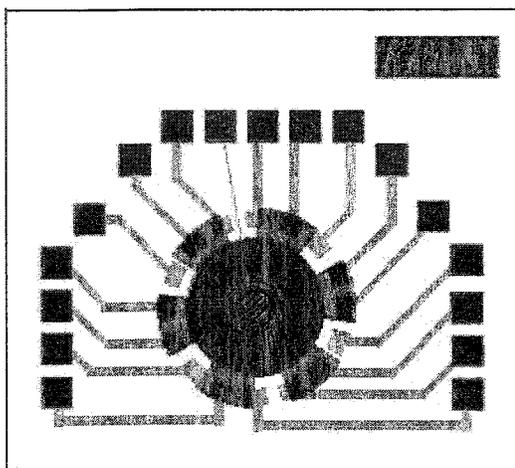


Figure B.12 : Contrôle par le dessous - Toutes les couches (rotor simple couche)

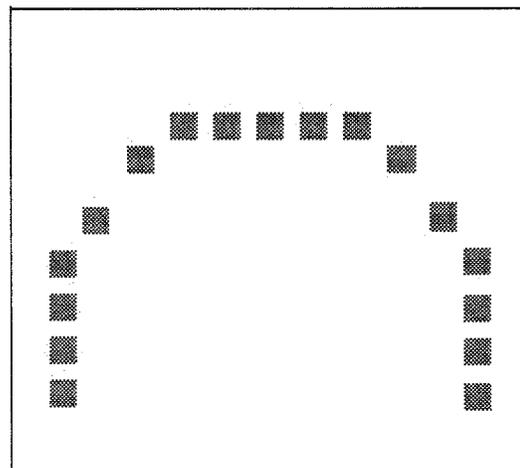


Figure B.14 : Contrôle par le dessous - ANCHOR1

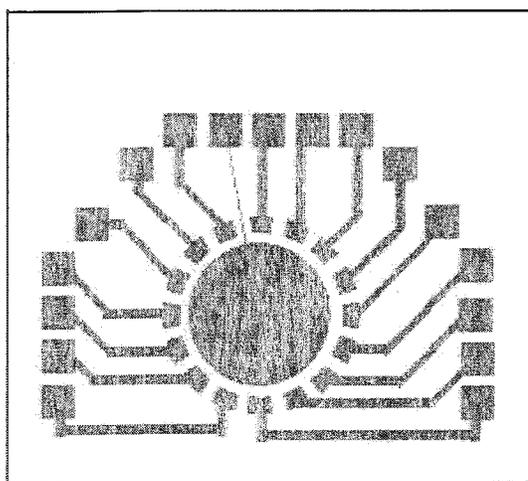


Figure B.13 : Contrôle par le dessous - POLY0

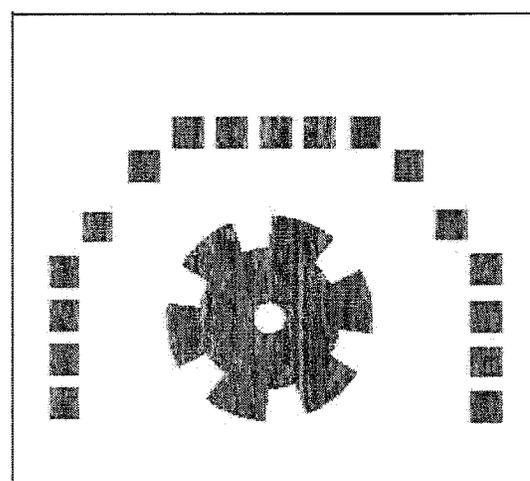


Figure B.15 : Contrôle par le dessous - POLY1

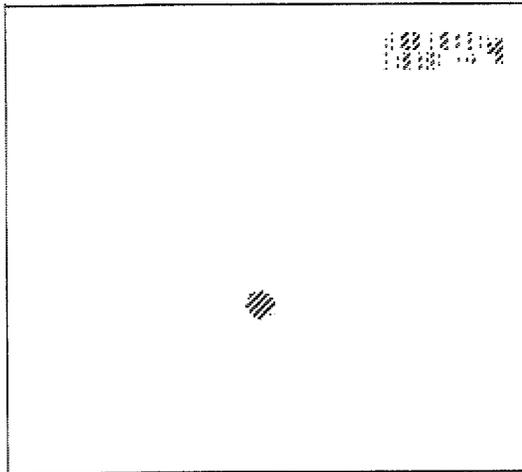


Figure B.16 : Contrôle par le dessous -
ANCHOR2

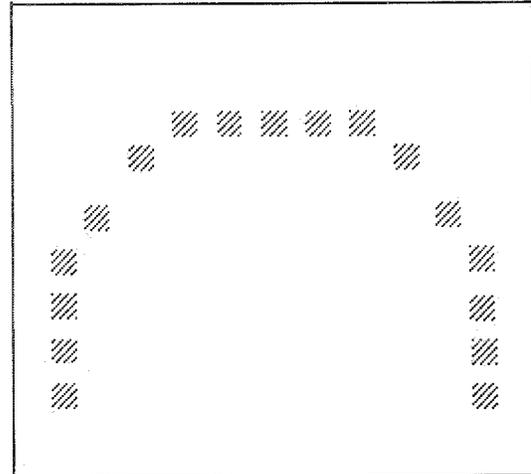


Figure B.18 : Contrôle par le dessous -
P1P2VIA (rotor simple couche)

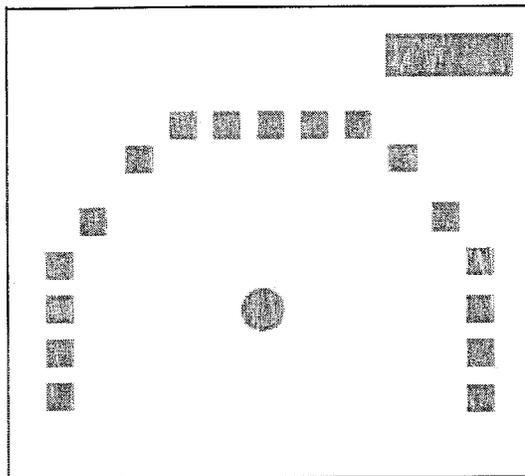


Figure B.17 : Contrôle par le dessous - POLY2
