

THESE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
GRENOBLE

Spécialité : Génie Industriel

VERSION Des RAPPORTEURS

Arnaud DE GRAVE

le 8 septembre 2004

Conception intégrée de micro systèmes électro-mécaniques

Jury composé de :

Pr BRISSAUD Daniel	INPG	Directeur de thèse
Pr AOUASSAT Améziane	ENSAM Paris	Rapporteur
Pr PETIOT Jean-François	Ecole Centrale Nantes	Rapporteur

Laboratoire SOLS, SOLIDES, STRUCTURES de GRENOBLE

Table des matières

Une introduction au monde microscopique	3
0.1 Du silicium aux microsystèmes	3
0.2 Les enjeux industriels	5
0.3 Questions de recherche et positionnement de la problématique	13
0.4 La méthodologie de recherche	15
 I Caractérisation d'un micro produit	 21
Introduction	23
 1 Les micro produits dans leurs domaines d'application	 27
1.1 L'industrie automobile	28
1.2 Les télécommunications	29
1.3 L'aéronautique	33
1.4 Optique et communication optique	34
1.5 Le domaine médical et la bio-technologie	36
1.6 L'informatique portable	37
Conclusion	38
 2 Les techniques de fabrication des micro produits	 41
2.1 La miniaturisation des procédés de "génie mécanique"	41
2.1.1 Micro usinage par enlèvement de matière	41
2.1.2 Procédés thermiques ou de réplique	44
2.2 Les techniques de production issues de l'industrie du silicium VLSI	45
2.2.1 Dépôts de couches minces	46
2.2.2 La photolithographie	48
2.2.3 Gravure chimique	49
2.3 Des processus spécifiques aux MEMS	50
2.3.1 Les usinages en volume, face avant et face arrière	50
2.3.2 Le micro usinage de surface, l'utilisation des couches sacrificielles	51

2.4	D'autres procédés	53
2.5	Les techniques de packaging	55
2.5.1	System in Package	58
2.5.2	System on Chip	58
	Conclusion	59
Conclusion : une caractérisation des MEMS		61
II Caractérisation d'un processus de conception de micro produits		65
Introduction, les enjeux d'une meilleure compréhension de la conception.		67
3	La conception de MEMS	73
3.1	Approche mécanique ou électronique ?	73
3.1.1	Description d'un processus de conception mécanique	73
3.1.2	Description d'un processus de <i>design</i> VLSI	84
3.1.3	Pour les MEMS, une approche mixte	97
3.2	Des méthodes adaptées à la conception de MEMS	102
3.2.1	Une approche <i>concurrent engineering</i> obligatoire pour les MEMS	102
3.2.2	Une validation des connaissances de fabrication non matures : l'équipe de fiabilité, vers le MEMS-DFTest	103
3.2.3	Une volonté de tendre vers le " <i>structured design</i> "	105
3.2.4	Mais un processus plus complexe : <i>top-down "meets" bottom-up</i>	108
3.3	Des outils d'aide à la conception de MEMS	111
3.3.1	Des outils de simulation, FEM ou analytique	112
3.3.2	Les modes de représentation pour l'optimisation	118
3.3.3	Des aides à la génération de concept	121
3.3.4	Les simulateurs de processus de fabrication	122
4	Une caractérisation d'un processus de conception de MEMS	125
4.1	Introduction, démarche de recherche	125
4.2	Les différentes vues du processus de conception	129
4.2.1	Les acteurs, l'équipe de conception	129
4.2.2	Les documents utilisés dans la conception de MEMS	134
4.2.3	Les connaissances utilisées dans la conception de MEMS	140
4.3	Une modélisation du processus de conception d'un composant MEMS	143
4.3.1	Proposition d'une représentation du processus de conception	143

4.3.2 Les manques durant la phase d' <i>embodiment</i>	146
Conclusion, vers un outil d'aide à la conception	151
III Une formalisation des connaissances des MEMS en vue de l'enseignement de leur développement	159
Introduction	161
5 Un cours d'initiation aux micro technologies	163
5.1 Objectifs du cours et implémentation	163
5.2 Détail des séquences d'enseignement	165
5.2.1 L'introduction aux micro technologies	165
5.2.2 Séquence de description des techniques de fabrication	166
5.2.3 Principes de fonctionnement, miniprojet et intervention industrielle	168
5.2.4 Etude approfondie du résonateur électromécanique	170
5.2.5 Les éléments de réflexion et de mise en perspective	170
5.3 Bilan du cours	171
5.4 Encadrement d'un stage de fin d'études	172
Conclusions et Perspectives	177
Bilan sur la démarche et conclusions	177
Perspectives et ouvertures	181
A Construction de connaissances scientifiques et d'ingénierie chez STMicroelectronics	183
B Construction de connaissances technologiques en micro fabrication	203
C Compte-rendu type	219
Bibliographie	

Table des figures

1	Récapitulatif des applications dans le domaine des RF-MEMS	6
2	Echelle de dimensions	7
3	Aspects économiques des MEMS	8
4	Le catalogue de procédés de fabrication Mems-Exchange	11
5	Exemple d'utilisation de <i>dimples</i> sur un moteur électrostatique	13
6	Les micro miroirs à actionnement par excentrique de Sandia	13
7	La création d'un produit	14
8	Deux vues du <i>switch</i> à actionnement thermique du Leti	18
9	Modélisation ANSYS TM (a et b) et COVENTOR TM (c) de bilames piézoélectriques	19
10	Une proposition de taxonomie des MEMS	24
11	La micro turbine du MIT (photographie MEB)	24
1.1	Un capteur de pression encapsulé	29
1.2	Différence entre <i>switchs</i> série et parallèle	30
1.3	Descriptions d'un résonateur électromécanique	31
1.4	Séquence de fabrication d'ailes de micro objets volants	34
1.5	Matrice de micro miroirs de Texas Instruments	35
1.6	Principe de fonctionnement d'un switch d'indice opto-fluidique	35
1.7	Micro miroirs magnétiques	36
1.8	Une biopuce à ADN	37
2.1	Exemple de réalisation avec un tour miniature, au Japon	42
2.2	Exemple de réalisations en 3D formes complexes	42
2.3	Exemple de réalisation par procédé électro-érosion et ultrasons	44
2.4	Flux de fabrication CMOS d'un transistor sur deux niveaux de métallisation	47
2.5	Photographie MEB de structures de test de contrainte	48
2.6	Avancées relatives d'une gravure anisotrope à partir d'ouvertures triangulaires	50
2.7	Coupe d'une structure suspendue	51
2.8	Réalisation d'une charnière avec le procédé MUMPS	52

2.9	Les effets du procédé CMP	54
2.10	La technologie SOI adaptée aux MEMS	55
2.11	Procédé LIGA et exemple	56
2.12	Une simulation thermique d'un microsystème encapsulé	57
2.13	Les enjeux économiques durant le développement du produit	68
3.1	le processus top-down selon NFS	77
3.2	La roue du <i>concurrent engineering</i>	79
3.3	La double roue du concurrent engineering de Prasad	80
3.4	L'évolution de l'intégration de la conception	82
3.5	Deux microprocesseurs de chez Intel	85
3.6	Le flot de conception VLSI	86
3.7	Un exemple de code CIF	88
3.8	Le CIF et sa vocation d'interface entre concepteur et fabricant	88
3.9	Une vision des niveaux de visualisation et de raffinement en microélectronique	90
3.10	Les différents niveaux d'abstraction	91
3.11	Un modèle des niveaux d'abstraction	92
3.12	Cycle de conception et fabrication avec mise en place du test	94
3.13	Figure descriptive des outils suivant les niveaux d'abstraction	94
3.14	Exemple d'un logiciel intégré. (Electric TM de S.M. Rubin)	95
3.15	Exemple de l'environnement AMICAL	96
3.16	Les représentations de Mörhinger	99
3.17	R vers D vers A dans chacun des quatre grands axes de fonction des micro-systèmes	103
3.18	Un exemple de transformation/pixelisation d'une forme non Manhattan.	106
3.19	La proposition de NSF en terme de processus de conception de MEMS	107
3.20	Une proposition d'approche top-down pour les MEMS	109
3.21	Génération automatique de résonateurs en fonction de spécification fonctionnelle	111
3.22	L'environnement SOLIDIS	113
3.23	Analyse paramétrée sur Sugar	113
3.24	Analyse modale sur Sugar	114
3.25	Equivalences électriques	115
3.26	Flot de conception utilisant l'environnement MEMCAD	117
3.27	Schéma d'un gyroscope dans l'environnement ADI	119
3.28	Une représentation d'un résonateur	120
3.29	Outil de simulation géométrique de gravure anisotrope sur silicium	123
3.30	Outil de simulation atomistique de gravure anisotrope sur silicium	124

4.1	L'équipe de conception d'un MEMS	133
4.2	Exemple de pages d'un cahier de lot	136
4.3	Exemple d'un DTS, un niveau de masque	137
4.4	Superposition des niveaux de masques d'un switch	137
4.5	Des résultats de caractérisation	138
4.6	Une modélisation du processus de conception	144
4.7	Une modélisation du processus de conception, avec un aspect temporel marqué	145
4.8	Les documents de la conception et leur positionnement dans le processus .	147
4.9	différents modes de représentation des MEMS	148
4.10	Structure de l'outil	154
5.1	Exercice de lecture de séquence de fabrication	167
5.2	Organisation du mini projet	169
5.3	Réalisation d'une charnière	171
5.4	Positionnement de la tête et de l'actionneur	173
A.1	Deux vues du <i>switch</i> à actionnement thermique du Leti	183
A.2	Modélisation ANSYS (a et b) et COVENTOR (c) de bilames piézoélectriques	187
A.3	plan d'expérience de criblage	189
A.4	plan d'expérience, surface de réponse	189
B.1	rangées de perçage de diamètre 250 μm	204
B.2	deux rainures usinées en forme avec une micro fraise	205

Une introduction au monde microscopique

Il ne se passe pas une journée sans que nous ne soyons confrontés à la miniaturisation dans la vie quotidienne. Des objets qui n'auraient pas dépareillé dans un épisode de Star Trek il y a vingt ans sont désormais disponibles pour tous. Qui ne possède pas de téléphone cellulaire à l'heure actuelle, agrémenté d'un appareil photo numérique, d'un lecteur de mp3 et bientôt d'un écran permettant de voir son interlocuteur ?

L'aventure remonte sans doute à l'ensemble des recherches et découvertes qui ont mené à la réalisation en masse des milliards de transistors faisant fonctionner nos ordinateurs. Mais avant l'ordinateur personnel, l'attrait du petit et du très petit, avait frappé l'intérêt et l'imagination de nombreuses personnes et en particulier des auteurs de romans. On connaît notamment Richard Matheson pour son livre "L'homme qui rétrécit", porté au cinéma en 1957 par J. Arnold. dans lequel Scott Carey devient de plus en plus petit, jusqu'à ne mesurer que 16 millimètres de haut. Outre l'intérêt romanesque évident d'une rencontre avec une araignée ou une souris on peut se poser certaines questions scientifiques basées sur les effets d'échelle. Les films "L'aventure intérieure" de Joe Dante (1987) et "Le voyage fantastique" de Richard Fleisher (1966), qui sera adapté en roman par Issac Asimov sous le titre de "Destination cerveau", vont plus loin en réduisant hommes et machines de façon à les faire entrer dans le corps humain, soit un facteur homothétique d'environ 1000 pour un diamètre des veines de quelques centaines de microns. Est-il scientifiquement plausible pour un homme de survivre à cette dimension, et pas seulement pour des raisons de caractère belliqueux de l'araignée commune ? Les lois sur les effets d'échelle nous apprennent qu'un homme devrait ressembler à une mite acarienne pour survivre et pouvoir se déplacer avec ces dimensions. Nous devons changer nos ordres de grandeur instinctifs et le développement de produits microscopiques ne peut peut-être pas se résoudre à une homothétie simple depuis le monde normal "macro".

Le vocabulaire "micro" est de plus en plus présent, on parle de MEMS : c'est l'acronyme de l'anglais *Micro Electro Mechanical Systems*. C'est une des nombreuses dénominations de ces nouveaux produits microscopiques que nous avons étudiés au cours de cette thèse.

0.1 Du silicium aux microsystèmes

On peut sans doute envisager l'émergence des micro systèmes électro-mécaniques au début des années 80, avec l'apparition dans la mécanique des technologies d'usinage ternaire [BWK01] s'éloignant du traditionnel "enlèvement de copeaux". Mais il convient de suivre le courant de miniaturisation depuis le début, à la fois en mécanique et en électronique.

La miniaturisation a fait son entrée dans la vie quotidienne avec des applications dans la mécanique (les premiers objets que l'on pourrait qualifier de micro mécaniques sont sans doute les montres de poignet, créées à partir des montres à gousset et qui datent environ du début du vingtième siècle) puis dans l'électronique. C'est avec l'avènement de l'électronique, cependant, que la course à la réduction a réellement commencé. La théorie du transistor à effet de champ est due à J. Lilienfeld en 1925, celle du transistor bipolaire construit en Germanium vaudra le prix Nobel de physique en 1948 à Shokley, Brattain et Bardeen. La première mise en production sera faite en 1954 par une (alors)

petite société nommée Texas Instrument, marquant le début de l'histoire du circuit intégré tel que nous le connaissons aujourd'hui. Depuis, la course à la miniaturisation et à l'intégration ne cesse de s'accélérer. En environ trente ans, les termes SSI¹ puis VLSI² sont apparus, et avec eux des transistors par millions sur des puces de silicium. Cette révolution technologique que représente le travail sur semi-conducteur est la base des technologies qui rendront possibles des applications de l'ordre du nanomètre de nos jours. En effet, un transistor a pour longueur caractéristique environ 100 nanomètres (appelée la longueur de grille) actuellement, et cette dimension est en constante réduction. On pressent toutefois que l'on s'approche des limites de la taille des atomes. Parallèlement, l'électronique envahissait la vie quotidienne et notamment les produits mécaniques, avec par exemple l'évolution des machines outils traditionnelles vers les machines outils à commande numérique [JT88], la robotique (industrielle ou non) et bien sûr l'informatique. Rares sont actuellement les applications qui ne comportent pas un circuit électronique, au grand dam des réparateurs d'automobiles... Quant à une miniaturisation très marquée des systèmes mécaniques, il fallut attendre le célèbre discours de Richard Feynmann en 1959 au California Institut of Technology intitulé "*There is plenty of room at the bottom*" [Fey60] pour en entrevoir les possibilités.

Richard Feynmann, à travers ses deux conférences désormais incontournables pour quiconque s'intéresse au domaine des micro produits, a montré à quel point il était important d'y porter son attention. Il explique principalement dans "*There's plenty of room at the bottom*" [Fey60] qu'il ne voyait pas de problème physique majeur pour une miniaturisation jusqu'à la taille des atomes. Dans sa deuxième conférence intitulée "*Infinitesimal machinery*" [Fey93] en 1993, il décrit comment effectivement il n'avait pas tout prévu lors de son premier discours, mais comment on pourrait y trouver des solutions. Il créa la technologie révolutionnaire de la couche sacrificielle très utilisée en fabrication de micro produits avec parties mobiles... L'apport de Richard Feynmann est indéniablement ce qui a permis les développements futurs. Parallèlement, les capteurs de pression suivaient une évolution dans une direction telle que l'on peut y voir un historique des micro systèmes. En effet, ce produit a suivi un courant de miniaturisation depuis les années 60 et a participé, en terme de besoin, au développement des techniques d'usinage chimique sur silicium. La commercialisation ainsi que la relative simplicité de ces capteurs (une membrane qui se déforme adjointe de jauges piézorésistives) ont été des moteurs pour l'introduction de nouvelles technologies, à partir d'un meulage des cavités jusqu'aux techniques des couches sacrificielles.

La marche suivante dans l'essor des MEMS est apparue lors des premières caractérisations mécaniques du silicium. Ces essais sur poutres micro usinées ont fait l'objet d'un article resté célèbre par K.E. Peterson en 1982 : "*Silicium as a mechanical material*" [Pet82]. Dans cet article, Peterson démontre non seulement la possibilité de réaliser des poutres suspendues à partir d'une séquence de fabrication issue de l'industrie VLSI, mais il ouvre aussi les portes des dimensions microscopiques à la mécanique telle qu'on l'envisage, c'est-à-dire avec des mouvement de certaines pièces par rapport à d'autres. Cette avancée peut être considérée comme révolutionnaire.

¹SSI = Small Scale Integration

²VLSI = Very Large Scale Integration

Le futur dans ce domaine semble parfois relever à nouveau de la science-fiction, on peut néanmoins discerner quelques pistes "raisonnables" :

- en terme de produits : de hautes performances, une intégration détection/action, des rangées de multiples composants, des nouveaux matériaux (*smart materials*) et des structures dites "intelligentes" (*smart structures*),
- en terme de technologie : la standardisation des processus de fabrication (*Multi users foundries*), la standardisation des outils informatiques, des technologies à améliorer en terme d'interface avec le monde macro (ce qui constitue environ 85 % du prix selon certaines sources)

En terme de recherche, de nombreux journaux scientifiques ont été créés pour répondre à une demande croissante sur le thème des micro systèmes. En effet, les aspects économiques et la recherche de connaissances fondamentales n'ont pas manqué de faire naître l'intérêt dans les différents domaines de la recherche universitaire et industrielle internationale. On peut citer par exemple IEEE qui créa en 1992 le *Journal of Micromechanical Systems* afin de répondre à l'engouement pour les MEMS. Le volume 52 des *CIRP Annals* contient par ailleurs un *keynote paper* [AKHB03] sur le sujet de la micro ingénierie...

Parmi toutes ces recherches, de nombreuses tendances visent à améliorer les performances des micro produits, en agissant à différents niveaux, par exemple :

- compréhension de la science (au sens physique) des applications,
- technologies de fabrication, connaissance des matériaux,
- techniques d'interface,
- méthodes de mesure et de vérification, instrumentation.

Nous nous inscrivons dans cette optique d'amélioration des performances, d'un point de vue non directement appliqué au produit lui-même mais à sa relation avec l'organisation industrielle et le processus de conception.

0.2 Les enjeux industriels

Des micro produits

Le concept de "micro produit" est à clarifier tant les dénominations sont multiples et parfois redondantes. Les lecteurs CD et mp3 de poche sont-ils des micro produits ? Les énormes écrans de projection utilisés dans les salons commerciaux, basés sur des rangées de miroirs de taille microscopique, peuvent-ils être considérés comme des micro produits ?

Le domaine de taille caractéristique que nous nous proposons d'étudier ici va de la dizaine de millimètres à la dizaine de nanomètres. Mais est-ce suffisant ? En effet, la taille n'est que la partie émergée de l'iceberg. Même si elle est remarquable, les différences fondamentales qui permettront de caractériser les micro produits dans le domaine des produits miniaturisés ou en voie de miniaturisation ne sont pas si évidentes.

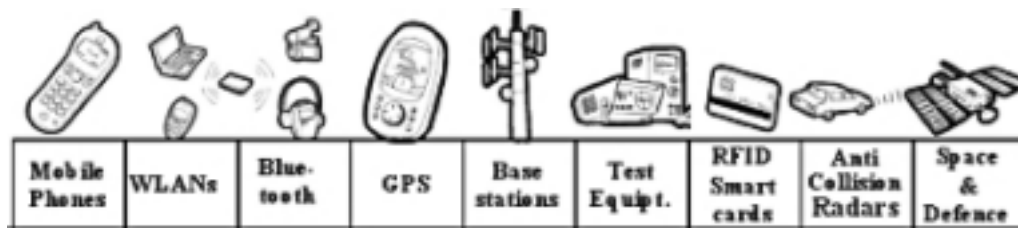


FIG. 1 – Récapitulatif des applications dans le domaine des RF-MEMS
(D'après [Bou02])

Des applications nombreuses et variées

Pourquoi est-il intéressant de fabriquer et donc de concevoir des MEMS ? Nous pouvons donner un embryon de réponse à cette question en présentant une liste des domaines d'application touchés par ces nouvelles technologies, en terme de besoin et/ou de solutions. Les domaines d'application sont multiples :

- médical et biotechnologies,
- capteurs, détecteurs de grandeurs physiques,
- actionneurs,
- télécommunications, RF-MEMS (Applications en radio fréquence) (cf figure 1),
- chimie,
- ...

L'attrait est évident du point de vue médical : thérapie non "envahissante", doses de médicament délivrées *in situ*, biopuces...

D'un point de vue strictement fonctionnel, la hiérarchie des effets physico-mécaniques est très différente et ceci pour des effets d'échelle (gravité et forces de capillarité par exemple). Dans le domaine des résonateurs, le changement dans la gamme des fréquences de vibration est flagrant pour une poutre de silicium de quelques dizaines de microns qui vibrera à des centaines de MHz tandis qu'une poutre centimétrique vibrera à quelques centaines de Hz. Les applications en terme de filtrage en téléphonie mobile et notamment en radio-fréquence sont nombreuses. Dans le domaine de la micro fluidique, les nombres de Reynolds faibles changent radicalement les problèmes, que l'on retrouve dans les drones MAV³ [PsLN+00].

On entrevoit aussi des possibilités d'actions sur des objets microscopiques tels que des cellules biologiques. En effet, l'ordre de grandeur de taille d'un globule rouge est de quelques microns comme la figure 2 le montre, ainsi dans le domaine des biopuces il est aisé de conceptualiser l'idée de laboratoires à l'échelle des objets manipulés. La nature microscopique des applications peut aussi mener à augmenter le nombre des actions (ou détectations) d'un phénomène macroscopique.

De la même façon, les domaines des capteurs, des actionneurs, du stockage de l'information, de la production et du stockage de l'énergie sont tous touchés par les

³MAV = Micro objets volants autonomes

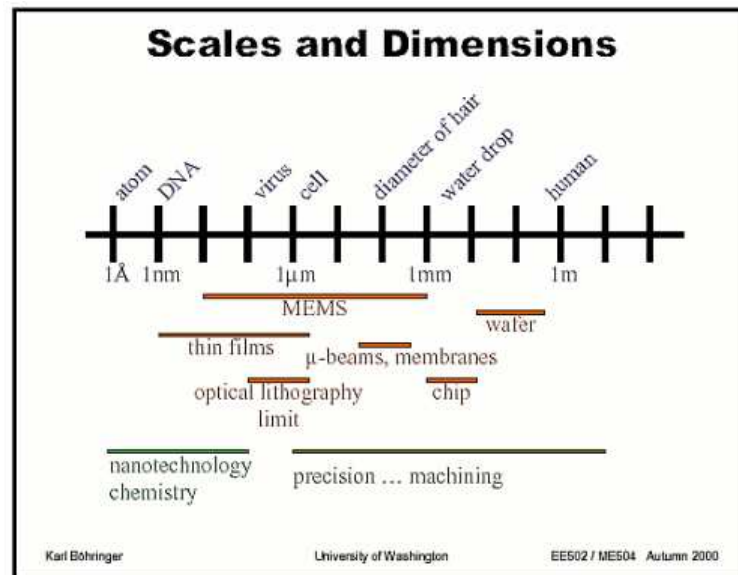


FIG. 2 – Echelle de dimensions

micro technologies. L'émergence et l'intégration pourraient être vues dans un seul et même type d'application que sont les *wearable computers* : ordinateurs complets inclus dans un vêtement (ou une gamme de vêtements : lunettes/écrans, veste/bibliothèque d'information, montre/téléphone agenda, casquette/stéréo...) [Sta01a, Sta01b]

Mais cet intérêt ne doit pas s'arrêter aux pures applications pratiques. La recherche fondamentale en matériaux, principes physiques et compréhension générale du monde peut y voir un champ d'investigation au niveau des connaissances elles-même. En effet, la pluridisciplinarité intrinsèque des applications et l'intégration de ces nombreux champs de connaissances favorisent l'émergence de celles-ci : physique fondamentale, biologie, médecine et technologie, etc. les possibilités des microtechnologies sont à peine entrevues. Et l'on songe déjà aux nanotechnologies...

Approches de conception *customer-driven* et *techno-pushed*

Il existe une opportunité d'un nouveau marché dans le domaine des micro produits, c'est une certitude. Les nombreux produits présentés précédemment en témoignent. Un certain nombre a déjà acquis la maturité d'une mise sur le marché, avec passage réussi en production. C'est véritablement, dans ces cas là, une innovation.

On peut définir ces deux approches comme suit :

- Dans une approche *customer-driven* ou *product-driven*, c'est le client qui fixe les besoins et la technologie trouve des solutions pour répondre à ce besoin.
- L'approche *technology-pushed*, en revanche, fonctionne à l'inverse. Une avancée technologique est réalisée, un procédé particulier de fabrication est maîtrisé, qui ouvrent de nouvelles possibilités en terme d'applications, sans pour autant qu'il existe à la base un réel besoin.