(rotor simple couche)

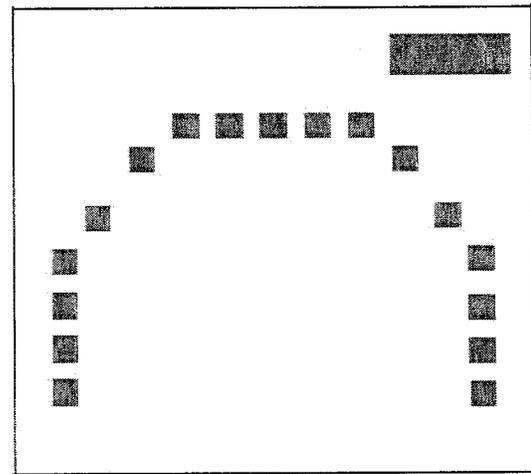


Figure B.19 : Contrôle par le dessous -
MÉTAL

La Figure B.12 présente le dessin d'ensemble du micromoteur simple épaisseur à Contrôle par le dessous. En double épaisseur (cf. Figure B.20) les masques P1P2VIA et POLY2 de la séquence précédente sont remplacés par ceux illustrés sur la Figure B.22 et la Figure B.21 ci-après. Il est à noter que la deuxième couche du rotor à une ouverture au

centre plus large que celle de la couche Poly1 afin d'éviter la soudure du coussinet et du rotor (tous deux en Poly2).

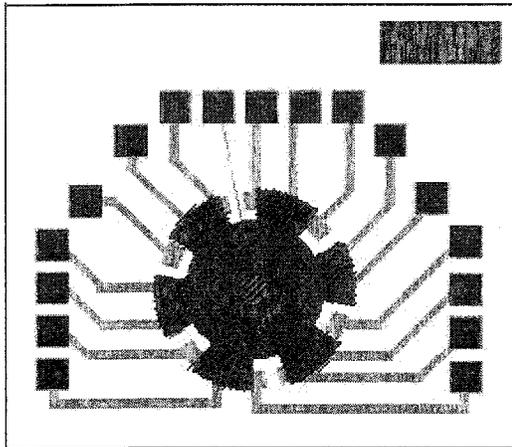


Figure B.20 : Contrôle par le dessous - Toutes les couches (rotor double couche)