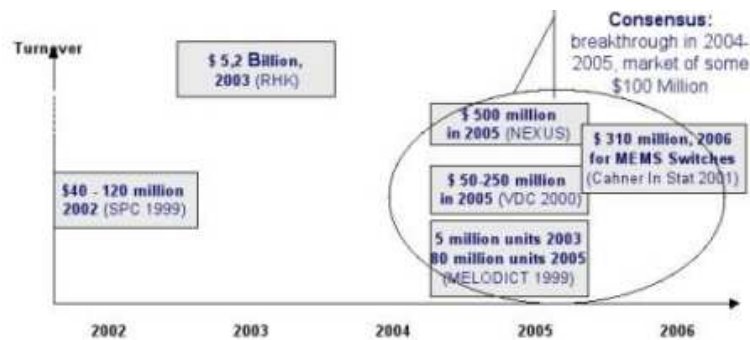


FIG. 3 – Aspects économiques des MEMS

seuls la téléphonie mobile et les microswitchs sont considérés ici. (Chiffre datant d'une présentation de 2002 par Jérémie Bouchard à la conférence Memswave. [Bou02])

Si une approche poussée par la technologie fonctionne bien à court ou moyen terme, il est impératif de faire intervenir une approche plus tirée par le client afin d'envisager les possibilités des micro technologies. Le marché évolue dans le sens des produits connus vers les stratégies qui passent par l'amélioration de produits existants mais aussi par la découverte de nouvelles applications. Afin de faire évoluer les technologies dans des directions favorables, évaluer les besoins du client à long terme est important.

A l'heure actuelle, peu de micro produits sont réellement nouveaux. Les performances de *switch* MEMS sont effectivement meilleures que celle d'un commutateur CMOS mais ils restent des micro commutateurs. De même, un projecteur à rangées de micro miroirs est une formidable réalisation, mais ce n'est que l'amélioration d'un rétroprojecteur à lampe. Les téléphones portables sont de plus en plus petits et offrent de plus en plus de fonctions (jeux vidéo, appareils photo...). Mais ce courant de miniaturisation est équivalent à celui par exemple des appareils hi-fi portatifs, un poste radio de 1950 n'a plus grand chose en commun avec un lecteur mp3/radio qui tient la place d'une montre ; leurs fonctions restent les mêmes.

D'un point de vue conception conceptuelle, ajouter le terme de "micro" devant une application (micro *switch*, micro moteur, micro miroirs...) s'inscrit dans une démarche poussée par la technologie. On conçoit petit et intégré parce qu'on sait désormais le faire.

Un marché économique en explosion

30 milliards de dollars US en 2000 vers 60 milliards de dollars US pour 2005, voici l'ordre de grandeur de l'économie des micro systèmes. Derrière ces chiffres assez imposants, les lois de Moore et de Malthus se rejoignent si l'on en croit Shane Greenstein [Gre03]. Selon Malthus en 1803, la population augmente selon une progression géométrique tandis que les moyens de subsistance suivent une loi arithmétique, c'était sans compter sur l'industrialisation et l'innovation. Gordon Moore annonce avec sa loi en 1975, que les ordinateurs progressent en terme de performance extrêmement rapidement. En fait, les capacités des microprocesseurs et des RAMs doublent tous les 18 mois, voire plus rapidement depuis

1995 selon certaines sources. Une adaptation des deux lois au domaine des micro produits compare l'évolution des capacités, selon une loi géométrique, et celle des moyens de production, selon une loi arithmétique. Pour comprendre les promesses en terme de marché, le premier élément à mettre en avant est en effet la production de masse : sur un wafer de 100 millimètres de diamètre on peut déjà (ou pourrait, si il y avait industrialisation) mettre plusieurs centaines de structures MEMS, identiques ou non. Il est encore tôt en terme d'industrialisation pour pouvoir faire des prévisions fiables, mais il est évident que ce domaine est très prometteur.

Organisation industrielle et politique

Nous avons vu que les micro produits présentent des particularités. Le fait d'être dans le domaine des technologies émergentes a un effet sur la façon de développer le produit ainsi que sur la structure des organisations industrielles, comme par exemple la présence de fonderies multi-utilisateurs. De plus, ces produits passent souvent pour novateurs alors qu'il ne sont que des miniaturisations/améliorations de produits classiques grâce aux évolutions des technologies, dans une approche *technologie-pushed*.

Un contexte de recherche et développement Il apparait que la conception des MEMS nécessite un réseau d'organisation. Dans la plupart des cas, on se situe en effet dans un contexte de recherche et développement. Les connaissances nécessaires à la conception sont réparties entre plusieurs organismes : structures industrielles, laboratoires de recherche, fabricants de machines, etc. De nombreuses applications sont réalisées en coopération entre ces organisations par l'intermédiaire de partenariats de recherche. En effet, peu de produits sont passés avec succès à une industrialisation ; on peut citer les accéléromètres d'airbags ou les dispositifs de projection par micro miroirs de Texas Instruments. Ces applications seront détaillées dans le chapitre 1.

Les fonderies multi-utilisateurs Malgré toutes les avancées technologiques mentionnées précédemment, il est très difficile pour une petite structure de se lancer sur le marché pourtant prometteur des MEMS. En Europe, le marché des MEMS a fait l'objet d'une étude par NEXUS. Une estimation d'un marché de 68 milliard de dollars US en 2005 a été faite. Les coûts de création d'une structure de recherche et développement, sans même parler de production de masse, étant trop importants, il est possible de faire appel à des services de fonderies multi-utilisateurs afin de lancer un produit avec un investissement de départ moindre. Une fois le produit stabilisé en terme de marché, des décisions d'investissement dans des lignes de fabrication peuvent valider et optimiser un produit alors spécifique. [Sal03].

Les fonderies multi-utilisateurs proposent donc des services de fabrication suivant les techniques VLSI. Nous verrons au chapitre 3.1.2 qu'une standardisation des formats de description géométrique des masques de lithographie est très favorable à la fois à l'automatisation de certaines phases de la conception, et à la possibilité d'utiliser ces fonderies multi utilisateurs. En effet, un format commun de représentation des *designs*

est une condition *sine qua non* pour un tel travail de sous-traitance.

Les fonderies qui veulent proposer des services de multi-utilisation doivent assurer une qualité dans les domaines de la fabrication (à des niveaux de production commerciaux), de l'interfaçage et des tests. Les processus de fabrication doivent être maîtrisés, mais aussi être suffisamment récents pour offrir des possibilités permettant d'être compétitifs par rapport aux grosses structures qui possèdent leurs propres lignes de fabrication.

Ces fonderies sont de plusieurs catégories :

- d'origine universitaire, elles recherchent des partenaires comme des petites sociétés très orientées,
- de grosses compagnies de l'industrie des semiconducteurs augmentent ainsi leur base de clients,
- de petites compagnies cherchent à équilibrer leur budget et augmenter leurs capacités de production,
- des fonderies pures qui ne possèdent qu'une partie des séquences de production mais avec une bonne maîtrise de ces procédés. Certaines bases de données de fournisseurs de technologies de fabrication existent sur le réseau Internet comme par exemple le site "mems-exchange"⁴. Ce site internet est une base de données de procédés de fabrication avec les coordonnées des fonderies offrant ces services.

Le site Internet "mems-exchange" offre non seulement un catalogue complet de procédés de fabrication mais il permet de choisir ses séquences complètes et, grâce à l'avantage du système de mise en position des croix d'alignement des masques de lithographie, un même produit peut être fabriqué sur plusieurs sites. Le site offre aussi des possibilités de visualisation par microscope à distance. La figure 4 montre l'entrée pour une gravure anisotrope sèche dans le catalogue.

Quelques fonderies multi-utilisateurs sont :

- Aux USA : les laboratoires Sandia : le SUMMiT ou SUMMiT V, l'entreprise Cronos avec la technologie MUMPS.
- En Europe : Bosch/AMICUS, Colibrys/CEMEMS, MEMSCAP avec le procédé PolyMUMPs (trois couches de polysilicium), OnStream MST, QinetiQ/INTEGRAM, Sensitec/MAGSYS plutôt orienté produits magnétiques, SensNor ASA/MultiMEMS, TRONIC'S Microsystems/MEMSOI dans l'agglomération grenobloise.

Les effets d'échelle

Michel Wautelet [Wau01] fait un état des lieux à propos des effets d'échelle dans différents domaines scientifiques tels que la mécanique, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, la thermodynamique, et l'optique. Il donne aussi des notions sur les effets quantiques du nano monde. Ce qui est le plus utile d'un point de vue de la conception, c'est finalement son explication sur l'impossibilité de réduire un médecin de façon à le faire voyager dans les veines d'un patient (comme nous l'avons rapidement annoncé

⁴<http://www.mems-exchange.org/>

The screenshot shows a web browser window with the URL <http://www.mems-exchange.org/catalog/P2570/>. The page title is "Titanium/tungsten plasma etch: View". The left sidebar contains a "Process Hierarchy" menu with categories like Bonding, Clean, Consulting, Deposition, Doping, Etch, and others. The main content area displays the following information:

Titanium/tungsten plasma etch		Side
1	Titanium/Tungsten plasma etch	front
Material titanium/tungsten		
2	Post-aluminum plasma etch (passivation and strip)	front
Material photoresist (category)		
Academic		
Process characteristics:		
Depth	Depth of material removed by etch process	1.0 μm 0 .. 1 μm
Material	titanium/tungsten	
Selectivity	photoresist (category): 2, silicon dioxide: 6, titanium/tungsten: 1	
Wafer diameter	100 mm	
Comments:		
• If Chamber D of P5000 not available, manual passivation/strip procedure must be performed.		
Attachments		

At the bottom, there is a note: "If you are interested in this process, either by itself or as part of a longer processing sequence, please send us email at engineering@mems-exchange.org or call us at (703) 262-5368."

FIG. 4 – Le catalogue de procédés de fabrication Mems-Exchange

au début de ce chapitre introductif). Selon les modèles, le poids et la masse sont des grandeurs volumiques tandis que les forces d'adhésion sont surfaciques. Un facteur de réduction de quatre ordres de grandeur (pour réduire un homme à une dimension de quelques centaines de microns) fait diminuer les effets gravitationnels de 10^{-9} tandis que les forces d'adhésion diminuent de 10^{-6} . Ainsi, pour des petites dimensions, ces forces d'adhésion sont prépondérantes sur les effets de pesanteur. De même, pour deux sphères identiques, les forces d'attraction mutuelle sont équivalentes à la gravité terrestre pour des diamètres faibles.

Afin de ne pas coller à la surface sur laquelle il se déplace, un objet microscopique doit donc avoir des contacts ponctuels avec celle-ci. Michel Wautelet continue ce raisonnement sur le diamètre des os, sur les dissipations de chaleur, etc. Il en déduit que la forme sphérique avec de multiples pattes fines (ainsi que le fait que les insectes n'aient pas le sang chaud) est la plus adaptée pour la vie à cette échelle, ce qui correspond à la "géométrie" des mites acariennes plus qu'à celle d'un homme à taille réduite.

Appliquer un coefficient homothétique à une géométrie afin d'obtenir un micro système au fonctionnement équivalent à l'échelle microscopique n'est clairement pas réalisable dans la grande majorité des cas.

Pour en revenir aux micro systèmes, la physique des contacts (avec la théorie de Hertz par exemple) est aussi soumise aux effets d'échelle. Pour des structures micrométriques, les tensions de surface et les forces électrochimiques de contact sont prépondérantes par rapport aux effets de gravité comme nous l'avons vu précédemment. La tendance au collage des structures est donc exacerbée lors notamment des étapes de libération de couches sacrificielles (cf chapitre 2.2.3). Ces problèmes ont été partiellement résolus grâce à un niveau de lithographie appelé "*dimples*" (terme anglais pour décrire les rides à la surface de l'eau par exemple) qui décrit la géométrie de petites structures sur lesquelles reposent les couches structurelles. Ces "excroissances" ont deux fonctions :

- empêcher le contact direct inter-surfaces,
- minimiser la surface de contact.

La figure 5 montre cette solution pour l'exemple d'un moteur rotatif électrostatique de chez Sandia (www.mems.sandia.gov).

Notre expérience du monde macro n'est plus valide, il convient alors de reconstruire des ordres de grandeur et un "instinct" de concepteur pour travailler dans le domaine des micro produits. En revanche, certains produits n'existeraient pas sans cet effet d'échelle, et c'est le cas des *switchs* d'indice opto-fluidiques que nous décrirons au chapitre 1. Les fluides sont confinés dans des cavités ou des canaux et ne coulent pas si le commutateur est incliné car les effets de capillarité sont prépondérants par rapport à la gravité. Cette application ne fonctionnerait pas pour de plus grandes dimensions.

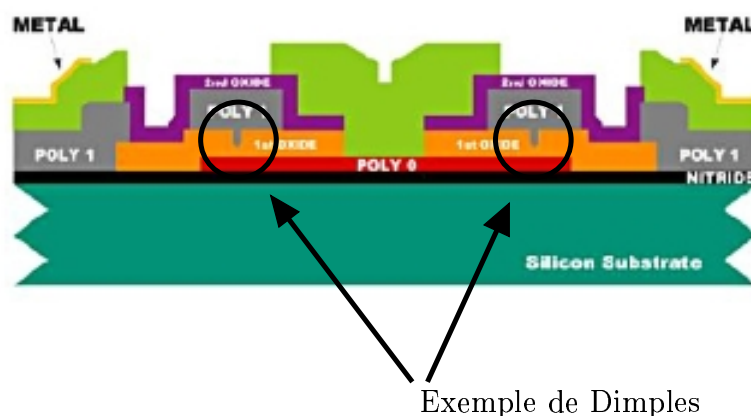


FIG. 5 – Exemple d'utilisation de *dimples* sur un moteur électrostatique
Laboratoire Sandia, www.mems.sandia.gov

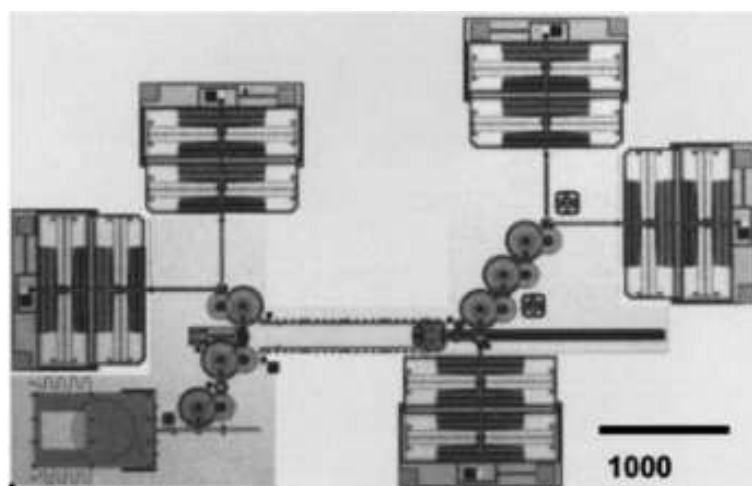


FIG. 6 – Les micro miroirs à actionnement par excentrique de Sandia

0.3 Questions de recherche et positionnement de la problématique

Questions de recherche

Jusqu'à présent, de nombreux micro produits, ou parlons plutôt de réalisations, n'existaient "presque" que pour prouver la faisabilité des technologies de fabrication et la validité de certains principes de fonctionnement. On voit à de nombreuses reprises dans la littérature, l'exemple des miroirs qui se soulèvent par train d'engrenages proposés par Sandia (cf figure 6). Ces applications, bien que très attractives et formidables d'un point de vue de la réalisation, n'apportent que peu de choses en terme de réalité industrielle. Ce ne sont que des démonstrateurs de possibilités technologiques, avec un taux très faible d'applications qui fonctionnent. En terme de performances, de répétabilité et de fiabilité, ces applications ne sont pas prêtes pour entrer sur le marché, malgré leur aspect encore une fois indéniablement attractif... Cependant, les "produits du futur" ne peuvent pas

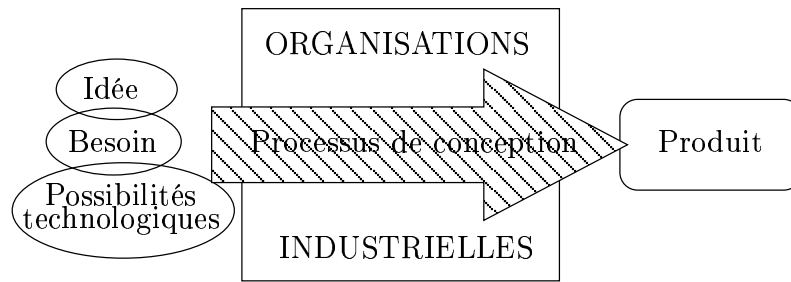


FIG. 7 – La création d'un produit

faire abstraction des micro et nano technologies et de leurs possibilités.

On peut modéliser de façon extrêmement succincte la vie de création d'un produit manufacturé par la séquence suivante : à partir d'un besoin, on passe d'une idée qui se transforme en produit "fini" par un processus de conception à travers une organisation industrielle, comme l'illustre la figure 7. Dans cette thèse, nous nous intéressons à ces micro produits en terme de caractérisation et de méthodes, et non en terme de solutions technologiques du produit lui-même. Pour cela il faudra tout de même caractériser fondamentalement le produit.

L'idée de départ naît d'un besoin (identifié ou non) ou bien d'une possibilité technologique. Le produit fini, quant à lui, est considéré comme ce qui est fourni au client. Quel que soit le client, le type de produit ou la nature de ce qui a conduit à entamer la démarche de conception, le passage d'une idée/concept à une finalité matérielle est toujours existant. Ce passage est le processus de conception, il traverse l'organisation industrielle du domaine dans lequel les acteurs de la conception travaillent. Ce processus de conception peut être vu en terme de protocole, de procédures, de flux de données, de rapports humains, de prises de décisions, d'une suite de médiations entre les acteurs. Il est difficilement modélisable en une représentation picturale car, par essence, multidimensionnel.

Les micro produits sont différents des macro produits, c'est une évidence rien que par leur taille et l'effet d'échelle qui en découle. Mais ces différences sont probablement bien plus nombreuses et fondamentales que cette première entrée dimensionnelle.

Nos questions de recherche sont les suivantes :

- *Q1* : Comment caractériser de manière fondamentale les micro produits ?
- *Q2* : Pour développer ces micro produits, les méthodes de conception sont-elles différentes ?

Plan du manuscrit

Notre apport sera à trois niveaux. D'une part, nous proposerons une caractérisation précise des micro produits tels que nous les aurons définis dans le domaine des produits manufacturés miniaturisés et issus de technologies innovantes. D'autre part, nous développerons une caractérisation du processus de conception de ce type de produit et

nous proposerons des solutions pour pallier à certaines étapes que nous jugeons non optimales. Enfin nous proposerons une étude sur la formalisation des connaissances du domaine des micro produits dans le cadre d'un enseignement.

Dans une première partie, nous étudierons le produit afin de dégager ses spécificités et d'en tirer des renseignements sur l'impact de ces nouvelles technologies sur les méthodes de conception. Nous nous appuierons sur une recherche bibliographique principalement orientée dans les exemples d'applications, ainsi que sur un état de l'art en matière de méthodes de fabrication. En effet, l'influence du processus de fabrication se révélera d'une importance capitale par la suite. Nous nous attacherons ensuite à apporter une classification des micro produits.

La seconde partie de la thèse reposera sur une modélisation du processus de conception des micro systèmes électromécaniques. Après une étude basée sur les méthodes existantes et pertinentes d'un point de vue de la conception d'un produit présentant les caractéristiques posées précédemment, nous examinerons une caractérisation simple du processus. Notre modélisation sera axée sur différentes analyses sur des notions telles que : les acteurs et leurs interactions, les connaissances émergeant durant l'activité de conception, les documents rencontrés au cours du processus... Nous diagnostiquerons l'aspect non optimal d'une partie de ce processus et nous mettrons en évidence des manques en terme de modélisation et d'instrumentation.

La troisième partie de cette thèse sera consacrée à la création d'un enseignement dans le domaine des micro produits. En effet, un cours d'initiation aux technologies de développement de MEMS a été proposé à des élèves ingénieurs et nous avons encadré un stage de fin d'étude sur le thème des micro résonateurs électromécaniques adaptés aux tête de lecture/écriture des disques durs d'ordinateurs. Nous détaillerons les objectifs et contenus de ces enseignements et nous dresserons un bilan de l'apport bilatéral de cette expérience par rapport à notre activité de recherche en terme de formalisation et structuration des connaissances.

0.4 La méthodologie de recherche

Chronologie de travail

La chronologie du travail de thèse est restée très classique avec un défrichement de la problématique, suivi d'une étude de terrain et d'une modélisation. L'étude bibliographique réalisée tout au long de la thèse est orientée suivant plusieurs axes : conception, fabrication et compréhension du domaine des micro produits à travers des exemples d'application.

Ainsi, la démarche de recherche a été double : d'une part, au niveau de l'approche de la problématique qui a grandement évolué au cours du temps; d'autre part, par un protocole qui visait à l'observation/action en immersion industrielle. La finalité est d'apporter une légitimité de la modélisation du processus de conception par une réalité

industrielle forte.

Démarche de recherche

La démarche originelle partait d'une comparaison *stricto sensu* entre macro monde et micro monde. En effet, la différence de dimension entre un micro commutateur de quelques centaines de microns et, disons, un grille-pain, ne pouvait pas, à nos yeux, ne pas rendre les pratiques de conception différentes. Les différences physiques sur le produit ne sont cependant pas remarquables uniquement au niveau dimensionnel. Nous en avons toutefois retiré la certitude que, si les effets d'échelle jouent un rôle prépondérant dans ces nouveaux produits, un concepteur ayant un bagage scientifique adapté (i.e. ayant le titre par exemple de concepteur MEMS, ou ayant eu une formation spécifique dans le domaine de la fabrication des micro systèmes) ne verrait pas forcément son travail modifié en terme de méthodes.

Par la suite, nous nous sommes intéressés au courant de miniaturisation afin de voir si cette descente dans les dimensions du produit nous amenait à une rupture au niveau des méthodes de conception. Cette étude s'est principalement faite au niveau bibliographique et à travers des entretiens avec des spécialistes.

Un autre point d'entrée fut une nouvelle comparaison mais cette fois entre les mondes de la microélectronique et ceux de la mécanique. Notre attention a été attirée sur cette dualité par les caractéristiques intrinsèques de ce type de produit, ainsi que notamment à travers un certain nombre de travaux cherchant à adapter les méthodes très structurées de conception de circuits intégrés. Cette dualité se poursuit lorsque l'on cherche à comparer les approches en terme de fonctionnalité et de rapport entre fonction et solution technologique.

Enfin, la démarche finale adoptée et qui semble la plus pertinente peut être vue comme une prise de recul par rapport aux approches précédentes. Nous nous attacherons à extraire des caractéristiques fondamentales et pertinentes pour caractériser en quoi, et à quel niveau, dans le processus de conception, nous avons affaire à quelque chose de "nouveau" ou bien de suffisamment spécifique pour apporter des modifications sensibles. Ces modifications peuvent être sur un facteur humain aussi bien que dans l'instrumentation informatique. La taille et l'effet d'échelle ne rendent plus ni triviales ni instinctives des opérations de développement de produits (conception, manutention, montage, vérification...).

Etudes de terrain

Au cours de cette thèse, deux stages ont été effectués. L'un dans une structure universitaire au *Laboratory for Manufacturing Automation* (LMA) de l'Université de Californie, à Berkeley, CA, USA et l'autre dans une structure industrielle. Ces deux stages complémentaires ont eu des apports bien entendu totalement différents sur la thèse, tant au niveau du type de connaissances qu'au niveau de leur utilisation pour la compréhension

et la modélisation du processus de conception.

L'étude des technologies de fabrication de micro produits La bibliographie et l'étude spécifique de procédés faisant partie intégrante d'une séquence de fabrication de micro produits a été menée au laboratoire LMA. L'un des procédés est l'usinage par enlèvement de copeaux à l'échelle microscopique et, le second est le polissage chimico-mécanique (CMP).

Durant ce stage nous avons participé à deux projets différents :

- une étude sur de l'usinage à l'échelle microscopique visant à adapter les théories de formation de bavures à ces dimensions,
- une conception d'une nouvelle machine de polissage chimico-mécanique CMP tant au niveau de la cinématique qu'au niveau de l'amélioration d'un de ses éléments, le *pad*.

Ces deux sujets ont abordé la thématique des micro produits par l'aspect fabrication. Les recherches bibliographiques associées nous ont permis une première approche des méthodes miniaturisées de fabrication, tant au niveau mécanique d'usinage qu'au niveau utilisation des technologies VLSI. En effet les tests de fraisage étaient associés à un projet de conception/réalisation de micro canaux fluidiques pour des applications en biologie de l'industrie du médicament. Une autre équipe testait des méthodes de fabrication de type lithographie/gravure et LIGA. Ces technologies sont détaillées aux chapitres 2.1.2 et 2.2.3.

Au niveau de la conception de la machine CMP, les technologies MEMS sont intervenues lors de l'étude d'implantation de micro capteurs de pression dans le *pad*. Ces capteurs doivent donner une carte des pressions sur le *pad* afin de contrôler le processus. Une pression uniforme indique une certaine planéité marquant la fin du processus. Afin de choisir les solutions technologiques pour les capteurs, nous avons effectué une première étude bibliographique sur les principes de détection et sur les méthodes de fabrication issues du domaine VLSI. Cela nous a permis de nous familiariser avec les applications MEMS, à la fois d'un point de vue conception à partir d'un cahier des charges et du point de vue de la réalisation car il est vite apparu un lien très fort entre les deux.