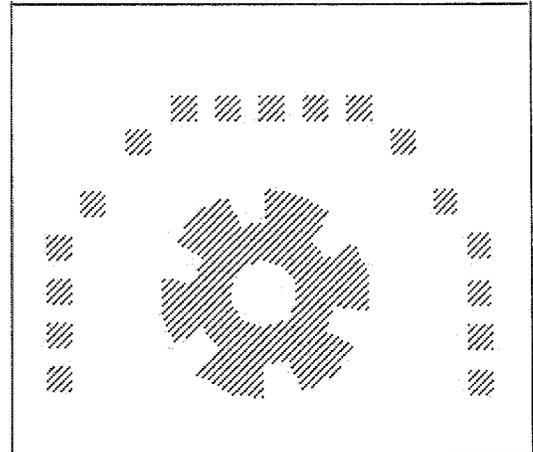


Figure B.22 : Contrôle par le dessous - P1P2VIA (rotor double couche)

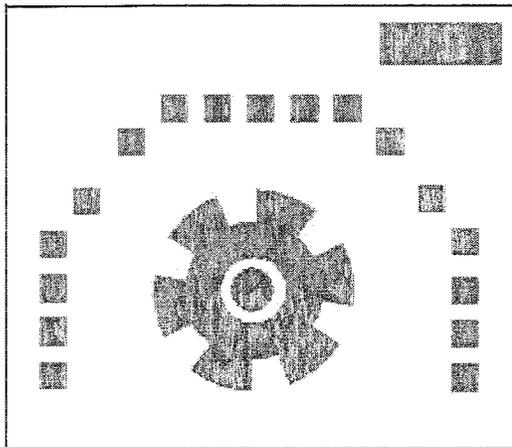


Figure B.21 : Contrôle par le dessous - POLY2 (rotor double couche)

Le texte qui suit se veut un complément de celui décrivant les couches du design IMUPMRPM. Étant donné que les modifications apportées à IMUPMRPM pour engendrer IMUPMRPN ne change en rien le procédé de fabrication mais affecte la forme des masques, nous allons nous contenter d'indiquer et de commenter leur impact sur les couches.

Le masque POLY0 est une fois de plus la base de notre design mais diffère ici par sa forme et sa fonction par rapport au rotor. Dans le design IMUPMRPN, les électrodes ne sont plus vis-à-vis des pales du rotor mais en dessous de ces dernières. Ainsi les zones de la couche Poly0 constituant les électrodes se trouvent sous les pales du rotor dont elles copient les angles d'ouverture mais pas la profondeur. Elles commencent aux extrémités des pales mais s'arrêtent à la moitié de la longueur de ces dernières. Cet arrangement est nécessaire puisque la rondelle centrale en Poly0 est elle en contact mécanique et électrique avec le rotor et servira justement à lui imposer un potentiel électrique différent de celui aux électrodes.

C. Feuilles de formules et exemples de calcul

Le tableau suivant récapitule les valeurs nécessaires pour les calculs de force et les calculs intermédiaires.

Tableau C.1 : Tableau récapitulatif des données nécessaires au calcul des forces

	IMUPMRPM	IMUPMRPN	
		Double épaisseur	Contrôle entre-couches
Angle de l'interface (en degrés)	13.5° ($3\pi/40$)	13.5° ($3\pi/40$)	13.5° ($3\pi/40$)
Hauteur de l'interface (en μm)	2.0	3.5	
Rayon intérieur d'une électrode (en μm)	387.5	305.0	
Rayon extérieur d'une dent du rotor (en μm)	375.0	300.0	300.0
Largeur de l'interface (différence rayons extérieur et intérieur)			45.0 (290-245)

La hauteur de l'interface s'apparente à l'épaisseur des couches se faisant face.

Calcul de la distance entre les armatures

d_0 = Rayon intérieur d'une électrode – Rayon extérieur d'une dent du rotor

Exemple (IMUPMRPM) :

(C.1)

$$d_0 = 387.5 - 375.0 \cong 12.5 \mu m$$

Tableau C.2 : Tableau des distances pale/électrode

	IMUPMRPM	IMUPMRPN	
		Double épaisseur	Contrôle entre-couches
<i>Distance pale/électrode</i>	<i>12.5</i>	<i>5.0</i>	<i>2.0</i>

Calcul du rayon moyen à l'interface

$$r_{\text{moyenInterface}} = \frac{\text{Rayon interieur d'une électrode} + \text{Rayon extérieur d'une dent du rotor}}{2}$$

Exemple (IMUPMRPM) :