Ce stage nous a permis de comprendre plus en profondeur les différences entre la miniaturisation et l'intégration des procédés de fabrication. De plus, nous nous sommes ainsi familiarisés avec le domaine des micro technologies (tant au niveau des applications que des méthodes de développement) en les étudiant de manière active.

L'étude de la pratique industrielle de conception de MEMS : STMicroelectronics Afin de se rendre compte d'une réalité industrielle, l'étude de terrain s'est rapidement imposée d'elle-même. Cette approche met en oeuvre des méthodes issues des sciences sociales telles que la sociologie du travail, partenaire de longue date du pôle de Conception Intégrée du Laboratoire 3S. Mais avant de pouvoir s'inscrire dans une démarche d'observation participante ou de recherche-action, il a fallu acquérir une légitimité dans les connaissances et bâtir une expertise dans le domaine des technologies de fabrication et de simulation des micro systèmes.

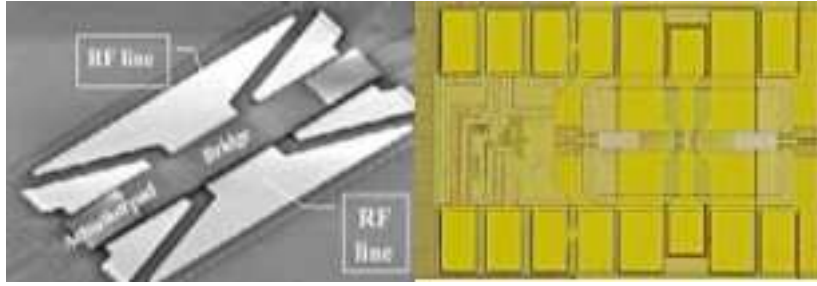


FIG. 8 – Deux vues du *switch* à actionnement thermique du Leti

Le stage s'est effectué dans l'équipe *above IC* chez STMicroelectronicsTM à Crolles dans les alentours de Grenoble. Cette équipe de recherche et développement s'occupe des MEMS et de leur implantation dans les puces électroniques. Le terme *above IC* signifie d'ailleurs "au dessus du circuit intégré". Au tout début de la période de stage, après avoir assisté à quelques réunions, il a été décidé l'investigation des possibilités d'adaptation d'un actionnement piézoélectrique dans une géométrie du type de celle du commutateur thermique (ou *switch*) du CEA/Leti [RBB⁺03] (cf figure A.1)

Le cahier des charges fourni était divisé en deux parties distinctes : les fonctions spécifiques et les contraintes de fabrication. Certaines entrées de cette première présentation sont de nature qualitative alors que d'autres sont hautement quantitatives et spécialisées. Le dossier de réalisation du *switch* thermique faisait également partie intégrante du panel de données de départ.

Nous avons commencé par tester les différents moyens de simuler, à l'aide d'outils informatiques, les effets piézoélectriques afin de mettre en avant des notions de confiance en l'outil et afin de mieux comprendre la théorie et le phénomène piézoélectrique lui-même. Les tests sont de complexité croissante (simple vérification des coefficients piézoélectriques puis de l'effet bilame et enfin de l'effet encastrement) et aboutissent sur une bonne compréhension du mode de fonctionnement du *switch*.

Le but de la partie de validation des outils informatiques (comparaison entre les calculs analytiques, les logiciels COVENTORTM et ANSYSTM ; la figure A.2 présente des captures d'écrans de simulations par éléments finis d'ANSYSTM et de COVENTORTM) était de qualifier les différentes façons de traiter les simulations des composants piézoélectriques. En effet, les résultats de retour de tests ne semblaient pas correspondre avec les simulations faites jusqu'à présent sur COVENTORTM.

Nous avons ensuite utilisé la théorie des plans d'expérience de criblage pour extraire des paramètres de conception. Cette méthode permet d'extraire les paramètres influant à la fois sur les contraintes aux encastrements et sur la flèche au centre du commutateur. Nous avons testé aussi bien des paramètres liés à la géométrie que les coefficients piézoélectriques. Cette partie nous a permis de classer les influences relatives des épaisseurs de couches et d'affiner le modèle éléments finis pour une plus grande rapidité de simulation.

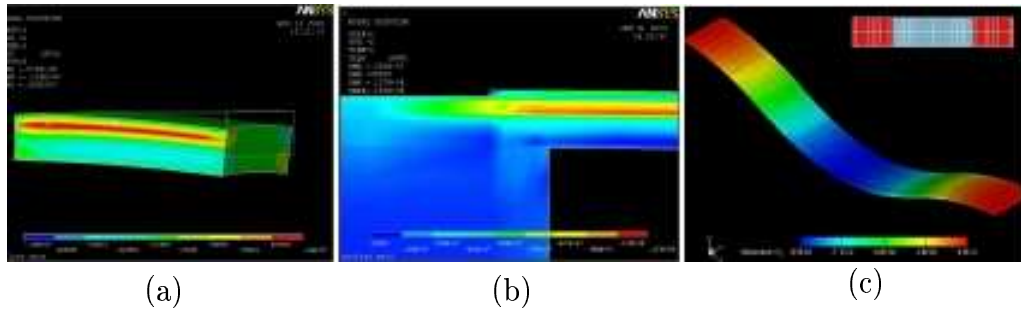


FIG. 9 – Modélisation ANSYSTM (a et b) et COVENTORTM (c) de bilames piézoélectriques

L'apport de ce stage en entreprise est multiple. Bien entendu, il a servi à étayer des connaissances tant au niveau des applications, des technologies de fabrication, que des outils et du processus de conception. Mais il a aussi permis de dégager une problématique d'amélioration de ce processus de conception, du point de vue global et du point de vue des outils. Cette immersion nous a par ailleurs donné l'occasion de faire un point sur l'état des connaissances d'ingénierie sur la conception des MEMS et de leur formalisation.

Première partie

Caractérisation d'un micro produit

Introduction

L'objectif de cette première partie est de caractériser les micro produits par rapport aux autres produits. Ces autres produits peuvent être des produits "macro" mécaniques ou bien des circuits intégrés. En effet, les MEMS sont à la charnière entre ces deux domaines. Nous allons dresser un panel des domaines d'application des micro produits. Nous en détaillerons certains exemples plus particulièrement afin de présenter les principaux modes de fonctionnement. Puis, nous ferons un récapitulatif des moyens de fabrication de ces produits : nous étudierons la miniaturisation des procédés d'usinage typés "mécanique", l'utilisation des procédés de production de l'industrie du silicium ainsi qu'un certain nombre de procédés particuliers.

Il est nécessaire d'avoir une approche centrée sur le produit dans un premier temps pour se familiariser sur les domaines d'application et les physiques associées. Mais il est aussi capital de bien connaître les méthodes de fabrication. En effet, sans une connaissance approfondie de celles-ci il est impossible de comprendre les particularités de ces produits. La caractérisation des produits nous donnera une grille d'analyse pour appréhender le processus de conception.

Taxonomie des produits à l'échelle macroscopique

Avant de caractériser plus avant et en profondeur les micro produits, il convient de savoir ce que signifie ce terme lorsqu'il est employé généralement. Que ce soit dans la vie quotidienne ou bien dans la littérature spécialisée, les termes "micro" ou "miniature" apparaissent souvent.

Qu'est-ce qu'un micro produit ?

Est-ce une simple question de taille ?

Un lecteur de CD est-il un micro produit ou bien un produit miniaturisé ?

Lors d'une conférence sur les MEMS en 2001, une taxonomie a été proposée, figure 10. Quatre catégories de MEMS sont présentées, la différenciation se faisant principalement sur la présence ou non de mouvement entre les différentes parties. Dans tous les cas, nous avons affaire à des produits présentant une partie électronique et des parties "mécaniques" : structurelles ou bien avec des mouvements/déformations/contacts.

La première classe ne nous semble pas pertinente dans le domaine des MEMS car, si il n'y a aucun mouvement intervenant dans le produit, nous nous situons dans le cadre d'un produit complètement électronique. Les trois classes suivantes évoluent en terme de complexité : la classe II présente un résonateur électromécanique (cf chapitre 1) ; la classe III, des micro miroirs dans un dispositif de projection (de chez Texas InstrumentTM) et

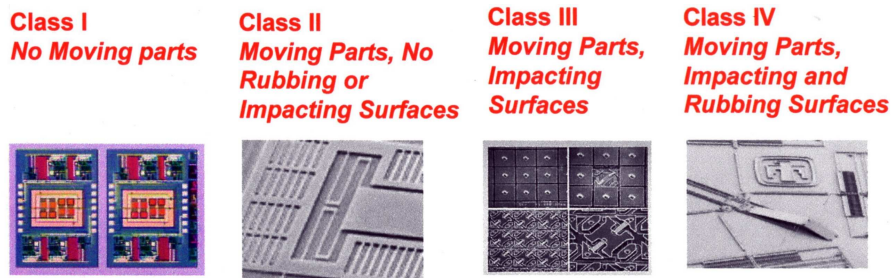


FIG. 10 – Une proposition de taxonomie des MEMS
(Source IMS 2001, workshop MEMS "introduction and applications")

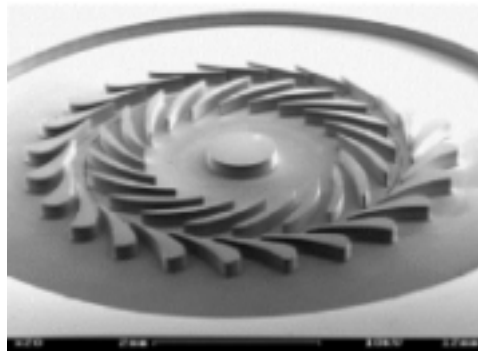


FIG. 11 – La micro turbine du MIT (photographie MEB)
(Source [Rib01])

la classe IV, un système complet avec engrenages et excentriques destiné à faire bouger des miroirs (chez SandiaTM).

La différence entre les classes I et II, ainsi qu'entre la classe II et les deux suivantes est adéquate en terme de fonctionnalités. En revanche, même si de nombreux problèmes tribologiques apparaissent lors du contact entre deux surfaces à ces échelles [Wil01, WWB⁺02], il ne nous semble pas nécessaire de faire une différence marquée à ce niveau.

Au vu de notre bagage académique, issu de la mécanique, nous proposons une autre classification. Nous considérons trois catégories principales de micro produits :

- les micro pièces mécaniques,
- les micro composants,
- les micro systèmes électro-mécaniques (MEMS).

Les micro pièces mécaniques :

Ce sont des pièces mécaniques (monolithiques dans la plupart des cas) dont la taille est microscopique. On ne peut cependant pas considérer que les engrenages dans une montre-poignet sont des micro pièces par exemple. En effet, l'évolution des procédés de fabrication mécanique (par opposition à ceux de l'industrie micro électronique) est telle que des pièces de dimension caractéristique de l'ordre du micron sont désormais réalisables couramment.

Yves Ribaud [Rib01] présente, par exemple, une micro turbine réalisée au MIT de

Boston. Les pièces qui la constituent sont toutes de dimension micrométrique et l'un des problèmes est bien entendu l'assemblage final. Cette turbine est constituée de micro pièces mécaniques. Lors de sa conception, des effets d'échelle font leur apparition, mais elle reste une miniaturisation d'une turbine macro et le processus global de développement est très similaire : fabrication des différentes pièces puis assemblage. La figure 11 montre une photographie MEB⁵ d'une des pièces de la turbine, réalisée sur silicium par gravure et épitaxie.

Pour résumer, les micro pièces mécaniques sont issues du domaine des produits mécaniques et leurs dimensions sont réduites, parfois de manière drastique. Les méthodes de fabrication utilisées sont aussi bien des miniaturisations de procédés mécaniques (cf chapitre 2) que des procédés développés à partir des technologies sur silicium (cf chapitre 2.1.2).

Les micro composants :

Ce sont des produits adaptés des composants électroniques en vue d'obtenir de meilleures performances, ils présentent des fonctions simples. En revanche, ces produits ne sont pas autonomes et agissent sur les circuits intégrés comme des composants électroniques classiques, ils seront ajoutés sur le produit global après encapsulation. Par exemple, un micro *switch* d'antenne sur un téléphone portable sera assemblé sur la carte de la même manière que le microprocesseur. Il apporte une amélioration par rapport à un commutateur CMOS en terme de courant de fuite, etc. Le client de ce genre de produit est souvent le *designer* VLSI qui conçoit le système électronique global.

Au niveau des principes de solution utilisés pour les fonctions réalisées, nous avons vu sur la figure 10 que des mouvements mécaniques sont mis en jeu, qu'il existe une cinématique. Cependant, ces mouvements sont plus souvent des déformations de pièces souples que des mouvements de solides rigides, telles que dans les systèmes mécaniques. En outre, les micro composants comportent une intégration fonctionnelle à la fois électronique et mécanique et ne sont pas réalisés par assemblage *post* fabrication. Les parties électroniques et mécaniques sont donc fabriquées dans un même flux, sur un même substrat de silicium, en utilisant les technologies venant de l'industrie du silicium (cf chapitre 2.1.2).

En résumé, les micro composants sont issus du domaine de l'électronique ; les fonctions réalisées auparavant par des moyens uniquement électroniques sont désormais réalisées de manière hybride mécanique et électronique. Dans cette optique d'intégration, les technologies de fabrication employées doivent être compatibles.

Les micro systèmes (MEMS) :

Les micro systèmes sont des micro composants (tels que nous les avons explicités dans le paragraphe précédent) avec une plus grande autonomie, que ce soit en terme de fonctionnement ou en terme énergétique. Un micro composant est en quelque sorte une brique atomique de plus dans la conception d'un produit de type circuit intégré. Un micro système MEMS est un produit en lui-même. Par exemple, un capteur de pression MEMS est une entité complète qui capte l'information, la traite et la communique à

⁵MEB = Microscope Electronique à Balayage

l'extérieur. Certains MEMS présentent à la fois des fonctions de détection et d'action sur le monde extérieur.

La différence principale avec le micro composant vient de cette plus grande complexité : les fonctions sont moins fondamentales, les rapports avec le monde extérieur sont plus complexes (ce qui va nécessiter la conception d'une interface spécifique (le *packaging*), plus difficile, et aussi plus intégrée). La conception d'un tel produit doit intégrer le fonctionnement mécanique, la partie électronique ainsi que le *packaging*, et ce dans des domaines multiphysiques complexes tels que la biologie, la télécommunication radio-fréquence. . .

Pour résumer, un micro système MEMS est au croisement entre l'électronique et la micro mécanique. Les fonctions réalisées sont complexes et en relation avec le monde extérieur par l'intermédiaire d'une interface spécifique. La fabrication de ces produits doit prendre en compte cette intégration électro-mécanique et provient de l'industrie du silicium pour des raisons de compatibilité (cf chapitres 2.1.2 et 2.2.3).

Tableau récapitulatif

Micro pièces mécaniques	Micro composants	MEMS
assemblage post fabrication	assemblage pré-fabrication	assemblage pré-fabrication
tout type de procédés de fabrication	compatibilité VLSI	compatibilité VLSI
	présence d'électronique CMOS	présence d'électronique CMOS
	fonctions simples	fonctions complexes
		rapports avec le monde extérieur dans des domaines multiphysiques variés

Dans cette thèse, nous considérerons principalement les micro composants et micro systèmes, produits hybrides électro-mécaniques. Ces produits sont réalisés par des procédés issus de l'industrie de la micro électronique sur silicium et sans assemblage *a posteriori* (outre le *packaging*, ou encapsulation).

Pour répondre à la question du début de cette introduction, un lecteur CD n'est donc pas considéré comme un micro produit même si ces appareils présentent des dimensions de plus en plus réduites, qu'ils incluent des parties électroniques et mécaniques... En effet, on a dans ce cas un produit plutôt qualifié de "mécatronique", assemblage de composants de domaines différents. C'est l'intégration VLSI et la compatibilité obligatoire des méthodes de fabrication, ainsi que la taille, qui font cette énorme différence entre miniaturisation de systèmes et MEMS.

Chapitre 1

Les micro produits dans leurs domaines d'application

Dans ce chapitre, nous allons présenter un panel d'applications des micro technologies. Cette étude est issue à la fois de la bibliographie et d'un travail sur certaines réalisations particulières dans le cadre des stages que nous avons effectués. Afin de mieux comprendre les différences entre micro systèmes, micro composants et MEMS, et aussi pour mieux cerner les enjeux d'une approche multiphysique, il est nécessaire de présenter une liste de micro produits. Cette liste n'est évidemment pas exhaustive.

Les micro produits sont présents dans de nombreux domaines, nous aborderons en particulier les domaines :

- de l'automobile,
- des télécommunications,
- de l'aéronautique,
- de l'optique,
- de la biologie et du médical,
- et de l'informatique portable.

Dans certains de ces domaines, des applications sont passées en production alors que dans d'autres elles restent dans le domaine de la recherche et développement. Nous détaillerons quelques applications spécifiques telles que le *switch*, la capacité variable, les micro miroirs, les ailes des micro objets volants MAV...

Le cas particulier du résonateur électromécanique sera accompagné d'une formulation mathématique de fonctionnement.

1.1 L'industrie automobile

La part de l'électronique dans les automobiles ne cesse de croître. Il paraît alors indiqué de remplacer les batteries de capteurs mécaniques par des capteurs micro systèmes. Leur taille réduite est aussi un avantage certain pour multiplier les points de mesure dans tous les sous-ensembles du véhicule. De même la possibilité d'avoir une interrogation à distance a permis de placer des capteurs à des endroits auparavant inaccessibles durant l'utilisation.

On peut d'ores et déjà dresser une liste de points où les micro capteurs sont répartis :

- dans le moteur lui-même : de nombreux capteurs de pression (pour contrôler, par exemple, le ratio air/essence à l'admission), de température, etc. apportent des informations sur la combustion qui est régulée par un calculateur ; des contrôles anti-pollution en continu sont réalisés grâce à des capteurs chimiques placés à l'échappement,
- les suspensions (cf plus bas le cas de la Mercedes Classe A),
- les systèmes anti-patinage, pour lesquels des gyroscopes sont présents dans les essieux,
- la sécurité : l'accéléromètre ADX-50 est l'un des micro systèmes à être passé le plus tôt en production, il est communément utilisé dans les déclencheurs d'airbags (le tableau suivant donne un récapitulatif des spécifications des accéléromètres à divers endroits dans le véhicule) ; on trouve aussi des capteurs de présence dans les sièges, des capteurs de pression interrogés par radio-fréquence dans les pneumatiques et des systèmes de détection d'obstacle dans la carrosserie (par exemple en cas de recul).

Paramètres	Airbags	Stabilité du véhicule	Conduite
Gamme de sensibilité	50 g	2 g	1 g
Gamme de fréquence	0-400 Hz	0-400 Hz	0-100 Hz
Résolution	< 100 mg	< 10 mg	< 4 μ g
Choc maximal en 1 ms	> 2000 g	> 2000 g	> 20 g
Gamme de température	-40 à 85 °C	-40 à 85 °C	-40 à 80 °C
Sensibilité à la température	< 900 ppm/°C	< 900 ppm/°C	< 50 ppm/°C

Tableau récapitulatif des spécifications d'accéléromètres.

Le cas de la Mercedes Classe A est un bon exemple de l'arrivée opportune de solutions utilisant les micro technologies. Lors de sa sortie, des tests avaient mis en évidence des problèmes de tenue de route importants. Pour réaliser sa mise sur le marché, les ingénieurs ont pu résoudre ce problème, ils ont introduit de manière très localisée la technologie des micro systèmes. En effet, des capteurs accélérométriques sont désormais placés dans chaque essieu. Ces détecteurs donnent des informations inertielles ainsi que sur l'inclinaison des essieux à la commande de la suspension active.

Exemple particulier du capteur de pression : Les capteurs de pression sur silicium ont commencé à être développés dès la fin des années 50, il en existe trois catégories principales avec, par ordre chronologique d'apparition, les capteurs piézorésistifs, les capteurs capacitifs et enfin les capteurs résonants.

Les capteurs à mode de retour d'information piézorésistifs sont très simples à fabriquer,

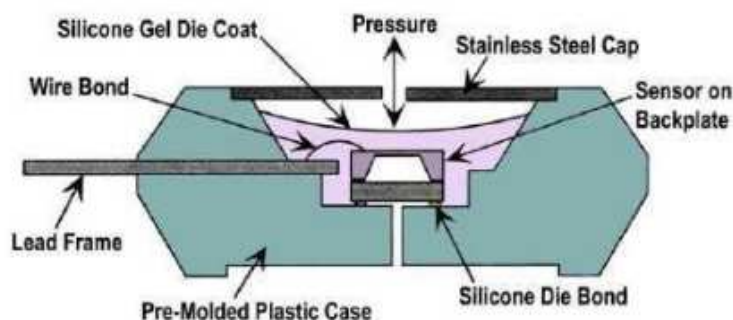


FIG. 1.1 – Un capteur de pression encapsulé

une couche de matériau piézorésistif sur une fine membrane de silicium sert à mesurer la pression via la déformation de la membrane. Sa bonne linéarité et le fait d'obtenir une réponse directement en tension sont des avantages. En revanche, ce type de capteur est très sensible à la température, un pont de Wheatstone est classiquement utilisé pour pallier à ce problème.

Les capteurs capacitifs sont plus précis et surtout moins dépendants de la température. Leur fabrication est néanmoins bien plus complexe avec des électrodes et une partie électronique de traitement de l'information. En effet la mesure est capacitive ce qui nécessite un traitement électronique important.

La précision est encore augmentée en ajoutant un résonateur à ces capteurs capacitifs. Le changement dans la fréquence de résonance apporte une information supplémentaire mais ces capteurs agissent dans le "vide" et des problèmes de *packaging* apparaissent (cf figure 1.1), ainsi que des couplages mécaniques avec la membrane.

1.2 Les télécommunications

La miniaturisation des téléphones portables et la multiplicité des fonctions désormais disponibles dans ces applications font que les performances des composants MEMS sont très demandées dans le domaine des télécommunications, comme dans l'électronique en général. Ils remplacent certains composants passifs (inductances, capacités) ou réalisent des fonctions actives telles que commutation ou filtrage. Les coefficients de qualité des inductances sont par exemple améliorés en séparant physiquement les structures en "bobine" du substrat et en limitant ainsi la formation de capacités parasites. De la même façon, des coefficients de qualité de filtres très élevés sont obtenus par un filtrage électromécanique en fréquence. Ceux-ci sont réalisés en couplant des effets électroniques et la résonance mécanique. Une structure est excitée, en général électrostatiquement, et entre en résonance mécaniquement à une fréquence qui dépend de sa géométrie. Cette fréquence de résonance est mesurée à nouveau par des moyens électroniques. Les capacités variables sont utilisées pour faire du *tuning* et modifier les fréquences de résonance à la commande.

Exemple particulier du *switch* et de la capacité variable : Ces deux applications exploitent des conceptions de géométrie très proche. Le principe de base est la

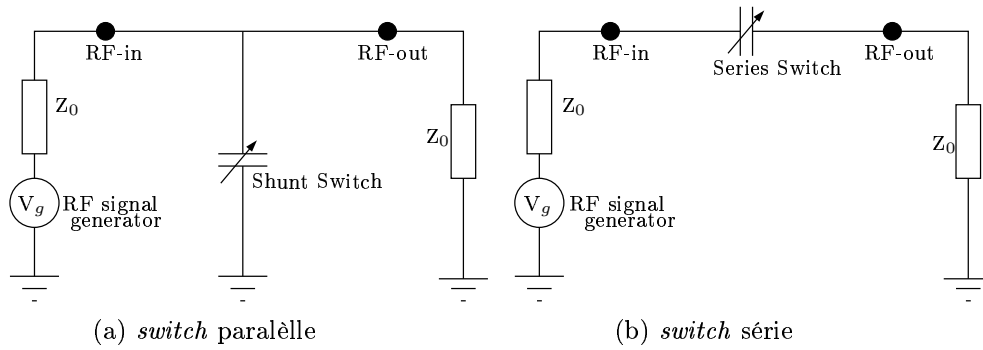


FIG. 1.2 – Différence entre *switchs* série et parallèle
(Source [RM01])

déflexion d'une poutre ou d'une membrane qui, dans un cas fait varier l'entrefer de la capacité [Cas02], dans l'autre cas amène deux surfaces en contact. Il y a deux circuits électriques distincts : le circuit principal et celui d'actionnement.

Il existe deux types de micro commutateurs (ou micro relais) : les *switchs* "série" ou les *switchs* "capacitifs" (ou *switch shunt*) comme le montre la figure 1.2. Le *switch* série agit comme un interrupteur classique et coupe physiquement le contact sur une ligne électrique. Le *switch* capacitif coupe la ligne principale en réalisant une liaison avec un isolant. L'avantage principal par rapport à un commutateur réalisé par technologie CMOS est que le circuit est coupé physiquement, il n'y a donc pas (ou peu) de courant de fuite en position ouverte ou de perte en position fermée. De plus, ces *switchs* sont plus performants d'un point de vue énergétique car ils ne consomment que lors de la période d'actionnement, contrairement à leurs homologues CMOS. La vitesse de commutation est cependant une limitation à ce genre d'applications : des temps de l'ordre de la microseconde ne permettent pas de rivaliser avec les commutateurs CMOS dans le cas des applications haute-vitesse (par exemple le passage entre un fonctionnement émetteur/recepteur).

La capacité d'un condensateur dépend de sa géométrie, elle est proportionnelle à la surface des électrodes en regard et inversement proportionnelle à l'entrefer. Une capacité variable fonctionne globalement de la même façon qu'un *switch* dans le cas où l'entrefer est modifié. Un circuit électrique d'actionnement fait ployer une membrane ou une poutre et réduit la distance entre deux électrodes. Il existe aussi des capacités variables agissant sur la surface en regard. Souvent, pour des problèmes de défauts de fabrication, les deux phénomènes ne sont pas clairement séparés et il est difficile de les faire varier totalement indépendamment. Par exemple, on exploite l'effet *zipping* pour obtenir des capacités variables de grande plage de variation mais la formulation de la capacité en fonction de l'actionnement est complexe car l'entrefer et la surface varient.

Au niveau des modes d'actionnement, il existe deux grandes familles : l'une utilise les forces électrostatiques ou magnétiques, l'autre un effet bilame.

Dans le cas d'un actionnement électrostatique, une capacité est créée en mettant en regard deux électrodes (une fixe et une mobile) qui, soumises à un potentiel, emmagasine une énergie. De cette énergie de potentiel dérive une force. La force est une fonction de la

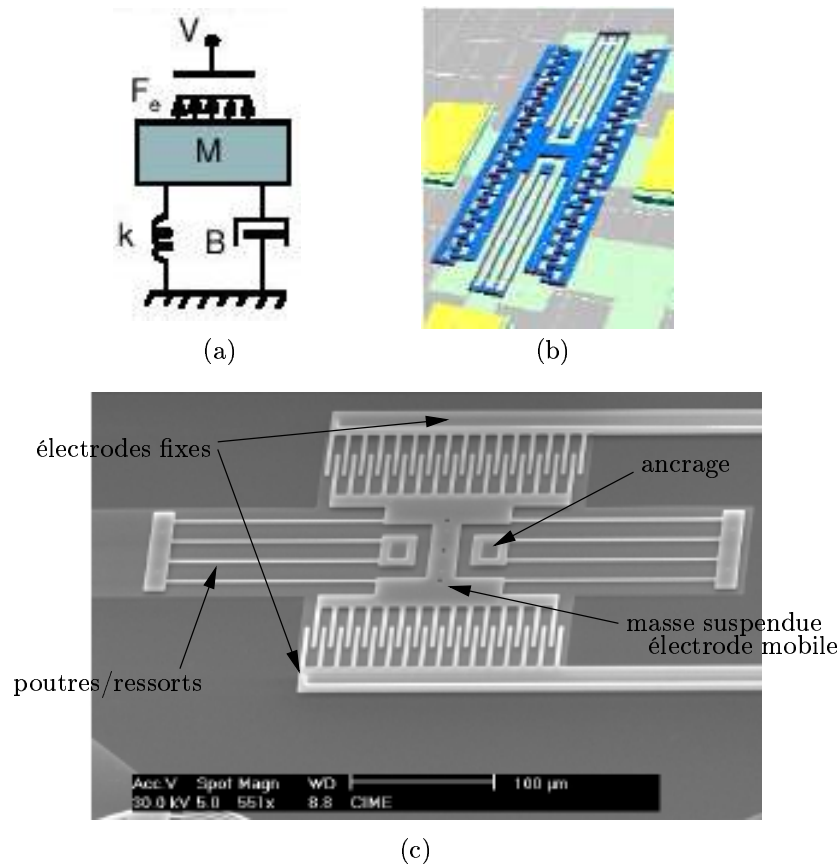


FIG. 1.3 – Descriptions d'un résonateur électromécanique
 (a) schéma électromécanique, (b) modélisation par éléments finis, (c) photo MEB

variation de capacité donc de la distance entre les électrodes, elle est uniquement attractive. L'avantage de ce type d'actionnement est principalement la faible consommation en énergie car il utilise un potentiel mais pas de courant.

Dans le cas d'un actionnement de type bilame; le mouvement est donné par dilatation différentielle de matériaux en sandwich ce qui provoque un moment et une déformation. On se reportera à l'étude de l'actionnement piézoélectrique lors du stage chez STMicroelectronics pour plus de détails sur ce type d'activation dans l'annexe A.

Exemple particulier du micro résonateur électromécanique à peignes interdigités : Les résonateurs électromécaniques à peignes interdigités sont des composants MEMS classiques, ils sont utilisés comme transducteurs électrique-mécanique dans les deux sens, i.e. comme moteur ou bien comme filtre électromécanique.

Un résonateur électromécanique à peignes interdigités se présente en trois parties : deux électrodes fixes et une masse suspendue à des ressorts qui agit comme électrode mobile comme on peut le voir sur la figure 1.3. La partie massique inertielle ainsi que les ressorts agissent comme filtre mécanique en imposant une fréquence de résonance qui dépend de la masse M et des coefficients de raideur k des ressorts. Entre les électrodes, appelées peignes interdigités pour d'évidentes raisons géométriques, se crée une force mécanique électrostatique qui dérive du potentiel qui y est appliqué. Les électrodes fixes et mobiles

forment une capacité variable, lorsqu'elles sont soumises à une différence de potentiel V elles emmagasinent une énergie potentielle de la forme :

$$E = 1/2 CV^2 \quad (1.1)$$

La force électrostatique dérive de cette énergie selon les variations de capacité. La géométrie de la structure fait que le mouvement n'est possible que dans une direction x et donc la force peut s'exprimer :

$$F_x = -\frac{\partial(1/2 CV^2)}{\partial x} = -1/2 V^2 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1.2)$$

Or, la capacité d'un condensateur en fonction de la surface A et de l'entrefer d s'écrit :

$$C = 2\varepsilon_0 \frac{A}{d} \text{ avec } A = ex \quad (1.3)$$

où e est l'épaisseur des électrodes et x représente une longueur en vis-à-vis.

La force électrostatique selon l'axe du mouvement est donc :

$$F_x = -\frac{e\varepsilon_0 V^2}{d} \quad (1.4)$$

On remarque que cette force est indépendante de x et donc de la position relative des électrodes. En revanche, elle est proportionnelle au carré de la tension appliquée aux bornes des électrodes. En appliquant une tension fixe V_f à la masse mobile (par l'intermédiaire des ancrages) et une tension alternative V_i aux électrodes fixes, il est possible d'exciter la masse mobile avec une force d'amplitude :

$$F_x = -\frac{e\varepsilon_0 (V_f - V_i)^2}{d} \quad (1.5)$$

En appliquant sur les deux électrodes un potentiel suffisamment élevé pour obtenir une force de grande amplitude, et en se plaçant dans le cas de petites variations de V_i autour de ce potentiel, on obtient :

$$F_x \simeq 2\frac{e\varepsilon_0}{d} V_f V_i \quad (1.6)$$

Cette force est linéairement dépendante de la tension V_i appliquée aux bornes des électrodes fixes, ce qui offre des facilités de contrôle de la fréquence d'excitation.

La structure est composée d'une masse, de ressorts et d'une force excitatrice, elle se comporte comme un oscillateur harmonique, régie par l'équation :

$$M_{sis} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\sqrt{M_{sis} k}}{Q} \frac{dx}{dt} + kx = F_x \quad (1.7)$$

La constante de raideur k est obtenue par une étude en flexion des poutres et dépend donc de leur géométrie et du module d'Young des matériaux utilisés. M_{sis} représente la masse sismique équivalente dont une expression a été donnée par Tang [Tan90]. Q est le facteur de qualité de la résonance, il est lié aux écoulements de l'air entre les surfaces en regard. La pulsation propre du système dépend uniquement des paramètres mécaniques

et s'écrit :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M_{sis}}} \quad (1.8)$$

Ces équations montrent la forte dépendance de la géométrie et du fonctionnement de ces applications. Le résonateur électromécanique à peignes interdigités est une application passée en production, c'est aussi un cas d'étude souvent rencontré. Avec ces géométries simples, certaines solutions commencent à devenir classiques. Ainsi, les ressorts en méandre de poutres suspendues et les peignes électrostatiques font partie des bibliothèques de composants atomiques de certains outils de conception assistée par ordinateur. De la même façon que pour le duo *switch* et capacité variable, cette famille de produits propose différentes applications : ici résonateur, filtres et capteurs inertiels partagent le principe masse/ressort/peignes. C'est un composant déjà complexe qui utilise ces éléments atomiques dont la maturité est suffisante pour tester des méthodes de conception et des algorithmes d'optimisation comme nous le verrons dans la partie II.

1.3 L'aéronautique

Les applications MEMS en aéronautique et dans les satellites sont nombreuses pour des raisons de gain de place, de poids et de consommation au niveau du composant lui-même [MHM⁺96]. Le problème principal au niveau d'une utilisation dans le spatial est la fiabilité, les exigences de ces applications ne sont pas satisfaisantes à ce niveau par manque de connaissances à l'heure actuelle, notamment en terme de durée de vie. Mais les gains par exemple en terme de coûts de mise en situation sont prometteurs.

Dans le cas de l'aéronautique, on retrouve les mêmes avantages que dans l'automobile à ceci près que le facteur poids est prépondérant. Au niveau des capteurs, la possibilité de faire des acquisitions distribuées sur la totalité de la carlingue en réseau est un avantage surtout dans le cas de l'aviation de transport (civile ou militaire) au vu de la taille des avions qui requièrent des millions de points de mesure. Ces acquisitions sont aussi bien du type température, flux d'air, pression que contraintes dans les matériaux. Dans le cas de l'aviation de chasse, le casque et la combinaison des pilotes sont déjà remplis de micro systèmes de tous types. Dans ce cas, c'est l'amélioration des performances qui prime sur le gain de coût.

Une des applications les plus marquantes est sans doute le traitement local de la couche limite sur les ailes. De micro actionneurs sont disposés sur les ailes et opèrent des petites modifications de géométrie afin d'améliorer le décollement de la couche limite durant le vol.

La miniaturisation fait aussi son apparition dans le domaine des drones volants. Porsin [PsLN⁺00] présente un processus de fabrication issu des technologies de développement de MEMS pour réaliser des ailes de micro objets volants. La figure 1.4 détaille la séquence de gravure/lithographie/dépôts (cf chapitre 2.1.2) et montre une forme d'ailes empruntées à la chauve-souris. Dans cet article, Miller décrit la procédure de sélection

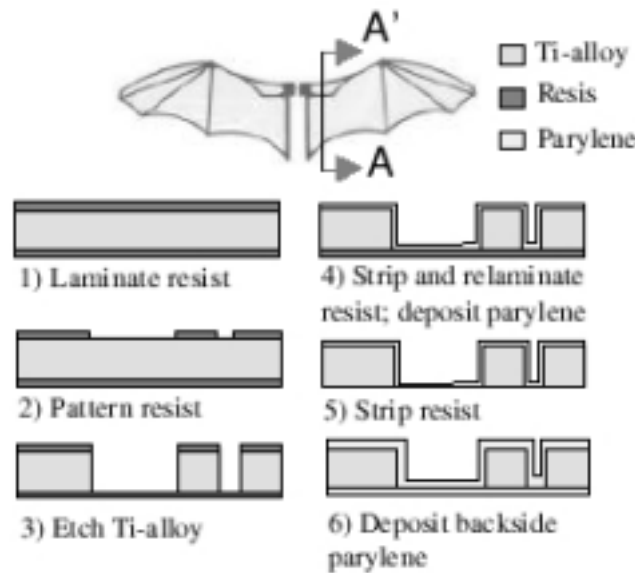


FIG. 1.4 – Séquence de fabrication d'ailes de micro objets volants
(Source [PsLN+00])

de la géométrie et du procédé de fabrication et présente une étude commune de biologie, étiologie et de mécanique des fluides aéronautique. En effet, cet objet volant entre dans la catégorie des ornithoptères, ce qui apporte des contraintes de mode de fonctionnement par battements d'ailes, et de taille (15 cm d'envergure maximale). Des vols réels ont été effectués mais très courts (quelques dizaines de secondes), l'apport d'énergie par batterie présente toujours un problème majeur.

1.4 Optique et communication optique

Les applications optiques des micro systèmes sont très nombreuses au point d'avoir créé une dénomination spéciale : les MOEMS, pour Micro Opto Electro Mechanical Systems. Les substrats *AsGr* sont utilisés pour certaines de ces applications lorsque le substrat lui-même doit avoir de bonnes propriétés optiques.

Le futur de la communication par réseau passe par des matrices de brassage optique, la communication optique présentant de nombreux avantages sur la communication électrique notamment en terme de pertes et d'énergie. La petite taille et la possibilité de réaliser à moindre coût un nombre important de structures identiques font des micro systèmes des candidats idéaux pour ces applications. Cette possibilité de réaliser des structures identiques en matrice a été exploitée rapidement dans le domaine de la projection. Les réseaux de micro miroirs mobiles et contrôlés électrostatiquement sont l'une des premières applications MEMS (ou MOEMS) à être passées en production, à l'instar des accéléromètres. Le principe est d'éclairer ou non un pixel en dirigeant un faisceau lumineux par l'intermédiaire d'un miroir. En utilisant le principe de synthèse additive des couleurs, il est possible de projeter des images en couleur avec trois faisceaux rouge, bleu et vert. Texas Instrument et sa technologie DMD propose des applications dans le domaine

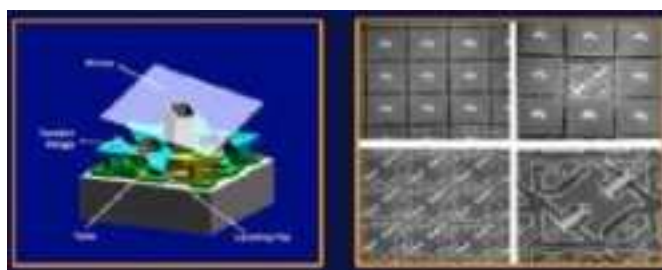
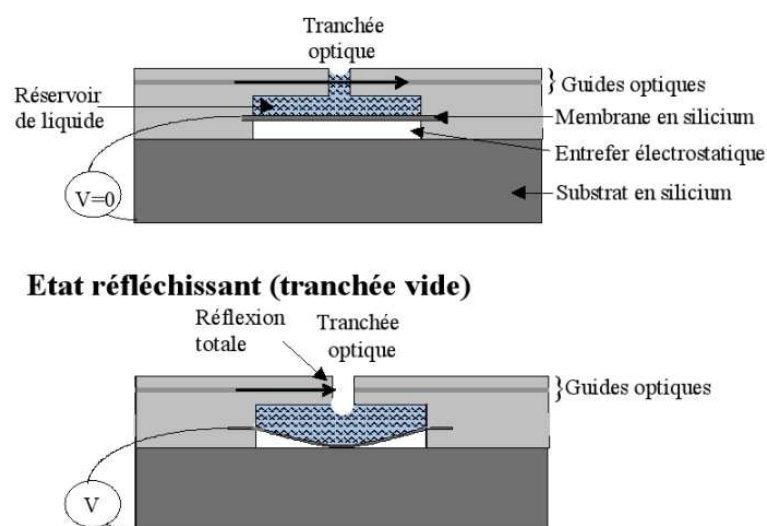


FIG. 1.5 – Matrice de micro miroirs de Texas Instruments

FIG. 1.6 – Principe de fonctionnement d'un switch d'indice opto-fluidique
(Source [LCB⁺03])

du "home theater" et du cinéma numérique. La figure 1.5 présente cette technologie, la méthode de fabrication est propriétaire.

Exemple particulier du switch opto-fluidique : Les matrices de brassage sont des réseaux d'interrupteurs positionnés en carré permettant un multiplexage. Certains de ces interrupteurs sont réalisés en exploitant la réflexion totale d'un faisceau optique sur les parois du silicium dans le cas où une cavité est vide [LCB⁺03]. Si celle-ci est remplie d'un liquide d'indice connu et proche du substrat utilisé, le faisceau n'est pas dévié. Le liquide est commandé par l'intermédiaire d'une membrane en silicium actionnée électrostatiquement (afin de limiter la consommation d'énergie). Le principe de fonctionnement est résumé sur la figure 1.6. C'est la prépondérance des forces de capillarité sur les effets gravitationnels qui autorise le fonctionnement d'un tel commutateur.

Exemple particulier des micro miroirs à actionnement magnétique : Miller et al [MT97] présentent des micro déflecteurs à actionnement électromagnétique pour la lecture des codes-barres. Ce type d'actionnement est encore mal maîtrisé car les propriétés et les méthodes de fabrication des matériaux électromagnétiques sont encore mal connues. En effet, si ces technologies sont attractives du point de vue des mouvements et des forces

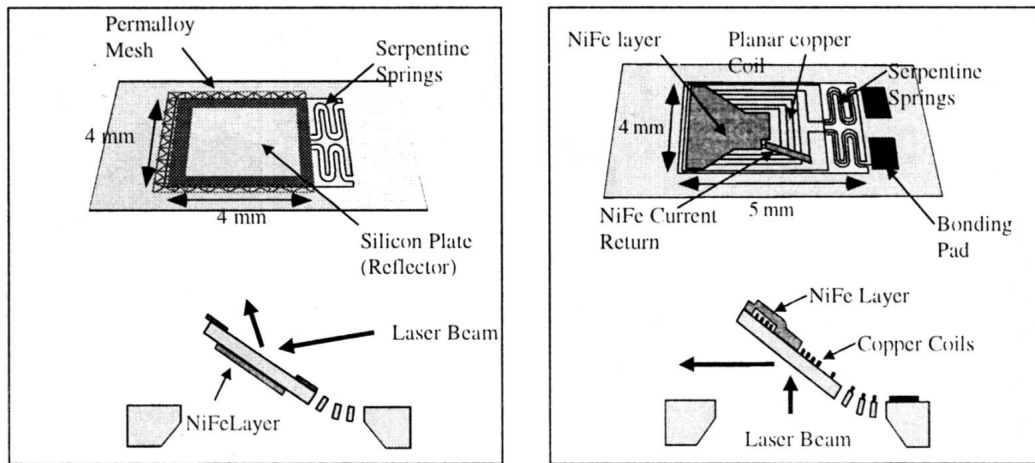


FIG. 1.7 – Micro miroirs magnétiques
(Source [MT97])

obtenues, elles sont sujettes à un manque de maturité car elles ne bénéficient pas des avancées de la microélectronique où ces propriétés sont peu exploitées. Le miroir est placé dans un champ magnétique et subit un couple dépendant du courant qui passe dans la bobine qui lui est associée. La liaison pivot entre le miroir et le substrat est réalisée une fois encore par déformation de poutres/ressorts en méandres. Dans la figure 1.7, on peut voir deux conceptions possibles de ces miroirs. La première (figure de gauche) fait intervenir des aimants permanents et le contrôle se fait par l'intermédiaire d'un champ variable unique. La deuxième conception (figure de droite) combine un champ d'activation principal et un contrôle plus fin par l'intermédiaire d'un micro électro-aimant sous la forme d'une bobine de NiFe.

1.5 Le domaine médical et la bio-technologie

La biologie et la médecine sont des domaines où les micro systèmes sont très intéressants pour deux raisons principales : la taille et la bio-compatibilité du silicium. Il est tout à fait possible de créer des systèmes autonomes capables de diagnostiquer et d'agir directement à l'intérieur du corps humain.

- diagnostic et monitoring *in situ*,
- micro chirurgie à distance (outillage, visualisation)
- implants actifs (test dans le sang de divers paramètres tels que le pH, la pression artérielle, avec possibilité d'injection de médicaments...),
- pacemakers (capteurs inertiels qui permettent un asservissement de l'action du pacemaker à l'activité physique),
- diverses prothèses de petite taille (oeil, oreille),
- caméra endoscopique (une des parties de l'intestin était inaccessible jusqu'à récemment, donc méconnue),
- les capteurs d'empreintes digitales.



FIG. 1.8 – Une biopuce à ADN

Exemple particulier des biopuces à ADN : Les biopuces à ADN exploitent la possibilité de répliquer un grand nombre de fois un motif sur un substrat de silicium. Cette puce mesure environ 1 cm^2 comme on peut le voir sur la figure 1.8. Des chaînes nucléiques sont réalisées comme sondes en matrices implantées sur une puce, ces sondes réagissent avec l'échantillon testé en hybridant des brins d'ADN et en les capturant sur la puce. Ces brins sont marqués par des substances fluorescentes fixées au préalable et les résultats sont obtenus de manière optique. La conception de ce genre de produit, on s'en doute, demande des connaissances très précises et approfondies en génétique et biologie.

1.6 L'informatique portable

Wearable Computing [Sta01a, Sta01b] est un terme générique qui décrit un nombre assez vaste de produits et de concepts. Actuellement, nous utilisons un nombre important de composants informatiques, nombreux parmi ces composants sont redondants. En effet un lecteur mp3, une calculatrice scientifique, un agenda électronique et un téléphone portable, par exemple, partagent tous des microprocesseurs plus ou moins équivalents, des mémoires, des réserves d'énergie, etc. Avec l'avènement des réseaux d'information et de communication sans-fil, il est possible de combiner toutes ces applications et, la miniaturisation aidant, les rendre si proches de l'homme que leur usage devienne totalement naturel. Une des idées majeures dans ce domaine est l'inclusion de l'informatique, des micro détecteurs et actionneurs dans les vêtements.

Les concepts sont les suivants :

- autoriser l'usage des mains lors d'une utilisation de l'appareillage,
- explorer l'environnement de l'utilisateur en permanence, même lorsque celui-ci n'utilise pas spécifiquement l'appareillage, de manière inobstrusive,
- s'adapter aux besoins de l'utilisateur de manière automatique,
- "améliorer la réalité"¹
- donner l'accès en permanence à des réseaux d'informations (par exemple Internet).

Une bonne partie de ces concepts sont similaires à ceux développés par Manfred Clynes et Nathan Kline lorsqu'ils inventèrent le terme de *cyborg* ou d'interface symbiotique

¹traduction personnelle pour *augmented reality*

homme-ordinateur. L'idée principale est d'obtenir une extension de l'homme qui puisse être utilisée de manière naturelle. Ce qui était il y a quelques années encore du domaine de la science-fiction est désormais un domaine de recherche avec des objectifs réels et affichés, ainsi que des réalisations physiques.

L'exemple des lunettes/écrans illustre parfaitement ces concepts. L'un des verres est totalement opaque pour abriter les fonctions informatiques (CPU, traitement des signaux, lien au réseau, énergie...) et muni d'une caméra pour donner à l'utilisateur l'illusion d'un univers en trois dimensions. Sur chaque verre, des cristaux liquides ajoutent des labels sur des objets réels. Les mouvements de la pupille sont suivis par des détecteurs et donnent des informations *via* des hyper textes qui défilent si l'utilisateur fixe un de ces labels. Des écouteurs peuvent être adjoints ainsi que des petits claviers multifonctions souples cousus sur des parties de vêtements. De tels dispositifs se basent sur "la réalité améliorée" et pourraient aussi faire office de téléphone, agenda. ...

Mais beaucoup de problèmes restent difficiles à résoudre : gestion de l'énergie, dissipation de la chaleur, liens aux réseaux, protection de la vie privée (que ce soit celle de l'utilisateur ou bien de l'entourage)... Ces voies de recherches sont celles de micro produits en général.

Conclusion

Nous avons apporté dans ce chapitre des exemples de solutions que pouvaient apporter les technologies des micro produits en général, et des micro systèmes, dans plusieurs domaines. De ce panel non exhaustif des domaines d'application, nous tirons des éléments de caractérisation par rapport aux produits classiques (que ce soit en mécanique ou en électronique).

Tout d'abord, il est clair que, d'un point de vue strictement dimensionnel, les micro produits s'inscrivent dans une échelle allant de quelques microns à quelques millimètres. Ces dimensions peuvent être les dimensions globales du système (un résonateur électromécanique peut mesurer $500\ \mu m$ par $200\ \mu m$, comme sur la figure 1.3) ou bien les dimensions caractéristiques des éléments dans un produit plus grand (comme dans le cas des biopuces). Dans le cas des MEMS ou des micro composants, on observe un mouvement entre différentes parties du produit et une intégration des fonctions électronique et mécanique. Par exemple, la capacité variable agit sur la capacité d'un condensateur, grandeur électrique, par l'intermédiaire d'une action mécanique de déformation de structures.

Ensuite, pour chaque application que nous avons vue, il existe toujours un aspect multiphysique très intégré. Dans la plupart des cas, c'est bien sûr les domaines de l'électronique et de la mécanique, mais la physique de l'application est souvent non découplable de ces deux domaines. Le micro *switch* à actionnement thermique du Leti se place dans le domaine des radio-fréquences. La géométrie, les matériaux et les caractéristiques électroniques (bande passante, facteur qualité...) et mécaniques (surface de contact, pression de contact...) sont conditionnées par ce domaine d'application.