(C.2)

$$r_{\text{moyenInterface}} = \frac{387.5 + 375.0}{2} \cong 381.25 \mu\text{m}$$

**Tableau C.3 : Tableau des rayons moyens des rotors à l'interface
électrode/pale**

	IMUPMRPM	IMUPMRPN	
		Double épaisseur	Contrôle entre-couches
<i>Rayon moyen à l'interface (en μm)</i>	381.25	302.5	302.5

Calcul de la surface d'interface

Contrôle par la tranche

A = Fraction du périmètre moyen à l'interface \times Hauteur (Longueur) de l'interface

$$A = \left(2\pi \times r_{\text{moyenInterface}} \times \frac{\alpha_{\text{Interface}}}{360} \right) \times (L_{\text{Interface}})$$

où

$r_{\text{moyenInterface}}$: Rayon moyen à l'interface

$\alpha_{\text{Interface}}$: Angle de l'interface

(C.3)

$L_{\text{Interface}}$: Hauteur (ou Longueur) de l'interface

Exemple :

$$A_{\text{IMUPMRPM}} = \left(2\pi \times 381.25 \times \frac{13.5}{360} \right) \times 2.0 \cong 180 \mu\text{m}^2$$

Contrôle sous la pale

A = Fraction de la surface de la bande d'électrodes

$$A = \left(\pi \times \left((r_{\text{extérieurInterface}})^2 - (r_{\text{intérieurInterface}})^2 \right) \times \frac{\alpha_{\text{Interface}}}{360} \right)$$

où

$r_{\text{extérieurInterface}}$: Rayon extérieur de la bande d'électrodes

$r_{\text{intérieurInterface}}$: Rayon intérieur de la bande d'électrodes

$\alpha_{\text{Interface}}$: Angle de l'interface

$L_{\text{Interface}}$: Hauteur (ou Longueur) de l'interface

$$A_{\text{IMUPMRPN}} = \left(\pi \times (290^2 - 245^2) \times \frac{13.5}{360} \right) \cong 2836.27 \mu\text{m}^2$$

(C.4)

Tableau C.4 : Tableau des surfaces d'interface aux électrodes

	IMUPMRPM	IMUPMRPN	
		Double épaisseur	Contrôle entre-couches
Surface d'interface (en μm^2)	180	250	2836.27

D. Calculs théoriques des forces normales et tangentielles

L'information contenue dans cette annexe se veut une base théorique dans l'évaluation des capacités mécaniques de nos micromoteurs. Les calculs qui y sont présentés sont théoriques et se base sur l'assimilation des électrodes et des pales à des armatures de condensateurs en mouvement relatif. Cette analogie est la plus couramment faite pour les micromoteurs électrostatiques [MBao00] et [Mado97] et la littérature ne manque pas.

Comme présenté dans le chapitre Fonctionnement et caractéristiques, le déplacement du rotor se fait sous l'action de deux forces complémentaires : la force tangentielle et la force normale. Ces forces apparaissent dès l'application d'une différence de potentiels électriques entre une électrode et une pale à proximité.

L'espace entre l'électrode et la pale activée est la zone d'interface à travers laquelle passent les lignes de champ.

Pour un couple électrode/pale donnée, la surface d'interface est la plus petite surface offerte, par l'électrode activée ou la pale activée, à l'interaction électrostatique.

REMARQUE IMPORTANTE

Tous nos designs présentent un alignement de 2 électrodes par pale mais les valeurs de force calculées s'appliquent entre une électrode et une pale. Donc pour un contrôle du rotor par quatre électrodes simultanément, il faut multiplier la force par quatre.

De plus, les forces données sont fonctions de l'inverse du carré de la différence de potentiels appliquée.

Force tangentielle

La force tangentielle tend à maximiser la surface d'interface entre la pale du rotor et l'électrode activées. Cette force est à la base du déplacement en rotation du micromoteur puisqu'elle a pour effet d'entraîner le rotor de façon placer électrode et pale dans un alignement parfait.

Voici des exemples de calcul de la force tangentielle suivi d'un tableau en répertoriant la valeur pour les designs suivant : IMUPMRPM avec rotor de 700µm de diamètre, IMUPMRPN double épaisseur et IMUPMRPN avec contrôle sous la pale (lignes de champ entre Poly1 et Poly2).

$$F_T = \frac{L_{Interface} \times \epsilon \epsilon_0}{2d_0} \times V^2$$

où

$\epsilon \equiv 1$: Permittivité relative du médium entre les armatures ;

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$: Permittivité du vide ;

d_0 : Distance entre les armatures ;

V : Différence de potentiel électrique entre les armatures.