Enfin, certaines application ne pourraient pas fonctionner à des dimensions plus grandes. L'effet d'échelle influence directement les principes de solutions, comme nous l'avons vu sur l'exemple des commutateurs opto-fluidiques.

Chapitre 2

Les techniques de fabrication des micro produits

Dans ce chapitre, nous allons brièvement passer en revue les différentes méthodes de fabrication des micro produits. Dans un premier temps, nous détaillerons les procédés issus d'une miniaturisation de procédés "macro classiques" c'est-à-dire, par exemple, les procédés par enlèvement de matière de type fraisage, tournage, etc. Ces procédés sont plutôt utilisés pour la fabrication de "micro pièces mécaniques" suivant notre taxonomie de produit du chapitre 1. Puis nous étudierons les techniques de l'industrie du silicium et des circuits intégrés. Nous verrons ensuite comment ces procédés ont évolué pour obtenir les procédés utilisés à l'heure actuelle dans le domaine des MEMS, avec notamment l'utilisation de la couche sacrificielle. Enfin nous apporterons des éléments sur les technologies d'encapsulation (ou *packaging*) et leurs conséquences sur le produit final.

2.1 La miniaturisation des procédés de "génie mécanique"

2.1.1 Micro usinage par enlèvement de matière

De nombreux fabricants d'outils proposent des forets ou bien des fraises de diamètres très faibles (jusqu'à $50\text{ }\mu\text{m}$ par exemple) et des broches pneumatiques permettant d'obtenir les très hautes fréquences de rotation correspondant aux vitesses de coupe conventionnelles tout en respectant un bon alignement pour ne pas briser l'outil (ref Hui et al. 00, Rahman et al 01). La figure 2.1 montre un exemple de miniaturisation pour des opérations de tournage, le cylindre obtenu est d'un diamètre de $56\text{ }\mu\text{m}$. La figure 2.2 présente des exemples de réalisation de formes complexes en fraisage, les moules réalisés sont de la taille d'une pièce de monnaie. (a) et (b) montrent respectivement la représentation 3D d'un modèleur ainsi que le moule final tandis que (c) montre une réalisation en forme complexe sur du verre, le "diamètre" du visage est de 1 mm et son état de surface (R_{max}) de l'ordre de 50 nm.

Pour des applications à but médical, il est commun de pouvoir usiner des canaux d'une centaine de microns de large dans des substrats en polymère ou en métal. Par la suite,

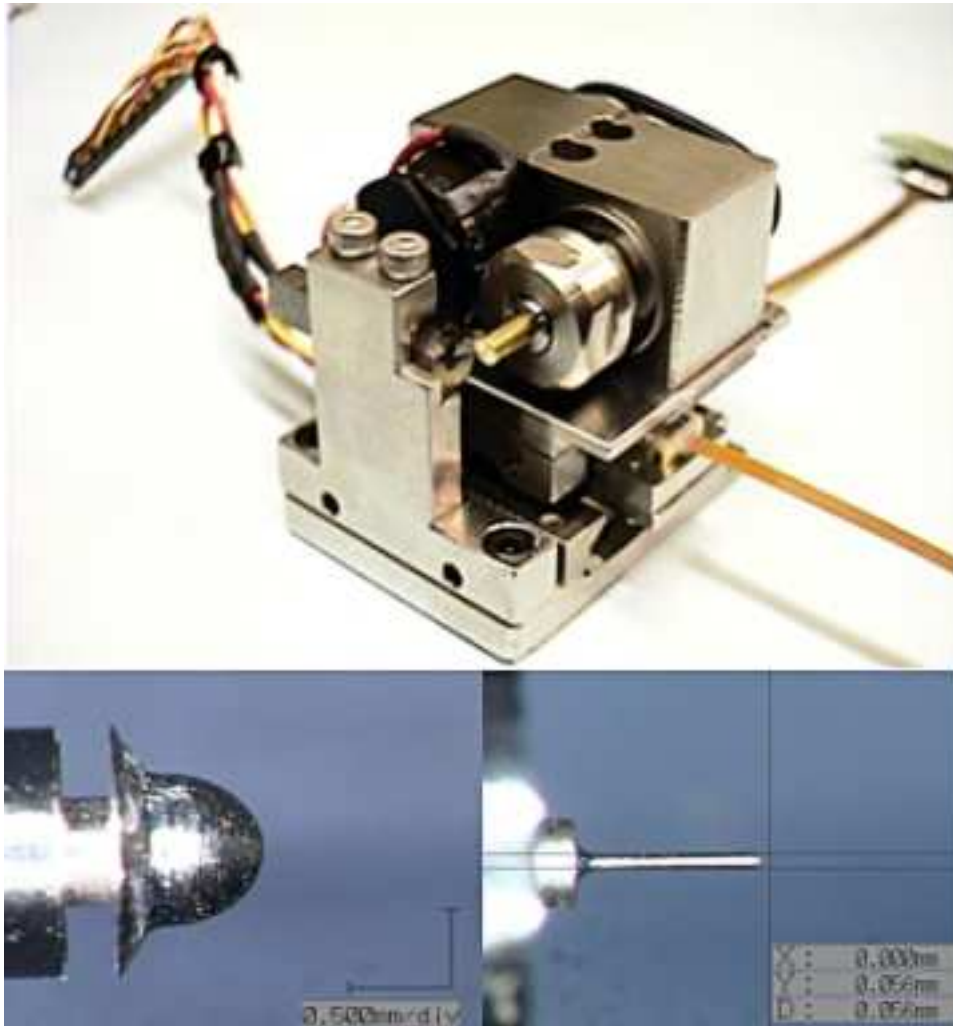


FIG. 2.1 – Exemple de réalisation avec un tour miniature, au Japon

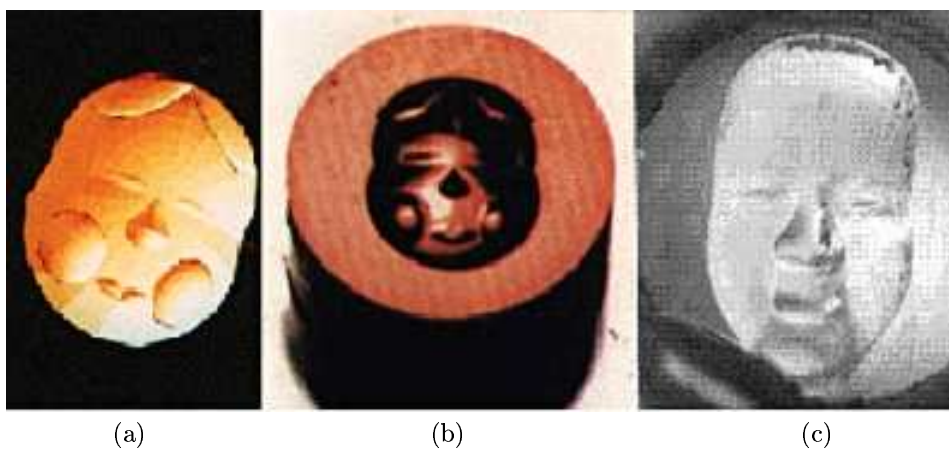


FIG. 2.2 – Exemple de réalisations en 3D formes complexes
(Source [TS96] pour (c))

on peut réaliser ainsi des moules pour de l'injection plastique. Les problèmes principaux sont l'attachement au démoulage ou bien l'obtention de bons états de surface. Cette technique est employée dans la production de plaques en plastique avec réservoirs et canaux pour des expériences de biologie par exemple.

L'attrait principal de ces technologies est de pouvoir réaliser à ces échelles des formes en vraie 3D. De plus, les propriétés électriques du matériau usiné n'influencent pas l'opération, on peut donc réaliser ces opérations aussi bien sur des métaux que sur des polymères ou du verre. Le silicium étant un matériau très fragile, il est cependant difficile de trouver des conditions de coupes acceptables, comme par exemple pour percer des trous d'attache dans les circuits intégrés. Ces technologies se situent dans le cadre d'une production plutôt unitaire, contrairement aux technologies de l'industrie du silicium (voir section 2.1.2) qui présentent l'avantage de la production de masse. De plus, l'intégration entre ces technologies n'est pas sûre : par exemple pour l'usinage des trous d'attache, les vibrations occasionnées par l'opération d'usinage peuvent endommager la partie électronique.

Un des problèmes les plus importants lorsque l'on parle d'usinage de coupe par enlèvement de matière est la bavure. A ces échelles, il est impossible d'appliquer les techniques habituelles d'ébavurage et il est donc nécessaire d'appliquer des stratégies d'usinage qui minimise la bavure. Dans le cadre du stage au laboratoire LMA de Berkeley (cf Annexe B), nous avons participé à diverses expériences d'usinage avec des forets et des fraises de tailles micrométriques. Le but de ces expériences était d'étudier les phénomènes de bavure dans le cas d'un matériau cristallin très ductile (le cuivre) et dont la taille des grains était de l'ordre de celle des outils [MLG⁺03]. Nous cherchions à voir s'il existait une influence sur la bavure au niveau des changements d'orientation cristallographique (i.e. aux joints de grains).

L'usinage par ultrasons a été adapté à ces échelles et convient bien pour les matériaux très fragiles tels que le silicium ou les céramiques. La géométrie obtenue est directement dépendante de celle de l'outil auquel on applique un mouvement de vibration qui est transmis à la surface de la pièce à usiner par l'intermédiaire d'abrasifs. Egashira et al. [EM99] décrivent ce type de procédé et montrent des résultats en perçage de trous avec des dimensions de l'ordre de $5\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre. Encore une fois, l'intégration de ces technologies avec les techniques CMOS n'est pas garantie.

L'usinage de surface par outils à pointe diamant est un autre procédé dans la gamme de l'usinage de précision. Au laboratoire LMA de Berkeley, des expériences ont été conduites sur des pièces en cuivre monocristallin et polycristallin (dans ce cas la taille des grains varient de 0.1 mm à 4 mm). Ces disques de cuivre sont usinés à l'aide d'un outil dont le rayon de bec est de $274\text{ }\mu\text{m}$, des états de surface de 20 nm en Ra ont été obtenus ([MLG⁺03] en annexe B). Pour ces procédés, la pièce obtenue est d'une précision micrométrique mais ses dimensions générales restent macrométriques, de l'ordre de grandeur d'un wafer.

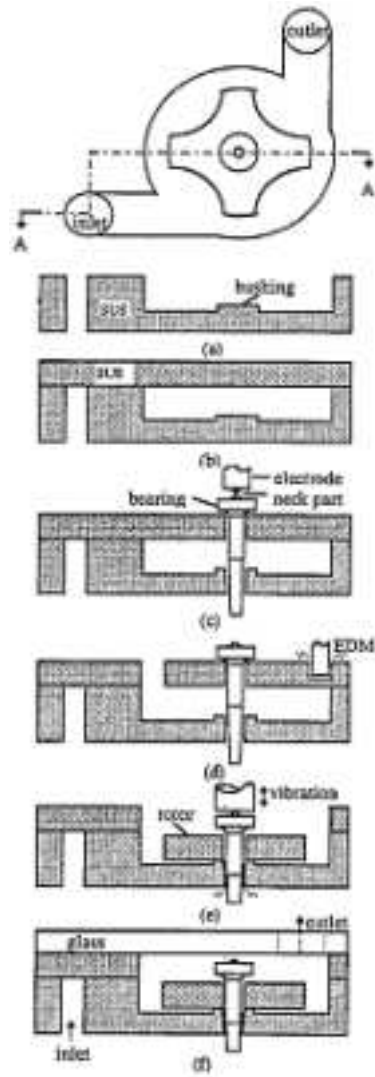


FIG. 2.3 – Exemple de réalisation par procédé électro-érosion et ultrasons
(Source [SMF96])

2.1.2 Procédés thermiques ou de réplcation

Un des procédés thermiques les plus connus est l'usinage par laser. Les procédés utilisant les lasers sont de deux types : enlèvement de matière ou soudage. Dans les deux cas, les principales caractéristiques du laser à contrôler et à choisir afin de pouvoir appliquer le procédé aux micro technologies sont :

- la longueur d'onde (la précision du motif obtenu est directement dépendante de la longueur d'onde, plus elle est petite plus le motif obtenu est précis)
- la puissance
- la durée de la pulsation
- la fréquence de pulsation

Des structures avec des dimensions inférieures au micron ont été créées par Bullema et al. [Ba02].

L'électro-érosion a été adaptée avec succès aux échelles microscopiques mais ne peut s'appliquer que pour des matériaux conducteurs. Deux électrodes (une est l'outil, l'autre la pièce à usiner) sont plongées dans un liquide diélectrique et une tension est appliquée. Ce procédé est très lent mais la dureté du matériau n'est pas une contrainte et les structures obtenues (qui vont de canaux, trous et colonnes à des structures complexes en 3D [Mas00]) ne présentent pas de bavures. Sun et al. [SMF96] montrent l'utilisation des procédés d'électro-érosion combinés à des procédés de soudure par vibrations ultrasoniques pour la réalisation d'une micro turbine à air (cf figure 2.3).

Dans le domaine des procédés de mise en forme ou de réplication, on trouve la mise en forme par déformation plastique et l'injection de polymères. Dans le cas de la mise en forme par déformation plastique, il est difficile de transférer la base de connaissances sur les procédés et les matériaux à l'échelle microscopique.

La ductilité, les champs de contraintes, les anisotropies sont dépendants de la structure cristallographique des matériaux et celle-ci est maintenant de dimensions proches de celles de la pièce obtenue. Pour certains matériaux, les déformations auront lieu aussi bien aux frontières entre les grains que dans les grains eux-mêmes [EE00]. Des trous de diamètre $50\text{ }\mu\text{m}$ ont été réalisés par poinçonnage. Les applications sont nombreuses : canon à électrons des tubes cathodiques des postes de télévision couleurs, trous d'admission d'essence dans certains types de moteurs, etc. [Ga01]. Un des problèmes principaux est le positionnement avec précision et rapidité (afin de ne pas perdre les avantages de la production de masse de ces procédés dont l'outillage est un investissement coûteux) de lopins de métal de quelques milligrammes. Par exemple, des vis sont réalisées par ces procédés à partir d'un fil de 0.8 mm de diamètre [Ga01]. L'autre difficulté est l'obtention des outils qui requièrent aussi des dimensions micrométriques et donc sont fabriqués avec les technologies décrites précédemment.

Pour l'injection des polymères, ceux-ci sont chauffés et fondus puis envoyés dans le moule sous pression. Le moule est d'une température inférieure à celle du polymère qui se solidifie, toujours sous pression, avant d'être éjecté du moule. Le processus doit être modifié pour permettre la production de micro pièces, notamment au niveau des températures. En effet, pour des faibles dimensions (de l'ordre du micron par exemple), la comparaison entre l'énergie à fournir pour chauffer un volume et l'énergie dissipée par le contact entre la pièce et le moule (effet surfacique) apporte des contraintes géométriques fortes. Il s'agit là encore d'un effet d'échelle. La difficulté majeure vient de l'obtention du moule qui doit être réalisé avec les techniques de micro fabrication présentées précédemment ou bien en utilisant la technique LIGA (cf section 2.4). On reporte l'injection de métaux et céramiques avec des détails géométriques de l'ordre de $10\text{ à }50\text{ }\mu\text{m}$ dans [Pa00].

2.2 Les techniques de production issues de l'industrie du silicium VLSI

On peut classer les étapes de fabrication issues de la micro électronique sur silicium en trois catégories : les techniques additives (dépôts de couches minces, épitaxie...), les techniques sélectives ou de transfert de motifs telles que la photolithographie et les techniques soustractives de gravure. Il entre complètement dans le cahier des charges des

produits MEMS d'être réalisés avec des méthodes de fabrication compatibles avec cet ensemble de technologies.

Une autre technique très utilisée en micro électronique est le dopage ionique qui consiste à insérer des ions "parasites" dans la structure cristalline de silicium afin de créer des carences ou des surpopulations ioniques et obtenir du silicium dopé n ou dopé p, base de la technologie des semiconducteurs et des transistors CMOS. L'étape d'implantation de la source et du drain dans la figure 2.4 est une étape de dopage, il s'agit d'un travail dans le coeur même du wafer. Cette technique ne sert que peu dans le cas des microsystèmes (sans parler de la réalisation de la partie électronique) mais on peut parfois utiliser une couche dopée comme arrêt de gravure (cf section 2.3.1).

2.2.1 Dépôts de couches minces

De nombreux procédés de micro usinage sont basés sur la technologie du dépôt de couches "minces". Elles consistent à déposer des couches de différents matériaux les unes sur les autres depuis un gaz, un plasma, une solution aqueuse ou un état solide. On peut déposer des métaux, du polysilicium, des oxydes et nitrures de silicium, des polymères, etc. Les épaisseurs de couches obtenues et leurs caractéristiques (électrique, piézoélectrique, mécanique en terme de contraintes résiduelles...) sont très dépendantes des procédés utilisés : PVD ¹, CVD ², *sputtering* ³, oxydation, etc. Ces procédés dépendent de paramètres tels que la température, l'inclinaison du wafer et sa topologie et la composition de l'atmosphère dans la machine. On adjoint souvent une étape de traitement thermique après la déposition pour obtenir les caractéristiques désirées.

Les propriétés attendues des films minces sont les suivantes :

- adhésion (avec la couche précédente et/ou la suivante),
- contraintes internes (il est important de connaître l'état des contraintes dans le matériau pour des phénomènes de flambement, d'arrachement...),
- résistance à la rupture, à l'arrachement, dans le temps.

L'état des contraintes dans la couche déposée a une très grande importance aussi bien dans le cas d'une structure micro électronique (certaines propriétés électriques sont dépendantes des contraintes mécaniques) que dans le cas d'une structure MEMS (surtout lors de la gravure de la couche sacrificielle). Pour mesurer l'état de tension ou de compression d'une couche, on utilise des structures de test appelées jauges verniers (cf figure 2.5).

Les épaisseurs déposées varient de quelques centaines d'angstroms à quelques microns selon les procédés. La géométrie et la topologie sur lesquelles le dépôt est réalisé sont importantes et il existe deux types de dépôt : conformes et non conformes. Un dépôt conforme, ou uniforme, suit la topologie des couches précédentes et la couche obtenue est d'épaisseur constante dans le plan du wafer ou sur les parois verticales.

¹PVD = Physical Vapor Deposition

²CVD = Chemical Vapor Deposition

³de l'anglais *to sputter*, crachotter

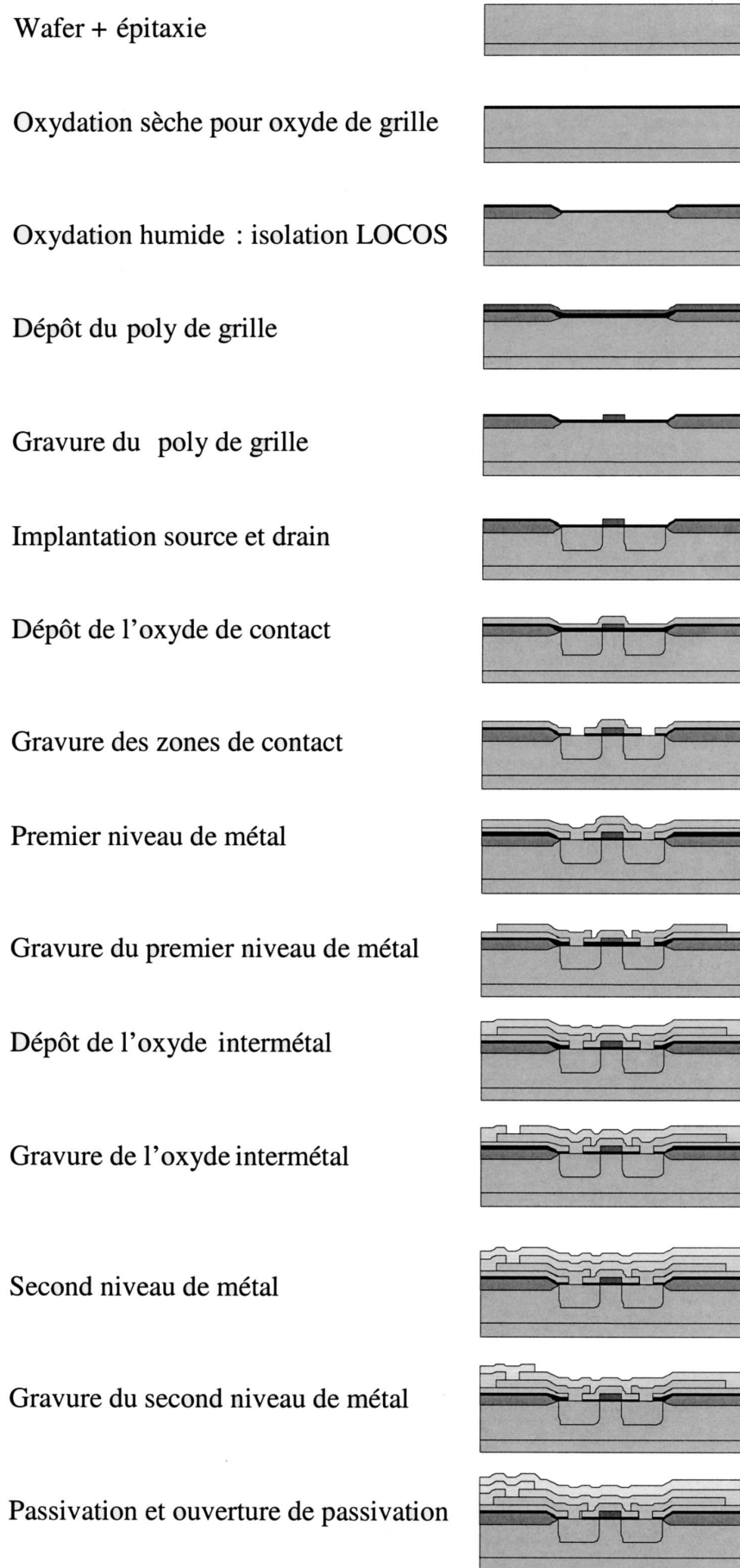


FIG. 2.4 – Flux de fabrication CMOS d'un transistor sur deux niveaux de métallisation
(Source [Cha01])

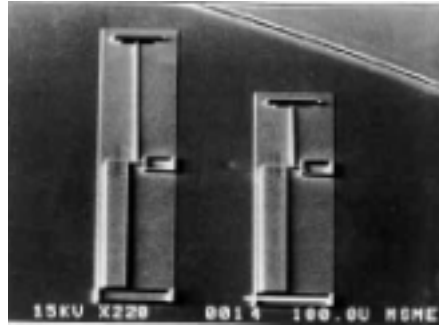


FIG. 2.5 – Photographie MEB de structures de test de contrainte

L'épitaxie est une méthode utilisée pour obtenir une couche de matériau identique à celle sur lequel on fait agir le procédé. Ce n'est pas à proprement parler une étape de déposition mais un procédé additif tout de même. La couche d'accroche (appelée *seed*⁴) sert à donner l'orientation cristallographique sur lequel le matériau va se baser pour "croître".

2.2.2 La photolithographie

Le principal processus utilisé pour créer des motifs sur la surface du wafer est la photolithographie. Etymologiquement, "photolithographie" signifie écrire sur de la roche avec de la lumière. Ce procédé, similaire à la photographie argentique, permet de sélectionner certaines parties du wafer pour y appliquer des opérations additives ou soustractives.

La suite typique des opérations est la suivante :

- nettoyage du wafer,
- dépôt de la couche barrière,
- dépôt de la résine photorésistante,
- passage au four basse température,
- alignement des masques,
- exposition du motif,
- développement de la résine,
- passage au four haute température pour améliorer l'adhésion,
- gravure,
- enlèvement de la couche photorésistante par bain chimique.

L'étape de gravure ne fait pas réellement partie de la photolithographie et on peut lui substituer un dépôt de couche mince, un dopage ou une épitaxie par exemple. Il existe deux types de résine : positive ou négative. L'une donne un motif semblable à celui du masque, l'autre donne le motif complémentaire.

Tout ce procédé long et complexe doit être réalisé dans une atmosphère très propre car la moindre particule de poussière peut produire des défauts sur le wafer. L'alignement des masques est également très important. Le masque doit être aussi relativement proche de la surface pour éviter des problèmes de diffraction. Le ratio est 1 : 1 dans le cas d'une lithographie en contact, mais des systèmes optiques permettent d'obtenir des masques plus précis ou des dimensions plus réduites. Dans ce sens, la lumière utilisée

⁴seed = graine

donne la précision et la résolution suivant sa longueur d'onde, c'est souvent une lumière ultraviolette à haute densité.

Les séquences de fabrication dans ces procédés requièrent souvent un grand nombre de masques de lithographie et ces masques doivent être alignés les uns avec les autres. Pour cela, la technique des croix d'alignement a été mise au point, c'est devenu un standard universel. Lors de la toute première étape de fabrication, des croix sont gravées dans le substrat à un endroit où elles n'interfèrent pas avec les puces fabriquées et ces croix servent de repères pour toutes les autres étapes. Ainsi, la remise en position du wafer d'une machine à l'autre, voire d'une entreprise à l'autre est assurée. Ce qui est d'une grande utilité dans le cas des fonderies multi-utilisateurs.

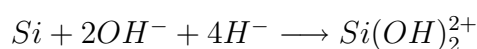
2.2.3 Gravure chimique

Le terme générique pour les procédés d'enlèvement sélectifs de matériaux est gravure ou *etching*. Toute leur subtilité repose sur la sélectivité c'est-à-dire la rapidité différentielle suivant laquelle sont attaqués chimiquement les différents matériaux. Ainsi, on peut enlever de manière sélective par l'intermédiaire des masques en résine obtenus pendant l'étape de photolithographie du silicium, ou bien des films précédemment déposés afin d'en faire un nouveau masque pour une autre opération de gravure et obtenir des empilements complexes en multipliant les couches et les opérations.

Il existe deux grandes familles de gravure : humide ou sèche (dans un plasma) et pour chacune, isotrope ou anisotrope. La solution la plus rapide (et aussi la moins coûteuse) est la gravure humide où les wafers sont plongés dans une solution chimique aqueuse mais les formes obtenues sont moins maîtrisables... En revanche, pour la gravure plasma, un plus petit nombre de wafers sont placés dans un plasma basse pression de gaz réactifs et les formes obtenues sont plus facilement utilisables d'un point de vue conception car perpendiculaires à la surface.

La gravure peut être effectuée en face avant (terme souvent adjoint du vocable "compatible CMOS"⁵) car on réalise la gravure du côté où le wafer a déjà subi des étapes de fabrication pour ses fonctions de microélectronique) ou bien en face arrière de wafer comme il sera expliqué dans la section 2.2.3, afin de libérer des structures lors d'opérations d'usinage en volume.

Une des gravures les plus utilisées dans les procédés de fabrication pour MEMS est la gravure anisotrope standard avec des solutions de type KOH ⁶ ou TMAH ⁷. C'est une opération à base de réaction chimique en phase liquide entre le wafer et la solution, on a oxydation du silicium en silicate qui réagit ensuite avec les hydroxydes pour former un complexe soluble dans l'eau :



⁵CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductors

⁶KOH = hydroxide de potassium

⁷TMAH = hydroxide de tétra-méthyle ammonium

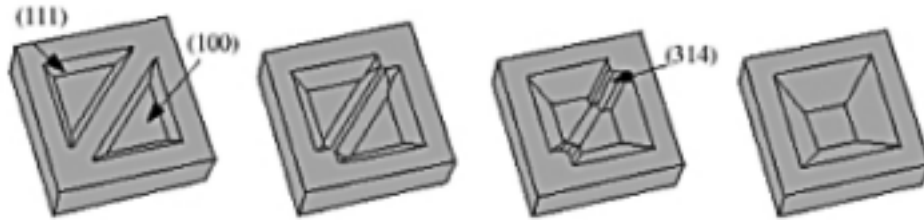
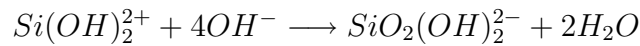


FIG. 2.6 – Avancées relatives d'une gravure anisotrope à partir d'ouvertures triangulaires (Source [Cha01])



La rapidité de la réaction est très dépendante de l'orientation des cristaux de silicium. La vitesse de gravure (exprimée en $\mu m.mn^{-1}$) varie selon l'orientation cristallographique des surfaces de contact, par exemple les faces (111) (selon les indices de Miller) ont des vitesses de gravure 600 fois inférieures aux faces d'orientation (110) et 400 fois inférieures aux faces d'orientation (100) comme on le voit sur la figure 2.6. Les phénomènes d'anisotropie lors de la gravure sont de nature très complexe, de nombreuses publications traitent de ce sujet comme par exemple [Bea78].

Le KOH présente de bons ratios d'anisotropie mais manque de sélectivité par rapport à des matériaux comme l'aluminium. De plus, les ions potassiums sont extrêmement polluants pour les technologies CMOS ce qui ne fait pas de lui le candidat idéal pour une parfaite intégration des technologies. Quant au TMAH, il est de nature organique et peu stable, donc difficile d'emploi. Mais sa bonne compatibilité CMOS et sa relative sélectivité par rapport à l'aluminium font qu'il est couramment utilisé dans le cas des MEMS.

2.3 Des processus spécifiques aux MEMS

2.3.1 Les usinages en volume, face avant et face arrière

On appelle ces gravures des usinage en volume car ils créent des cavité dans la structure du substrat de silicium, sous les couches précédemment déposées.

L'avantage principal de la gravure anisotrope compatible CMOS est que l'on peut obtenir relativement aisément des cavités et des structures suspendues sans utiliser un grand nombre de masques de lithographie (un seul suffit théoriquement d'ailleurs, on peut aussi faire en sorte d'utiliser une sélection déjà faite lors d'une étape précédente). Il suffit de laisser le substrat "à nu" afin d'opérer une gravure anisotrope. Ces structures peuvent être suspendues "au dessus d'un fond" ou bien si l'on laisse la gravure se faire assez longtemps, on peut traverser le wafer. On peut également faire se rejoindre une gravure face avant et une gravure face arrière pour obtenir des masses suspendues par exemple dans le cas des capteurs inertiels de type accéléromètres (voir chapitre 1).

Le micro usinage en face arrière nécessite la réalisation d'une étape de lithographie afin de créer le masque nécessaire à la sélection de la zone à graver. Cette lithographie doit

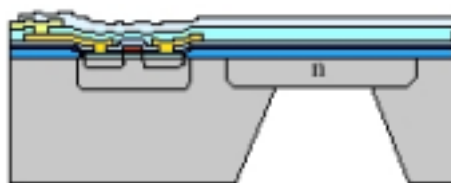


FIG. 2.7 – Coupe d'une structure suspendue
(Source [Cha01])

faire l'objet d'un alignement avec la face avant ce qui pose des problèmes de précision et nécessite l'emploi d'un aligneur double-face. Cette technique est très employée pour les applications de type capteur de pression en réalisant une membrane fine qui sera instrumentée grâce au travail sur la face avant.

Pour certaines applications, il est nécessaire de réaliser un usinage aussi bien en face avant qu'en face arrière. Cela permet par exemple de diminuer le temps de gravure nécessaire pour traverser le wafer et obtenir des formes suspendues plus petites.

Une technique pour contrôler la gravure chimique lors des étapes de création de cavité est le dopage n. En dopant certaines zones de silicium, on obtient une couche d'arrêt de gravure qui peut être utilisée pour protéger des parties déjà travaillées en microélectronique. La figure 2.7 montre une coupe d'une structure suspendue où l'arrêt s'est fait par le caisson polarisé n, on remarque les pentes dans le substrat dues à la gravure anisotrope.

2.3.2 Le micro usinage de surface, l'utilisation des couches sacrificielles

Dans le cas du micro usinage de surface, le substrat de silicium n'est pas attaqué. Les structures sont basées sur un empilement de couches structurales de polysilicium et de couches d'oxydes, appelées couches sacrificielles.

La principale technique spécifique à la fabrication des MEMS est celle de la couche sacrificielle. Le principe est d'utiliser une couche d'oxyde (SiO_2 ou autre) comme support lors du dépôt de couches structurales de polysilicium et ensuite de la faire disparaître par gravure lors de la libération (ou *release step*) afin d'obtenir des cavités ou des parties mobiles. À l'aide de ce procédé, on peut réaliser par exemple des charnières de type agrafe avec des parties réellement mobiles et plus simplement des déformations de poutres/ressorts. On voit le principe de ces charnières sur la figure 5.3. Les limites de ce type de procédé sont principalement la "fausse 3D" ou "2D 1/2" et les problèmes de capillarité [dBM01]. Les forces de capillarité ont tendance à faire coller les couches entre elles lors de l'étape d'enlèvement de la couche sacrificielle. Des solutions ont été trouvées pour répondre à ce problème avec l'utilisation de couches hydrophobes ou bien en utilisant une atmosphère de fluide supercritique pour passer doucement de l'état liquide à l'état gazeux si le budget thermique le permet. On préférera utiliser une gravure sèche.

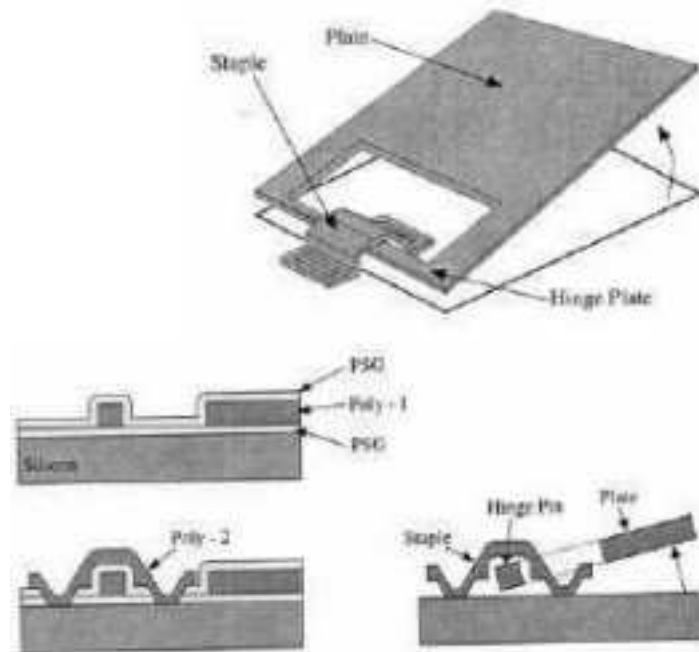


FIG. 2.8 – Réalisation d'une charnière avec le procédé MUMPS

Ces procédés sont cependant incompatibles avec les procédés standards de la microélectronique, les wafers possédant une partie électronique ne peuvent parfois pas être traités en post-process. La raison est principalement thermique, les couches structurales de polysilicium sont déposées à des températures dépassant largement le budget thermique : les couches de métallisation supportent mal ces températures et les profils de dopage du silicium sont à même de changer selon la température. Pour remédier à cela, plusieurs techniques ont été développées :

- Les procédés intégrés : les structures suspendues sont réalisées durant le process de fabrication de la partie CMOS, ce qui impose un agencement de la géométrie, une compatibilité au niveau des masques (notamment pour que l'étape de gravure de la couche sacrificielle n'endommage pas la partie électronique) et des températures, les couches de polysilicium sont donc déposées avant les parties de métallisation mais celles-ci sont en nombre très limité.
- Les procédés avec partie électronique enterrée : cette solution développée dans les laboratoires Sandia (ainsi que par [GKS+98]) consiste à graver (à l'aide d'une gravure silicium anisotrope) des tranchées dans lesquelles seront fabriquées les structures suspendues, les parties électroniques seront réalisées par la suite à côté de ces tranchées pour enfin enlever les couches sacrificielles qui "bouchaient" les tranchées. Cette technique présente les avantages de protéger les structures en polysilicium avec les oxydes pendant les étapes de fabrication CMOS et de rendre les deux processus relativement indépendants (aux connections mécanique-électrique près).
- Les micro systèmes post-process : dans cette solution, les couches de polysilicium sont déposées en dernier sur une technologie CMOS. Pour cela, on remplace la mé-

tallisation par du tungstène par exemple, et on refait une métallisation d'aluminium sur les contacts pour finir. Mais cela présente le désavantage d'avoir à modifier le processus CMOS, des problèmes de contraintes résiduelles importantes dans le tungstène et le polysilicium apparaissent également.

2.4 D'autres procédés

Les deux technologies précédemment présentées sont caractéristiques des procédés MEMS mais la spécialisation par rapport aux procédés standards CMOS se trouve aussi dans des utilisations spécifiques de procédés standards. Que ce soit sous la forme d'une introduction de nouveaux matériaux (par exemple des matériaux piézoélectriques comme l'AlN voir l'annexe A) ou bien de paramètres différents en épaisseur ou précision [DM01]... l'essentiel est de rester compatible pour l'intégration avec les circuits CMOS inscrits dans le wafer et qui représentent toute la partie électronique de commande ou de traitement de l'information. La tendance va vers un recouvrement en terme de précision et de performance entre la miniaturisation des procédés classiques et les approches silicium. Mais le problème essentiel reste la capacité des deux procédés à cohabiter en termes de pollution, contamination, endommagement et production de masse.

Nous présentons maintenant certains procédés issus eux aussi de l'industrie du silicium et qui possèdent un intérêt particulier pour les MEMS, soit par leur utilisation adaptée soit par une translation de la microélectronique vers la miniaturisation des systèmes mécaniques.

Le CMP

Le CMP (*Chemical and Mechanical Polishing*, polissage chimico-mécanique) est la solution de planarisation la plus employée. Dans le cas des micro systèmes, cette étape sert principalement pour aplanir les couches sacrificielles. En effet, le dépôt des oxydes est dit conforme (cf section 2.1.2) donc il suit la topologie des couches précédentes et si le procédé global comprend un grand nombre d'étapes, le relief qui s'ensuit ainsi que les décalages peuvent produire des défauts ou des dysfonctionnements. On peut voir ce phénomène sur la figure 2.9. Les couches d'oxyde sont donc aplanies pour pouvoir déposer les couches structurales sur une surface plutôt plane. Dans certains cas, il n'est pas grave que les couches ne soient pas totalement planes, dans d'autres cas, où l'on doit avoir déplacement ou frottement d'une surface sur l'autre, elles deviennent fonctionnelles donc la planéité et l'état de surface sont importants.

Dans cette technologie, le wafer est poli par frottement dynamique contre une autre surface rugueuse (le *pad*) dans un bain chimique avec adjonction de particules abrasives. Le taux d'enlèvement de matière est relativement faible (moins de 100 nm/min) mais les résultats sont de l'ordre d'une planéité de moins de 1 nm sur l'ensemble du wafer. De plus, les oxydes aussi bien que les métaux et les polymères peuvent être planarisés avec le CMP. Le procédé est contrôlé par le débit du fluide chimique (le *slurry*), par la température et le pH de la solution, puis par les vitesses de rotation du *pad* et du wafer ainsi que par la pression appliquée entre les deux. Dans le cas des technologies SUMMiT

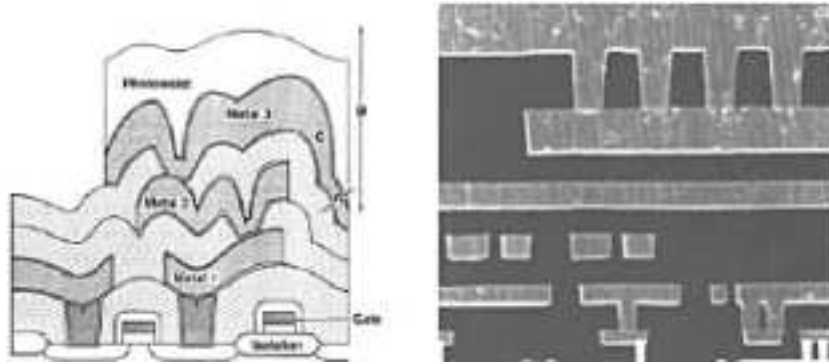


FIG. 2.9 – Les effets du procédé CMP

et SUMMiT V des laboratoires Sandia, l'étape de CMP est faite entre les dépôts de la couche sacrificielle et des polysiliciums structuraux. La couche d'oxyde utilisée comme couche sacrificielle suit la géométrie des couches précédentes, nécessitant la planarisation.

Lors du stage au laboratoire LMA de Berkeley, nous avons été amenés à travailler sur la conception d'une nouvelle machine CMP ainsi que sur un nouveau type de *pad* incluant les technologies MEMS pour obtenir un *pad* "intelligent" comportant détecteurs et actionneurs. (cf annexe B).

La technologie SOI

SOI signifie *Silicon on Insulator*. Dans cette technologie, le wafer en silicium monolithique est remplacé par un wafer en trois parties : une fine couche de silicium en surface (de quelques centaines d'angstroms à plusieurs microns), une couche de matériau isolant (typiquement une centaine d'angstroms) et le reste de substrat en silicium. Cette technologie apporte de meilleures performances en microélectronique : en haute fréquence, par rapport à la tenue aux radiations, en température. De plus la consommation est réduite par rapport aux technologies CMOS traditionnelles.

L'entreprise SOITEC de Crolles près de Grenoble propose une gamme de wafers SOI obtenus grâce à un procédé particulier.

Dans le domaine des MEMS, on peut tirer partie de cette technologie en utilisant la couche d'isolant (souvent l'oxyde SiO_2) comme couche sacrificielle. Cela permet d'obtenir des parties mobiles en silicium monocristalin. En effet, en effectuant une gravure anisotrope DRIE⁸ de la première couche de silicium monocristallin puis une gravure isotrope en phase aqueuse du SiO_2 , on libère les structures de la première couche comme le montre la figure 2.10.

Le LIGA

Le LIGA (pour *X-ray Litographie Galvanoformung Abformtechnik*) est un procédé d'origine allemande qui exploite la croissance électrolytique de métaux. On dépose une couche épaisse de résine photosensible (le plus souvent du PMMA⁹) que l'on expose à des rayons

⁸DRIE = Deep Reactive Ion Etching

⁹PMMA = poly(methylmethacrylate)

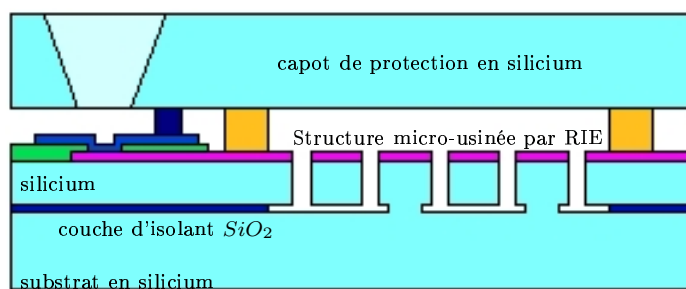


FIG. 2.10 – La technologie SOI adaptée aux MEMS
(Source : TRONIC'S Microsystems, France)

X ou à certains types d'UV. Le métal croît alors dans la cavité laissée par le développement de la résine, on a déposé au préalable une couche d'amorce (appelée *seed*) nécessaire pour le démarrage de la réaction. Une fois la résine nettoyée, on obtient des pièces ou des moules mécaniques. On voit sur la figure 2.11 le procédé respectivement pour fabriquer des pièces (à gauche) et des moules (à droite) ainsi que des exemples des deux.

Les caractéristiques des pièces obtenues sont les suivantes :

- ratio (50 à 500),
- rugosité des parois (inférieure à 1 nm),
- précision (inférieure au micron),
- hauteur maximale (de quelques centaines de microns jusqu'à 1 cm.)

On peut voir que, si le procédé ressemble beaucoup au couple photolithographie/dépôt de couches minces, les caractéristiques dimensionnelles en sont très éloignées. Le principal désavantage du procédé est qu'il est très coûteux dans la mesure où il faut fournir des rayons X haute densité et donc des méthodes alternatives telles que le DRIE ou les résines ultraviolettes ont vu le jour. Dans ces cas, les caractéristiques des pièces obtenues sont moins impressionnantes (notamment au niveau des ratio et de la précision).

Ce procédé s'inscrit dans le rang des procédés visant à la fabrication de micro parties mécaniques mais pas de MEMS car le procédé n'est pas compatible avec les techniques VLSI par exemple. Les bénéfices par rapport aux autres techniques de fabrication miniaturisées (cf chapitre 2) viennent du fait de la possibilité de production de masse sur wafer. En effet, la similitude avec la lithographie classique ainsi que la taille des pièces réalisées ouvre la porte au *batching* et, même s'il faut par la suite revenir à de l'assemblage quasi unitaire, les bénéfices de la production de masse restent accessibles.

2.5 Les techniques de packaging

Le *packaging* est un des aspects les plus importants du développement des micro systèmes. En effet, et en tout premier lieu, la taille des produits et le fait qu'ils agissent sur le monde extérieur (comme on a pu le voir sur les exemples du chapitre 1) qui n'est pas à leur échelle impose la présence d'une interface. Cette interface est primordiale dans le

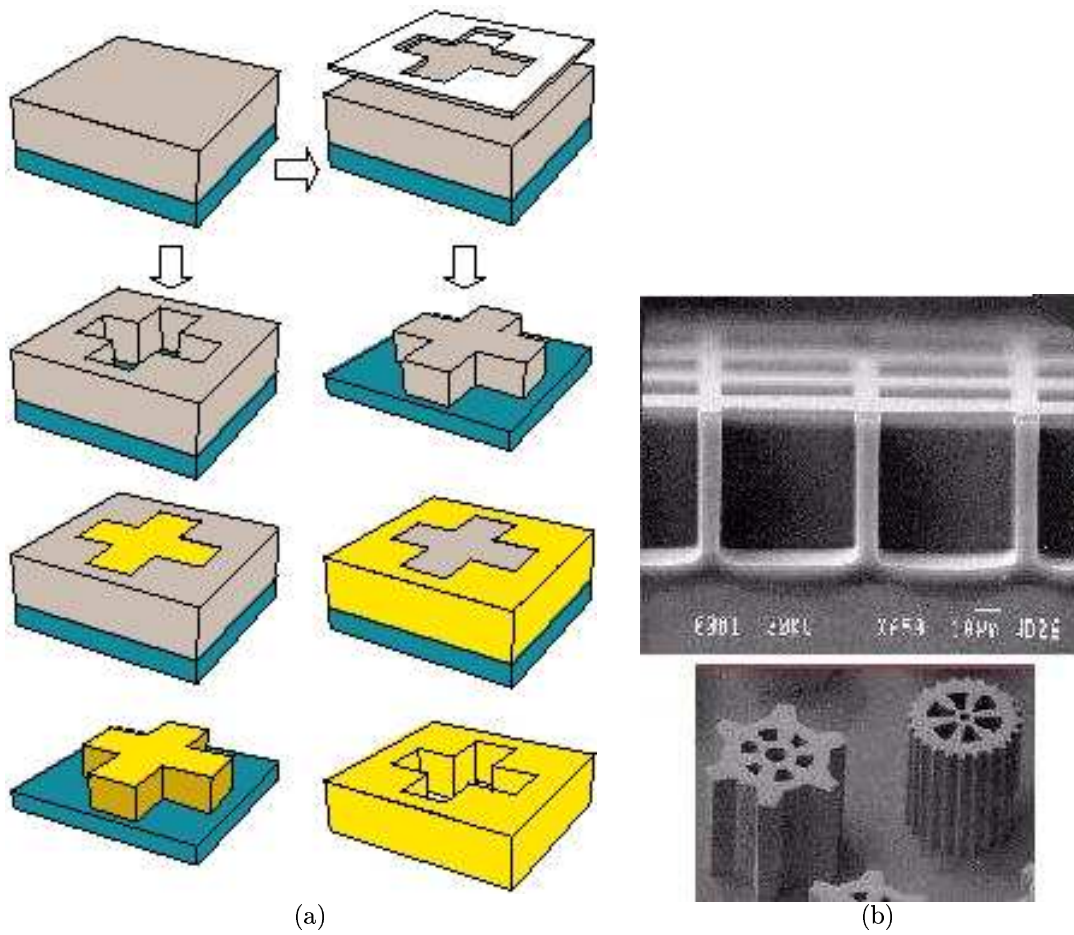


FIG. 2.11 – Procédé LIGA et exemple
 (a) croquis descriptif du procédé est tirée de [Cha01],
 (b) exemples de géométries obtenues

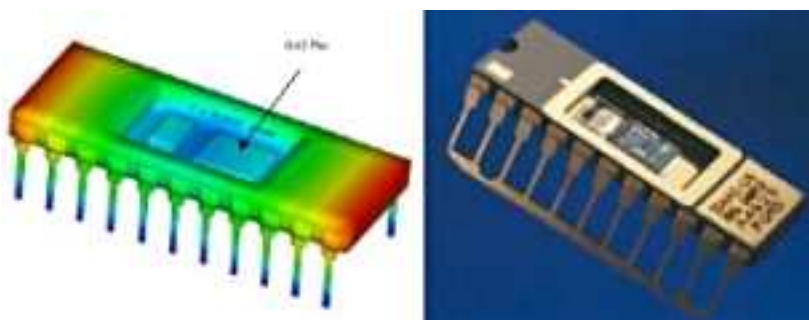


FIG. 2.12 – Une simulation thermique d'un microsystème encapsulé

cas d'un environnement de fonctionnement particulièrement agressif, cas des capteurs chimiques ou bien des applications spatiales.

Au niveau des fonctions d'une encapsulation, on trouve :

- Communication avec le monde extérieur,
- Protection du micro système,
- Favoriser la manipulation du système global,
- Evacuation de la chaleur (comme on peut le voir sur la figure 2.12).

Le *packaging* d'un micro produit est plus complexe que celui d'une puce classique car il est fonctionnel. Dans le cas d'un capteur, par exemple, il ne doit pas empêcher le produit de détecter son environnement mais bien favoriser cette fonction.