Exemple (IMUPMRPM) :

$$F_T = \frac{2.0 \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12}}{2 \times 12.5} \times V^2$$

$$F_T = (7.08 \times 10^{-13}) V^2 \text{ N}$$

Exemple (IMUPMRPN contrôle entre - couche) :

$$F_T = \frac{45.0 \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12}}{2 \times 2.0} \times V^2$$

$$F_T = (9.96 \times 10^{-11}) V^2 \text{ N}$$

(D.1)

Tableau D.1 : Forces tangentielles (IMUPMRPM et IMUPMRPN)

	IMUPMRPM	IMUPMRPN	
		Double épaisseur	Contrôle sous la pale
Hauteur de l'interface (en μm)	2.0	3.5	
Longueur de l'interface (différence rayons extérieur et intérieur)			45.0
Distance entre les armatures	12.5	5.0	2.0
<i>Force tangentielle (en N/V^2)</i>	7.08×10^{-13}	3.1×10^{-12}	9.96×10^{-11}

Force normale

La force normale a pour effet de tirer électrode et pale activées l'une vers l'autre. Son calcul fait intervenir la capacité et la charge équivalentes des armatures considérées.

Calcul de la capacité équivalente

$$C = \frac{A\epsilon\epsilon_0}{d_0}$$

où

$\epsilon \cong 1$: Permittivité relative du médium entre les armatures ;

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$: Permittivité du vide ;

(D.2)

Exemple (IMUPMRPM) :

$$C = \frac{(180 \times 10^{-12})(1)(8.854 \times 10^{-12})}{12.5 \times 10^{-6}}$$

$$C = (1.275 \times 10^{-16}) F$$

Calcul de la charge équivalente

$$Q_c = C \times V$$

Exemple (IMUPMRPM) :

(D.3)

$$Q_c = (1.275 \times 10^{-16}) V C$$

Calcul de la force normale

$$F_N = -\frac{Q_c^2}{2A\epsilon\epsilon_0}$$

Exemple (IMUPMRPM) :

(D.4)

$$F_N = -\frac{(1.275 \times 10^{-16})^2 (V)^2}{2 \times (180 \times 10^{-12}) (1) (8.854 \times 10^{-12})} \times V^2$$

$$F_N = (5.1 \times 10^{-12}) V^2 \text{ N}$$

Tableau D.2 : Forces normales (IMUPMRPM et IMUPMRPN)

	IMUPMRPM	IMUPMRPN	
		Double épaisseur	Contrôle entre-couches
Hauteur de l'interface (en μm)	2.0	3.5	
Longueur de l'interface (différence rayons extérieur et intérieur)			45.0
Distance entre les armatures	12.5	5.0	2.0
Surface d'interface (en μm^2)	180	250	2836.27
Capacité équivalente (en F)	1.275×10^{-16}	4.427×10^{-16}	125.56×10^{-16}
Charge équivalente (en C/V)	1.275×10^{-16}	4.427×10^{-16}	125.56×10^{-16}
Force normale (en N/V^2)	5.1×10^{-12}	4.427×10^{-11}	313.896×10^{-11}

E. Analyse mécanique du prototype Beta-EDM

Cette section de l'annexe présente les requis en terme de force mécanique du prototype Beta-EDM du Walking-Die. Ce prototype est le fruit d'une modélisation détaillée avec le logiciel CATIA v5r12 de la compagnie Dassault Systèmes. Il n'existe pas physiquement. La version Beta-EDM est la plus récente disponible au moment où nous écrivons ces lignes.