Les problèmes de couplage avec l'extérieur sont, avec la présence ou non d'une atmosphère "vide" un des aspects les plus délicats du *packaging*. Là encore, l'aspect multiphysique des interfaces rend la tâche du concepteur délicate. Pour pouvoir obtenir des performances acceptables, l'optimisation pour des utilisations spéciales est souvent choisie mais est très défavorable en terme de coût. L'utilisation de *packaging* standardisés, de la même façon que pour les micro processeurs dont le nombre de contacts et la taille de l'encapsulation sont identiques pour toute carte mère d'ordinateur, est une façon de réduire ces coûts [BBW98]. Dans le chapitre 1, nous avons montré que pour certaines applications le design général entre plusieurs utilisations est très similaire, on peut cependant difficilement étendre le raisonnement lorsqu'il s'agit d'interface. En effet, pour un même capteur de pression par exemple, l'environnement extérieur jouera un rôle prépondérant dans la conception à la fois du produit et de son *packaging*.

L'autre aspect important du *packaging* est au niveau des coûts. En effet, le *packaging* représente environ 85 % du prix total du produit car on sort de la production de masse pour retomber dans des étapes "unitaires". On peut facilement produire des milliers de MEMS par wafer mais il faudra tout de même les séparer et les encapsuler un par un dans leur petite boîte, puis réaliser l'opération de câblage entre le MEMS et sa boîte, opération délicate et très couteuse appelée *wire bonding*. Quant aux tests, ils sont eux aussi à plusieurs niveaux et participent à l'augmentation des coûts : tests électriques au niveau wafer, tests autres qui nécessitent des mises en situation, tests après découplage et tests après encapsulation.

Si on fait abstraction de l'assemblage classique (c'est-à-dire compléter un système d'une

échelle microscopique mais par assemblage de micro pièces mécaniques), il existe deux grandes classes de packaging : les SiP (System in Package) et les SoC (System on Chip).

2.5.1 System in Package

Le packaging *system in package* est aisément compréhensible si l'on s'imagine un système MEMS dans sa capsule comme un composant à "poser" sur la puce ou dans le système global.

- Interconnection au niveau de la puce (flip-chip [Eri00], wire bonding...)
- Peut inclure des composants passifs (condensateurs, inductances...)
- Peut inclure une ou des puces, une ou plusieurs structures MEMS
- Peut inclure d'autres éléments pour assurer le bon fonctionnement du système (batteries, antennes, bouclier RF...)

Les avantages du SiP sont bien entendu sa modularité et sa flexibilité [SK00]. Le positionnement des composants dans le système global est le paramètre le plus important à contrôler. Si on intègre de plus en plus de puces et de structures sur un même morceau de substrat, on finit par arriver au concept du System on Chip.

2.5.2 System on Chip

Le packaging *system on chip* pousse le concept d'intégration plus loin en proposant de fabriquer l'ensemble du système sur un même wafer. Les parties électroniques ainsi que les parties MEMS doivent être faites en utilisant des technologies compatibles. De la même façon que des modules RAM, ROM, DRAM... sont construits de manière monolithique sur ou dans la puce elle-même. Cette intégration poussée au maximum assure de bonnes performances au moins en termes économiques, car il n'y a pas d'opération d'assemblage, ou encore en termes de pertes qui seront réduites grâce à la proximité. Néanmoins, de nombreux problèmes technologiques restent à résoudre.

Le problème principal vient du fait de la non-compatibilité de certaines technologies notamment au niveau du budget thermique. Pour ne pas détériorer la partie électronique fabriquée dans le wafer lorsque l'on vient construire les structures MEMS on doit rester en dessous d'une certaine température (typiquement on doit rester en dessous de 400°C) ce qui impose de nouvelles contraintes dans le choix des procédés. En outre, certains matériaux sont "contaminants" c'est-à-dire qu'ils diffusent dans le silicium et peuvent donc si l'on ne prend pas de précautions (comme par exemple en insérant des couches de matériaux isolants) perturber le fonctionnement de la puce.

Dans l'ensemble, les coûts de développement pour un packaging SoC sont énormes et ne peuvent porter leurs fruits qu'à très long terme.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un descriptif des méthodes de fabrication de micro produits selon trois axes : la miniaturisation des processus mécaniques, les technologies de micro usinage intégré sur silicium et l'adaptation de certains procédés pour les applications spécifiques de micro systèmes. Cette analyse des procédés de fabrication nous permet de compléter les caractéristiques des micro produits que nous avons tirées de l'étude des exemples d'application.

Dans le cas des micro composants et des MEMS, la caractéristique fondamentale est l'utilisation obligatoire de certaines technologies VLSI. La compatibilité entre les fonctions électroniques et mécaniques passe par une utilisation adéquate des techniques issues et adaptées de l'industrie du silicium. Ces méthodes entrent donc directement dans le cahier des charges de ces produits. Cela implique une géométrie appelée 2 D 1/2, principalement plane car la dimension utile perpendiculaire au substrat se limite à quelques microns.

L'autre particularité de ces méthodes de fabrication est la possibilité d'assembler le produit avant de le fabriquer. Les techniques de gravure chimique, associées à celle de la couche sacrificielle, permettent d'obtenir des mouvements entre différentes parties du produit sans avoir à recourir à une opération d'assemblage. Ces opérations sont délicates à mettre en oeuvre à ces échelles et très coûteuses car elles font perdre le bénéfice de la production de masse. Elles sont en quelque sorte réalisées lors de la conception du produit, on considère que le produit est fabriqué déjà assemblé.

Conclusion : une caractérisation des MEMS

Les analyses consécutives des applications et des méthodes de fabrication nous ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques des micro produits. Pour la suite de cette thèse, notre attention s'est portée plus particulièrement sur les micro systèmes électromécaniques (MEMS). Nous en proposons ici une caractérisation en huit points que nous jugeons fondamentaux, à la fois d'un point de vue du produit, mais aussi pour comprendre les particularités de leur processus de conception, objet de la deuxième partie de ce manuscrit.

Un micro système électro mécanique présente les caractéristiques suivantes :

- Des dimensions micrométriques,
- Une fabrication par les technologies issues de l'industrie VLSI,
- Une géométrie plane,
- Des formes simples,
- Du mouvement entre différentes parties,
- Des aspects multiphysiques peu découplables,
- Un assemblage avant fabrication,
- Des principes de solutions conditionnés par les dimensions,
- Un *packaging* complexe et fonctionnel.

Des dimensions micrométriques Les dimensions du produit, ou de son motif caractéristique, sont de l'ordre du micron. L'évolution se fait, par rapport aux systèmes mécaniques, dans la miniaturisation. Nous avons vu que dans le cas d'un micro système les dimensions totales dépassaient rarement le millimètre. Certains micro systèmes exploitent les possibilités de production de masse et, même si les dimensions "hors tout" sont de l'ordre du centimètre ou plus, le motif caractéristique reste microscopique en dimensions (comme par exemple dans le cas de micro miroirs pour systèmes de projection).

Une fabrication par les technologies issues de l'industrie VLSI Nous avons vu que la compatibilité mécanique et électronique était un élément fondamental des MEMS et que cela contraignait fortement le panel de choix en terme de méthodes de fabrication. En effet, les principales technologies utilisées pour la fabrication des MEMS sont le dépôt de couches minces, la lithographie et la gravure (ainsi que des procédés adaptés de ceux-ci). Cela assure une intégration électronique et mécanique locale et globale, mais cela

apporte aussi des contraintes de conception en terme de géométrie, choix de matériaux et principes de solutions.

Une géométrie plane L'utilisation des techniques de fabrication VLSI implique une géométrie plane : les dimensions dans le plan du substrat sont assez libres (avec une précision de quelques dixième de microns, due à la résolution de la lithographie), l'autre dimension, perpendiculaire au substrat ne dépasse pas les quelques microns. L'épaisseur maximale est donnée par celle du wafer de silicium, dans le cas par exemple d'une gravure face avant et face arrière pour libérer une masse suspendue, elle est de l'ordre de 500 μm .

Des formes simples Un autre aspect conditionné par les technologies VLSI est la relative simplicité des formes obtenues. Même dans le cas d'un produit MEMS complexe comme le résonateur, la géométrie est un assemblage de rectangle. Ces formes sont amenées à évoluer avec la complexité des micro systèmes qui commencent à inclure des formes circulaires, gauches. Nous verrons dans le chapitre 3.3 les raisons de l'inertie en matière de géométrie autorisée par la lithographie.

Des aspects multiphysiques peu découplables Outre l'intégration entre électronique et mécanique, domaines que nous avons vus très dépendants au travers de l'exemple de la capacité variable, chaque application se situe dans un domaine particulier qui amène de nombreuses contraintes de conception. Ces contraintes, associées à l'intégration des fonctions, font qu'il est difficile de découpler les effets physiques lors de la conception du produit.

Mouvement entre les différentes parties La principale évolution par rapport aux systèmes électroniques se situe à l'apparition de mouvement des parties du système les unes par rapport aux autres. Cela implique aussi l'importance de la troisième dimension, jusqu'alors la dimension perpendiculaire au substrat n'avait qu'une importance minime (au niveau des recouvrements de dépôts conformes ou non et au niveau des évacuations de chaleur).

La différence que nous avons évoquée entre micro partie mécanique et micro composants ou MEMS apparaît dans la façon dont ce mouvement est réalisé. Dans le cas d'un système constitué de micropièces mécaniques, les mouvements peuvent être plus complexes et ces systèmes sont souvent des miniaturisations de systèmes macro. En revanche, dans le cas des MEMS, les mouvements sont plus difficiles à obtenir, ils sont plus souvent réalisés par déformation de parties souples.

Un assemblage avant fabrication Le mouvement est une des caractéristiques de ces micro produits, nous avons vu qu'il était produit soit par déformation de pièces souples, soit par une libération totale de certaines pièces (comme dans le cas de la micro charnière). La technique utilisée pour la création de cavités ou la libération des structures est celle de la couche sacrificielle.

Cette technologie implique que les solutions sont conditionnées par un assemblage des différentes parties du produit "avant" la fabrication, donc cela contraint fortement la conception.

Des principes de solutions conditionnés par les dimensions Les effets d'échelle jouent sur les principes de solutions, ainsi par exemple, lorsqu'il faut faire pivoter une partie du système, la solution la plus utilisée est la déformation de poutres plutôt que les liaisons de type pivot. Par ailleurs, nous avons vu avec l'exemple du commutateur opto-fluidique que certaines applications ne peuvent fonctionner qu'à ces échelles.

Un *packaging* complexe et fonctionnel On voit arriver aussi une évolution dans le *packaging* : à ses fonctions de protection, transfert de chaleur et connections électriques sont adjointes d'autres fonctions d'interface avec le monde extérieur : capter des informations, agir sur celui-ci. Le *packaging* fait partie intégrante du système, avec des fonctionnalités "mécaniques" supplémentaires.

Deuxième partie

Caractérisation d'un processus de conception de micro produits

Introduction, les enjeux d'une meilleure compréhension de la conception.

L'objectif de cette partie est de caractériser le processus de conception des micro systèmes électromécanique. Cette caractérisation se fait par rapport aux processus de conception que l'on connaît dans les domaines de la mécanique et de l'électronique, elle se fait aussi par rapport à une réalité industrielle. Une fois le processus caractérisé, une analyse formelle mettra en évidence certains endroits où celui-ci ne nous semble pas fonctionner de manière optimale. Notre objectif est double à ce niveau : souligner des manques en terme de méthodes ou d'outils et proposer des solutions pour y remédier.

Pour mener à bien cette étude, nous avons fait deux principaux partis-pris, deux hypothèses :

- le produit est (le plus souvent) mixte entre l'électronique et la mécanique, c'est donc dans ces deux directions qu'il faudra axer nos analyses,
- une analyse d'un processus industriel réel de conception est nécessaire.

D'un point de vue méthodologique, cela nous a conduit à employer une approche ethnographique conjointement avec une analyse de la littérature scientifique dans les domaines de la mécanique, de la micro électronique et des MEMS.

Les enjeux industriels d'une meilleure compréhension. La véritable ambition de la recherche dans le domaine de la conception de produits est bien sûr économique. Le marché et la concurrence sont des éléments moteurs pour l'industrialisation de produits. Une bonne maîtrise, compréhension et instrumentation du processus de conception, mais aussi de tout le développement du produit, assure des bénéfices financiers à des entreprises compétitives. Cette maîtrise envisagée est classiquement triple : il s'agit de celle des coûts, des délais et de la qualité. On sait que la majeure partie des décisions prises très en amont de la conception sont celles qui ont la plus grande influence sur ce fameux triptyque, comme illustré sur la fig 2.13 adaptée de [Cla01]

En terme de coûts :

Cette figure classique montre bien que la maîtrise des coûts se fait en amont du processus de développement du produit, une fois celui-ci sur le marché la marge de manoeuvre est réduite, voire anéantie. Ce phénomène paradoxal est maintenant bien assimilé et admis, il donne une légitimité importante à la recherche sur les méthodes de conception. En effet, c'est bien durant les phases de conception que se jouent les caractéristiques économiques des produits : les concepteurs prennent des décisions capitales en terme économique à

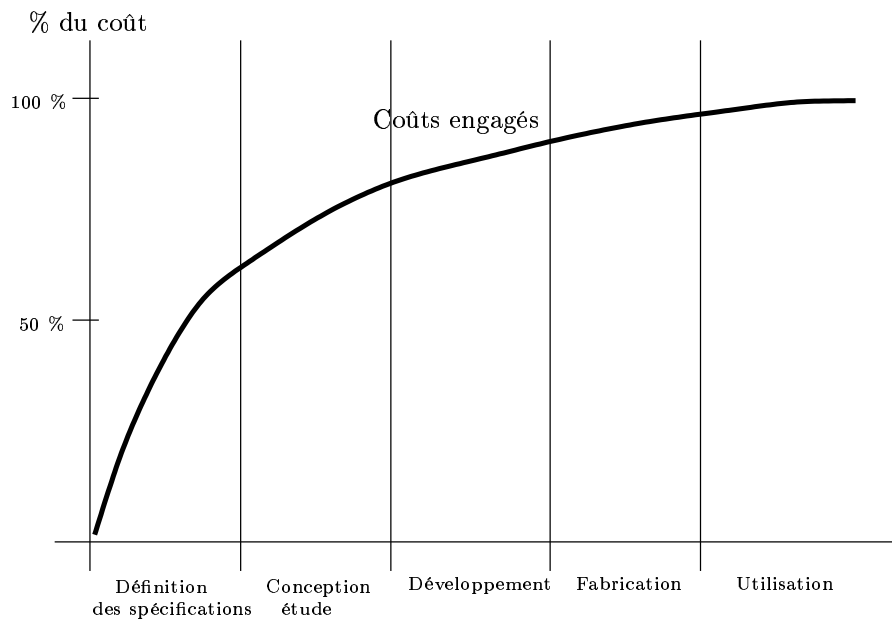


FIG. 2.13 – Les enjeux économiques durant le développement du produit

chaque choix de conception. Dans le domaine des MEMS, c'est l'intégration au plus tôt des différents domaines qui joue le plus sur les coûts. Tout l'intérêt économique de ces produits vient de la production de masse, avec plusieurs centaines de composants sur un wafer, tout retour à une manipulation unitaire après découpage (comme par exemple le *packaging*) fait perdre cet avantage. Cette intégration est primordiale et les décisions prises à ce niveau interviennent très en amont du processus de développement, de la même façon que sur la figure précédente.

En terme de délais :

La concurrence dans l'industrie, ainsi que les évolutions des besoins, sont tels que des produits avec des temps de mise sur le marché qui se chiffrent en années n'ont que peu de chances de réussir économiquement. Un véhicule automobile avait pour temps de développement une dizaine d'années dans les années 1970. Vers le début des années 2000, la barre était de 48 mois (selon Lanier, directeur de projet Renault [Blo99]). Dans le domaine des micro systèmes, il semble que l'on soit encore dans des chiffres de l'ordre de cinq ans pour des composants tels que les micro *switches* embarqués dans les satellites. L'émergence des technologies et le peu d'applications ayant passé le stade de la recherche et développement ne permettent cependant que des suppositions. On peut raisonnablement penser que, dans ce domaine, les produits doivent suivre le marché de la micro électronique plus que celui de l'automobile, raccourcissant encore les délais... Des outils et méthodes réduisant les délais sont donc capitaux pour un développement dans des temps acceptables, et surtout viables pour l'entreprise. De plus, les technologies évoluent dans une gamme de temps d'ordre de grandeur différent de celle du développement du produit.

En terme de qualité :

La qualité d'un produit peut être perçue comme sa capacité à répondre au mieux, en

terme de performances, à son cahier des charges (qui spécifie les fonctions attendues). Celui-ci doit être le plus fidèle possible aux besoins réels du client. De nombreuses méthodes ont été mises en place dans les entreprises pour assurer la qualité, les normes ISO en sont un exemple, la prise en compte de la fabricabilité en est un autre [Blo99]. Le manque de maturité des technologies MEMS fait que l'on manque d'information pour garantir la qualité des produits et notamment au niveau de leur durée de vie. Les connaissances de fabrication non stabilisées et la jeunesse du marché justifient amplement des études sur les méthodes.

Les phases de conception n'ont pas une incidence négligeable sur le produit final même si on ne travaille que sur des embryons de solutions. Dans cette optique, les premières recherches ont été dans le sens d'une maîtrise du triptyque coût/délais/qualité par la systématisation du processus de conception. Plus tard, la tendance a été à l'intégration au plus tôt de toutes les informations et contraintes de l'intégralité du cycle de vie du produit dans la conception : solutions conceptuelles répondant au cahier des charges fonctionnel, contraintes de fabrication (matériaux, obtention des bruts, usinage...), assemblage, mise sur le marché, maintenance, fin de vie (désassemblage, recyclage...). Des approches telles que le *concurrent engineering* ou la conception intégrée tentent de répondre à ces enjeux.

Dans quelles directions axer les recherches en méthodes de conception ? Selon Nigel Cross [Cro01], la conception n'est pas une science mais une discipline, et notamment une discipline de recherche. Pour bien comprendre l'activité de conception, on doit mener cette recherche selon trois axes : les hommes, les produits et les processus.

- Les hommes sont bien sûr les concepteurs, mais aussi les Hommes dans le sens où l'activité de conception d'un produit industriel partage de nombreux points communs avec d'autres activités créatrices, telles que les arts et d'autres activités de décision comme le management. On sait par ailleurs que l'Homme est habile pour la conception alors qu'*a priori* les animaux ou les machines ne le sont pas.
- Les produits, ensuite, car on ne ré-invente pas tout à chaque nouvelle conception. Le marché est surchargé de produits dans tous les domaines et la conception d'un nouveau produit passe par une évaluation/comparaison avec l'existant.
- Les processus, enfin, entendu que l'on se réfère à la méthodologie de conception. La complexification des produits et des systèmes à concevoir est telle qu'il est évident (et l'Histoire le prouve en permanence) que l'homme a besoin de structures, de méthodes et d'outils pour l'aider dans sa tâche.

Nigel Cross introduit sa propre taxonomie de recherche dans le domaine de la conception :

- *Design epistemology* : étude des connaissances en conception,
- *Design praxiology* : étude des pratiques et des méthodes de conception,
- *Design phenomenology* : étude des formes et configurations des artefacts.

Notre approche de l'étude du processus de conception a suivi elle aussi ces trois axes hommes/produits/méthodes, la première partie de ce document s'attachait plus particulièrement au produit et aux moyens de le fabriquer, nous allons maintenant nous atteler à la tâche de comprendre les méthodes et les hommes qui travaillent avec.

Une conception innovante ou un univers innovant pour une conception routinière? Devant le caractère émergent des technologies auxquelles nous nous intéressons, il apparaît important de se poser la question portant sur la pertinence de la distinction entre conception créative, innovante, ou routinière. Est-on dans une thématique d'innovation ou bien dans un cas de conception routinière, malgré l'aspect singulièrement innovant des technologies mises en jeu? Pour tenter de répondre à cette question nous allons d'abord regarder différents points de vue sur l'innovation.

Pour Longueville [Lon03], "une innovation est à la fois une organisation, un processus et un résultat. Le résultat est un produit commercialisé. Il est caractérisé par sa nouveauté relative au marché concerné et par le fait qu'il soit reconnu en tant qu'innovation par le client, i.e. que ce dernier lui accorde une valeur suffisante pour motiver son acte d'achat. Le processus est la démarche industrielle qui va conduire à la conception et à la réalisation de ce résultat. Cette démarche est supportée par une organisation composée de ressources (humaines et matérielles)".

Pour Legardeur [Leg01], l'innovation existe lors de la première rencontre économiquement positive entre une invention (i.e. une idée, un concept, une découverte...) et un client. Mais l'innovation n'est pas seulement représentative d'un produit ayant un succès économique, c'est aussi un processus avec des phases techniques, industrielles et commerciales. Dans ce sens, il est difficile de parler de conception innovante avant que le produit ne soit en vente.

Blanco [Bla98] différencie une conception innovante et routinière :

- la conception routinière s'appuie sur un système de règles, de conventions et de connaissances stables (à la fois sur le produit et sur le processus),
- l'innovation est faite d'incertitudes sur le produit, le processus et sur le réseau d'acteurs.

Au regard de ces définitions, on peut caractériser la conception de micro produits comme une "conception routinière dans un domaine de technologies innovantes". En effet, si les produits conçus sont résolument nouveaux et les connaissances utilisées en conception ne sont pas stabilisées (et ce surtout dans le domaine de la fabrication), le manque crucial d'exemples de mises en production réussies (à quelques exceptions près) ne permet pas d'affirmer que la conception de micro produits est une innovation. Elles n'en partagent pas moins un certain nombre de points, notamment les incertitudes soulevées par Blanco. De la même façon que l'on ne peut pas savoir si une allumette est bonne, tout au plus si elle était bonne, on peut dire qu'*a posteriori* si une conception était innovante.

Plan de la deuxième partie Dans un premier temps, nous allons décrire successivement notre vision des méthodes et modèles des processus de conception de systèmes mécaniques et microélectroniques. Les principes et approches régissant ces conceptions nous permettront de mieux comprendre le processus de conception des MEMS, à la charnière des deux domaines.

Nous analyserons ensuite les méthodes adaptées à la conception des MEMS en général,

ainsi que les outils d'aide à la conception existant dans ce domaine.

Puis, nous décrirons notre expérience industrielle dans l'entreprise STMicroelectronics de Crolles I et nous présenterons une caractérisation de l'équipe et du processus de conception des micro produits MEMS tels que nous les avons observés. Nous mettrons enfin en évidence des étapes de ce processus que nous jugeons non-optimales en terme de méthodes et d'outils. Nous proposerons deux idées d'instrumentation afin de répondre à ces manques.

Chapitre 3

La conception de MEMS

3.1 Approche mécanique ou électronique ?

Dans ce chapitre, nous développerons successivement des descriptions des flux et méthodes de conception de produits dans le domaine des produits manufacturés dits mécaniques, puis dans les domaines de la microélectronique intégrée sur puce de silicium appelée technologie VLSI (Very Large Scale Integrated-circuit, voire ULSI pour Ultra Large Scale Integrated-circuit).

En proposant une comparaison de ces deux domaines, très distincts en terme de produits mais aussi en terme de méthodes, nous espérons mieux appréhender la conception des micro systèmes MEMS, produits situés à la charnière entre les deux mondes.

3.1.1 Description d'un processus de conception mécanique

Qu'est-ce qu'un produit mécanique ?

Pour Prudhomme [Pru99] un système mécanique est "un ensemble de pièces mécaniques agencées pour fournir un effet attendu. Il peut être simple, par exemple une pince à linge (dont l'effet attendu par l'utilisateur est un pincement), ou plus complexe, par exemple une automobile (dont l'effet principal attendu par l'utilisateur est un transport de personnes ou de biens)." Il existe de moins en moins de systèmes spécifiquement mécaniques de nos jours. Dans la plupart des cas, on a plutôt des produits dits mécatroniques : avec des parties mécaniques, électroniques et des programmes informatiques. La partie mécanique est souvent réalisée par un assemblage de nombreux composants, qui se définissent à travers des formes et des fonctions, souvent les fonctions font apparaître des mouvements entre composants ou groupes de composants. La fonction décrit ce que le produit "fait" et la forme "comment il le fait". Il existe une adéquation complexe entre forme et fonction. Par exemple, un composant peut avoir plusieurs fonctions et une fonction peut requérir plusieurs composants. Ces systèmes sont principalement en trois dimensions et touchent à de nombreuses disciplines scientifiques. En effet, un moteur à explosion par exemple ne peut être considéré comme uniquement mécanique dans la mesure où les connaissances utilisées viennent aussi de la thermodynamique, la mécanique des fluides, etc. Ces disciplines apportent des contraintes que l'on ne peut pas

en général décorréler. De nos jours de surcroît, l'électronique est complètement intégrée dans les moteurs à travers capteurs, calculateurs et autres relais.

Un produit ou système mécanique est donc un assemblage de composants qui réalise une ou plusieurs fonctions, avec une réalité multiphysique, cinématique et tridimensionnelle marquée. Bien évidemment, il répond à un besoin exprimé par un client.