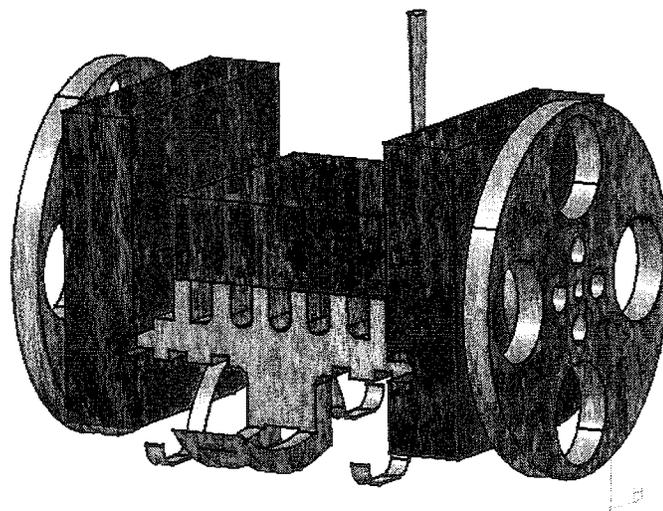


Figure E.1 : Plan 3D du prototype Beta-EDM du Walking-Die

Données

- a. Force développée avec une électrode active : 4.8804×10^{-7} N

C'est la force tangentielle développée à une interface pale/électrode du IMUPMRPN à contrôle sous la pale et alimenté à 70V.

- b. Masse d'une languette de laiton : $7,991 \times 10^{-9}$ kg

Les languettes de laiton servent à établir un contact électrique avec le plancher.

- c. Coefficient de frottement de la graisse conductrice Nyogel 758G : 0.098

La graisse conductrice est appliquée aux points de contact entre le Walking-Die et le plancher.

- d. Coefficient de frottement du contact polysilicone-polysilicone : 0.04

Coefficient de la friction à l'intérieur du micromoteur.

- e. Rayon d'application de la force dans le MEMS : $267.5 \mu\text{m}$

Approximativement le rayon du rotor pour le calcul du moment.

- f. Le poids F_1 supporté par l'appui arrière est : 0.117699×10^{-5} N
 g. Le poids F_2 supporté par une roue est : 4.09029×10^{-5} N

Calculs

1. Force tangentielle produite par le micromoteur

Moment moteur (quatre électrodes activées)

$$\begin{aligned} M &= (4 \times F_{\tan}) \times r_{rotor} = (4 \times 4.8804 \times 10^{-7}) \times 267.5 \times 10^{-6} & \text{(E.1)} \\ &= 5.222028 \times 10^{-10} \text{ Nm} \end{aligned}$$

Moment de friction

Soit $\mu_{\text{poly-poly}}$ le coefficient de friction interne au moteur
et r_{Mush} , le rayon du bras de rotation du rotor

$$\begin{aligned} M_f &= F_2 \times \mu_{\text{poly-poly}} \times r_{\text{Mush}} = (4.0929 \times 10^{-5}) \times 0.04 \times 50 \times 10^{-6} & \text{(E.2)} \\ &= 8.1858 \times 10^{-11} \text{ Nm} \end{aligned}$$

Force tangentielle effective

$$\begin{aligned} F &= \frac{M - M_f}{r_{roue}} = \frac{5.222028 \times 10^{-10} - 8.1858 \times 10^{-11}}{9 \times 10^{-4}} & \text{(E.3)} \\ &= 4.89272 \times 10^{-7} \text{ N} \end{aligned}$$

2. Force de friction produite par une languette de laiton

On considère que la force exercée au sol par la forme donnée aux languettes représente 4 fois leur poids, et que la surface de contact est lubrifiée à l'aide d'une graisse conductrice. La force de frottement est donc :

$$\begin{aligned}
 F_{f_languette} &= 4M_{languette} \times g \times \mu_{graisse} = 4 \times 7.991 \times 10^{-9} \times 9.81 \times 0.098 \\
 &\quad \text{(E.4)} \\
 &= 3.072955 \cdot 10^{-8} \text{ N}
 \end{aligned}$$

3. Force de friction produite par l'appui arrière

Ici aussi, il est convenu que l'appui glisse sur une graisse conductrice.

$$\begin{aligned}
 F_{f_appui} &= F_1 \times \mu_{graisse} = 0.117699 \times 10^{-5} \times 0.098 \\
 &\quad \text{(E.5)} \\
 &= 1.1534502 \cdot 10^{-7} \text{ N}
 \end{aligned}$$

4. Force disponible à l'accélération

$$\begin{aligned}
 F_{disponible} &= 2 \times F_{MEMS} - 4 \times F_{f_languette} - F_{f_appui} \\
 &= 2 \times 4.89272 \times 10^{-7} - 4 \times 3.072955 \cdot 10^{-8} - 1.1534502 \cdot 10^{-7} \\
 &\quad \text{(E.6)} \\
 &= 7.4028078 \cdot 10^{-7} \text{ N}
 \end{aligned}$$