L'activité de conception, très grossièrement, consiste donc à transformer un besoin exprimé par un client en un produit réel sensé y répondre au mieux. Le besoin est souvent exprimé sous la forme, par exemple, d'un cahier des charges, notion très complexe. En effet, il peut présenter "les fonctions à assurer, les conditions de fonctionnement souhaitées, la durée de vie souhaitée, l'environnement, etc. [TJT93]". Nous allons tenter de comprendre mieux ce que veut dire concevoir un produit dit mécanique en suivant divers courants de pensée ainsi que la chronologie des méthodes.

Lors de sa conception, le produit, l'objet, n'a pas toujours une réalité physique mais on doit en avoir une représentation à tout moment. Pour cela, différents modes de représentation, plusieurs langages, existent : les mots, les représentations graphiques de différents niveaux de précision (schéma "maison", schéma cinématique, dessin industriel avec ses nombreuses règles de mise en plan, etc.), des équations analytiques ou encore les objets en trois dimensions réels ou virtuels (avec le maquettage numérique et le prototypage). Bien sûr, le produit lui-même dans sa réalité physique finale peut être considéré comme une représentation du besoin. Dans la plupart des cas cependant, le besoin initial du client est exprimé avec des mots tandis que le produit final est un objet physique, des étapes de traduction seront donc nécessaires et ses différentes descriptions seront parcelaires et insuffisantes.

On peut dire que le produit "émerge" en suivant un flot de maturation avec des changements de mode de représentation. L'émergence du produit final se produit dans un univers de contraintes appliquées de manière répétitive / itérative sur des produits potentiels, le produit progresse d'une représentation abstraite vers sa réalité physique finale.

L'activité de conception

Le concepteur est amené à réaliser une grande diversité d'actions pour assurer l'émergence du produit. Il est très difficile d'expliquer et de formaliser ce que "concevoir" veut dire. La conception passe par de multiples représentations, de multiples choix, décisions et aller-retours dans les solutions retenues, de multiples prises d'informations et apprentissages, des collaborations avec d'autres personnes... C'est un processus très complexe qui se déroule en grande partie dans la tête du concepteur, ainsi que dans ses relations avec les autres membres du projet.

Pourtant selon H.A. Simon, prix Nobel de Sciences Economiques en 1978, la conception peut être vue comme une résolution de problème. Simon cherchait à formaliser l'action

de conception afin d'y appliquer les méthodes de l'intelligence artificielle. Pour lui, le produit se construit dans le passage d'une situation insatisfaisante à une situation où il répond à cette insatisfaction, il y a un apport de solutions à des "problèmes", une expression d'un besoin [Sim73]. La progression du besoin initial vers le produit fini se fait à travers *la recherche et l'expression* des "problèmes", "buts" et "contraintes" et de leur *évaluation*. Pour Simon cependant, cela ne signifie pas pour autant que le problème et sa solution sont uniques et définis séquentiellement l'un après l'autre, ni qu'il existe une procédure définie pour passer de l'un à l'autre. Une décomposition en sous-problèmes (ou arborescence) permet de gérer la complexité.

Selon Ullman [Ull02] l'activité de conception peut se décomposer en un certain nombre de problèmes à résoudre à travers certaines activités :

- Sélection : par exemple lors de la conception d'une liaison pivot, le type d'éléments roulants ou glissants. . .
- Configuration : assemblage de différents éléments déjà conçus dans un système global.
- Paramétrage : trouver des valeurs pour les variables qui caractérisent le produit final.
- Problème de conception originale ou innovante.
- Autres types de problèmes de conception : implémentation de nouvelles technologies ou de nouvelles connaissances, re-conception. . .

Cette décomposition est ambiguë dans la mesure où les "activités" présentées ne sont pas toutes d'un même niveau de généralité. Par exemple, une activité de sélection de visserie pour un accouplement n'est pas du même niveau que la re-conception d'un système d'ouverture de lecteur CD-Rom... Néanmoins, elle permet de rendre compte de la variété des activités et des types de conception dans le domaine des produits mécaniques.

En revanche, certains auteurs considèrent comme incomplète cette notion de "résolution de problèmes" et notamment parce que le vocabulaire de "problème" et "solution" est éminemment polémique. Par exemple, le terme de "problème" pose la question de sa définition qui est loin d'être figée. La conception peut alors aussi être vue comme un processus d'apprentissage [Pru99]. En effet, le concepteur apprend beaucoup sur le produit qu'il conçoit, sur le problème et/ou le besoin auquel le produit répond en cours de conception, sur le processus conduit lors de cette conception et sur l'organisation industrielle dans laquelle émerge le produit.

En résumé, les principales difficultés de la conception de systèmes mécaniques sont donc : la variété des disciplines mises en jeu, la variété des types de problèmes de conception, le manque de séparation nette entre fonction et forme ainsi que le manque de décomposition claire, la variété de modes de représentation du produit, la géométrie en trois dimensions, l'aspect cognitif de l'activité, l'aspect collaboratif non formalisable.

Une approche systématique

Historiquement, la révolution industrielle et le taylorisme ont fait prendre conscience de l'intérêt de la conception dans les produits manufacturés et les premiers travaux de rationalisation de l'activité de conception sont apparus dans les années 50 avec l'école allemande du *structured design*. C'est alors qu'ont émergé les notions de cahier des

charges et de décomposition fonctionnelle. Pour tenter de mieux contrôler cette activité de conception et assurer l'adéquation en terme de performances avec le cahier des charges initial, certains travaux et notamment ceux de Pahl et Beitz [PB96] ont défini le processus comme une succession d'étapes (et de sous-étapes...). Ces étapes ou phases par lesquelles le concepteur (ou le produit, cela dépend si on raisonne en terme d'activités ou de flux de maturation) doit obligatoirement passer sont supposées garantir que le produit final répondra au mieux au besoin exprimé au début. C'est l'approche *top-down*¹ qui divise le processus de conception en sept grandes phases dès la fin des années 80 :

- 1. *Clarification and definition of task*
- 2. *Determination of functions and their structures*
- 3. *Search for solution principles and their structures*
- 4. *Arrangement in realisable modules*
- 5. *Embodiment of most important modules*
- 6. *Embodiment of entire product*
- 7. *Compilation of design and utilisation data*

Pour chaque étape, Pahl propose trois activités : clarifier le problème, identifier des solutions candidates, sélectionner la solution optimale. Ces activités sont basées sur des processus d'évaluation multi-critères quantitatifs sous contraintes et se rapprochent donc d'une philosophie de la conception comme résolution de problème. A chaque étape, il est aussi spécifié d'itérer les activités jusqu'à l'épuisement du temps ou des ressources, ou jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante. Il est intéressant de noter qu'à aucun moment les acteurs de la fabrication n'entrent en jeu, Pahl émet en effet l'hypothèse que les connaissances de fabrication sont disponibles aisément pour les concepteurs, la collaboration ou la coopération n'est pas supportée par l'approche *top-down*.

La figure 3.1 présente une version plus récente de la démarche de conception structurée, elle se décompose en cinq étapes :

- 1. *Clarification of the task*
- 2. *Concept generation*
- 3. *Embodiment design*
- 4. *Detail design*
- 5. *Physical evaluation*

On y voit apparaître les différentes étapes de "conceptualisation", *embodiment* et "conception détaillée" qui sont une des façons d'utiliser l'abstraction et l'arborescence afin de gérer la complexité des systèmes.

Cette succession d'étapes peut être sujette à un nombre important d'itérations (sur les étapes numérotées ou bien sur plusieurs étapes à la fois, ce qui implique une communication de données entre plusieurs acteurs de la conception...). C'est la séquentialité dans cette approche qui assure la maîtrise du temps (plutôt que l'optimisation des délais). C'est la raison pour laquelle on a fait évoluer la conception vers des modèles dits simultanés comme le *concurrent engineering*. Par ailleurs, le besoin initial n'est

¹Etymologiquement (depuis le dictionnaire Merriam-Webster) : 1 - controlled, directed, or instituted from the top level <a top-down corporate structure>

2 - proceeding by breaking large general aspects (as of a problem) into smaller more detailed constituents : working from the general to the specific <top-down programming> <top-down design>

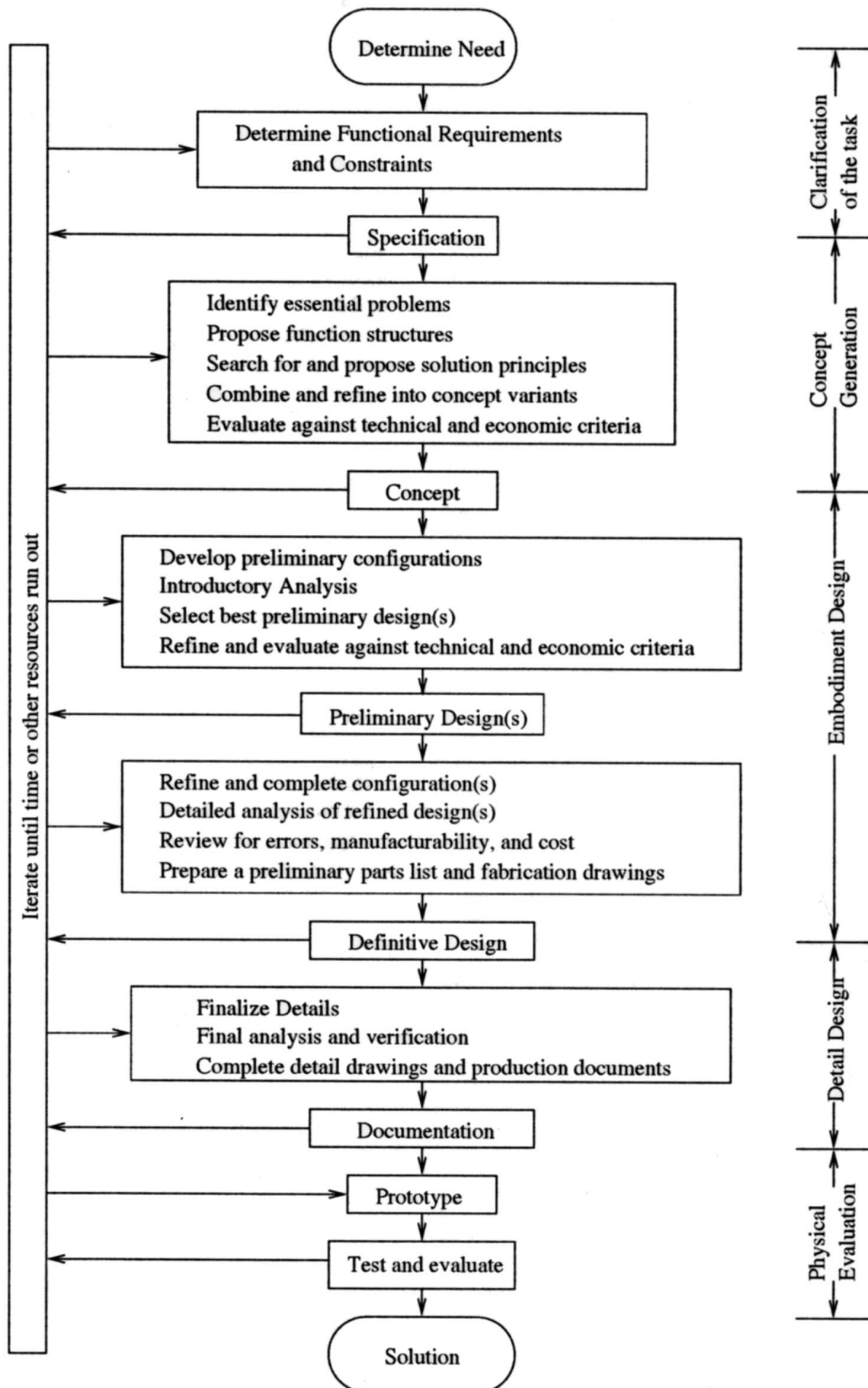


FIG. 3.1 – le processus top-down selon NFS
(Source [Ant95])

souvent pas le même une fois le produit fini car il a évolué tout au long du processus de conception. Mais la séquentialité du processus selon ces descriptions permet de fournir des méthodes prescriptives. Selon les prescriptions de l'approche *top-down*, chaque phase peut commencer alors qu'est achevée la précédente, les données d'entrée de l'une étant les données fournies en sortie de la précédente. On peut remarquer que les phases sont définies à l'avance, alors que, encore une fois, on ne connaît que très mal le problème initial.

L'approche *top-down* n'est pas entièrement satisfaisante comme modèle du processus de conception de systèmes complexes (qu'ils soient mécaniques ou non). L'aspect systématique très marqué pose entre autres le problème du temps de développement et notamment à cause de retours entre bureau d'étude et bureau des méthodes... Mais la politique économique de marché a évolué vers des délais de plus en plus courts, vers une demande en terme de variété de produits à moindre coûts. L'approche systématique ne fonctionne plus car il n'est plus suffisant de maîtriser, d'optimiser localement, il faut minimiser le temps global de développement du produit. De plus, l'hypothèse d'un problème (ou cahier des charges) défini *a priori* ne rend pas compte de la construction simultanée du problème de conception et de sa solution.

Une approche axiomatique

La poursuite dans la rationalisation conduit à une conception avec l'approche axiomatique de Suh [Suh90, Suh01]. La méthode axiomatique repose sur l'existence de quatre domaines indépendants : le domaine des besoins du client, le domaine des fonctions, le domaine des principes physiques et le domaine des procédés de fabrication. L'activité de conception est le passage au travers de ces domaines pour associer une solution technologie à un besoin du client. Le système global est une agrégation de ces solutions. Suh propose deux axiomes qui doivent être satisfaits pour chaque passage :

- maintenir l'indépendance des besoins fonctionnels,
- minimiser le contenu de l'information.

Une bonne conception respecte ces deux axiomes, elle aboutit alors à une indépendance entre les différents besoins et leurs solutions. Ainsi, une optimisation sur une partie de solutions n'a pas d'influence sur les autres parties. Encore une fois, l'hypothèse d'un problème de conception posé *a priori* est faite.

Les approches d'intégration des métiers, le *concurrent engineering*

L'approche séquentielle précédente est trop longue de par ses multiples itérations. Pour raccourcir les délais, augmenter encore la qualité, diminuer les coûts et considérer la totalité des aspects de la vie du produit dans sa conception, les travaux récents (une vingtaine d'années) vont dans le sens de l'ingénierie concourante. Il n'est en effet plus question que les acteurs du développement du produit travaillent de manière séparée ou séquentielle, le produit émerge de la collaboration, la confrontation des points de vue et la négociation. On doit se séparer de la vision classique *over the wall* où le bureau d'étude transmet ses plans au bureau des méthodes sans aucune concertation avec celui-ci.

L'ingénierie concourante cherche à "permettre l'expression de tous les points de vue au plus tôt, d'anticiper" [Mid97]. En ce sens, ce n'est pas une méthode de conception mais

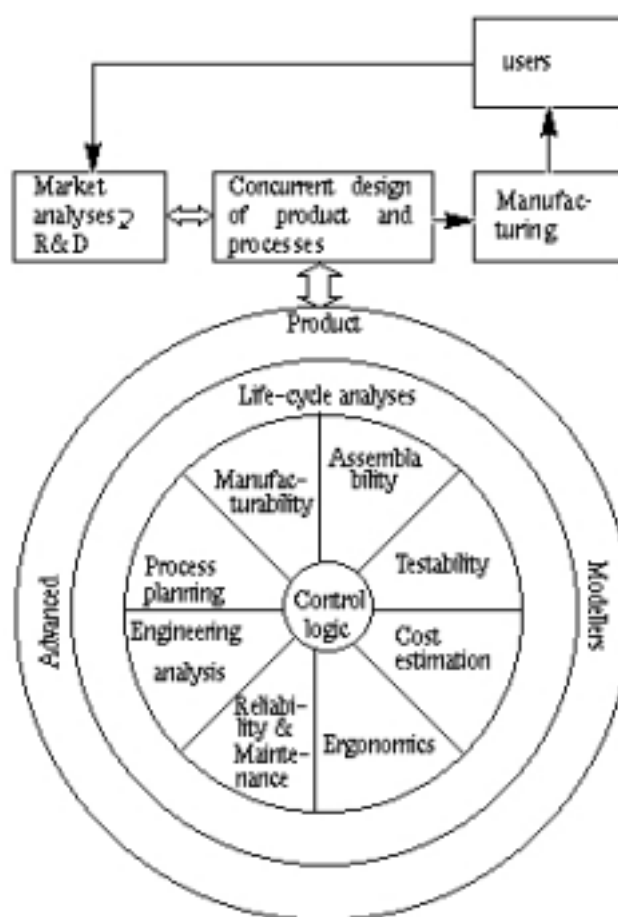


FIG. 3.2 – La roue du *concurrent engineering*
(Source [JPS93])

plutôt une philosophie, un concept. Ce concept de prise en compte en simultané de toutes (ou presque) les contraintes des métiers de la conception permet de réorganiser les phases précédemment décrites sous forme d'un déroulement en parallèle. Tous les éléments du cycle de vie du produit doivent être pris en compte durant toutes les étapes du processus de conception [KF94, AL95, LOZB03]. Cette évolution fait que chaque acteur du processus de développement du produit est un concepteur à part entière, avec le même statut. Les équipes de concepteurs remplacent donc "le" concepteur et la pluridisciplinarité de celles-ci est une évidence. Il apparaît aussi la double nécessité de la gestion des projets de conception et de la création d'un environnement (souvent informatique) de partage des connaissances et des données. En effet, la coordination dans un système d'ingénierie concourante est ce qui garantit la convergence vers le produit final, dans un délai acceptable. On retrouve ces deux approches dans le schéma classique de "la roue de l'ingénierie concourante" (cf figure 3.2) de Jo, Parsaei et Sullivan [JPS93, PS93]

Dans ses travaux, Biren Prasad [Pra6a, Pra6b] couple quant à lui deux "roues", une basée sur les organisations et une basée sur le développement du produit (cf figure 3.3) et approche le processus entier par la vision d'ingénierie concourante. Chaque roue est divisée en trois cercles concentriques, les deux centraux étant communs dans les cas or-

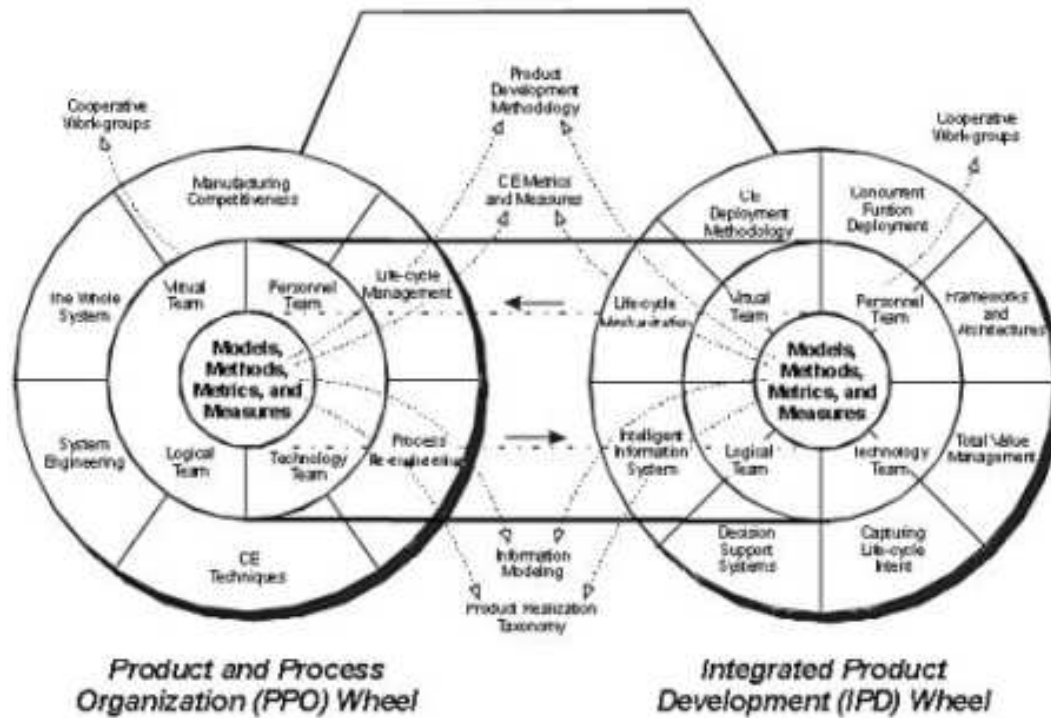


FIG. 3.3 – La double roue du concurrent engineering de Prasad
une vision organisationnelle et une vision produit [Pra6a, Pra6b]

organisationnels et du point de vue du produit. Par exemple, le cercle central représente les moyens mis en oeuvre pour assurer le processus de conception (modélisation, méthodes, critères et indices de performance), il contient à la fois des éléments descriptifs de l'organisation et du produit. Le fait de mettre en rapport deux roues, plutôt qu'une seule, apporte une vision plus profonde de la philosophie du *concurrent engineering* qui dans la représentation de Jo (cf figure 3.2) n'intervient pas dans le cycle de vie total du produit mais en tant qu'étape spéciale dans un cadre qui reste séquentiel. Prasad précise que sans une structure ou une constance dans le but il ne peut y avoir de système, mais juste une association de composants.

Lors de la mise en place en entreprise de ces méthodes, on assiste à des changements organisationnels et socio-professionnels. En effet, de nouveaux métiers et de nouvelles activités émergent telles que la gestion d'équipes de conception pluridisciplinaires, le management par projet (comme par exemple la conception de la twingo en plateau projet chez Renault dans [Mid93]). La distribution (spaciale) est au centre de cette approche du processus de conception. On essaye de faire aussi du client un membre de l'équipe de conception avec notamment des outils d'aide à la formalisation des besoins (avec la méthode QFD par exemple). La hiérarchie taylorienne est chamboulée et des exécutants se retrouvent concepteurs à part entière. La communication est donc un élément essentiel pour assurer les performances d'un processus de conception.

Bien évidemment, on assiste aussi à des changements au niveau de l'information et de la communication. La conception en équipe implique des outils d'une grande souplesse

et permettant un partage rapide et efficace de l'information. De nombreux outils informatiques et notamment les environnements de conception assistée par ordinateur (CAO) proposent des cadres permettant de gérer "l'ensemble des données relatives à la vie du produit" [Tic92].

Les concepts d'ingénierie concourante et de prise en compte de nombreux métiers dans toutes les phases de la conception ont amené à créer des méthodes et des outils d'aide pour la communication et le partage de connaissances. Certains outils aident le concepteur en lui apportant une expertise qu'il ne possède pas de première main, notamment dans les domaines de la fabrication. Ces outils sont appelés "des outils d'intégration" et doivent répondre à différents critères pour être considérés comme tels, ces critères sont issus de la thèse de Laurent Blondaz [Blo99] :

- 1. Représenter un objet du point de vue du métier considéré
- 2. Représenter la connaissance d'intégration du métier considéré
- 3. Communiquer avec les autres acteurs de la conception
- 4. Valider la fabricabilité d'une solution
- 5. Mesurer la fabricabilité d'une solution
- 6. Innover, rechercher des solutions
- 7. Décider et négocier

Au niveau des méthodes, le DFX (*Design for X*) est un courant de l'ingénierie simultanée et de l'intégration produit/process qui met en relation un métier particulier avec celui de la conception. Le terme x peut signifier fabriquer (avec le DFM *Design for manufacturing*), recycler ou, historiquement assembler avec le DFA (*Design for Assembly*). Le DFA est apparu au Japon et aux USA dans les années quatre-vingt à travers les travaux plus ou moins simultanés de Boothroyd et Alting [BA92] et AEM-Hitachi. Le principe de cette méthode est de travailler sur la réduction du nombre de composants en faisant l'hypothèse que le temps et la complexité lui sont proportionnels. Théoriquement, supprimer un composant dans un système conduit à réduire temps et coûts liés aux opérations de montage, simplifier la chaîne de montage, réduire les défaillances lors du montage, améliorer la qualité, réduire les stocks et simplifier le produit [Rej01]. Rejneri classe les méthodes DFA existantes en trois catégories :

- Les règles et principes de conception intrinsèques à une société.
- Les systèmes experts et les bases de connaissances. Par exemple, le système Lucas fait varier l'importance et le nombre des composants d'un système afin d'aider au choix.
- La méthode de Boothroyd permet de quantifier les temps de montage des composants et de les transformer en coûts via des tarifications horaires. Pour chaque composant, sont définis trois temps : saisie, manipulation et insertion. Une analyse du mécanisme selon cette méthode donne des indicateurs de "degré de bonne conception".

Cependant, ces méthodes ne peuvent s'appliquer que sur un produit en relative fin de conception, alors que celui-ci possède déjà au moins une ébauche architecturale de géométrie. Mais on peut tout de même garder ces concepts à l'esprit durant toute la phase de conception et, grâce à des outils CAO et au maquettage virtuel, effectuer de plus en plus tôt des vérifications et des évaluations incluant ces contraintes.

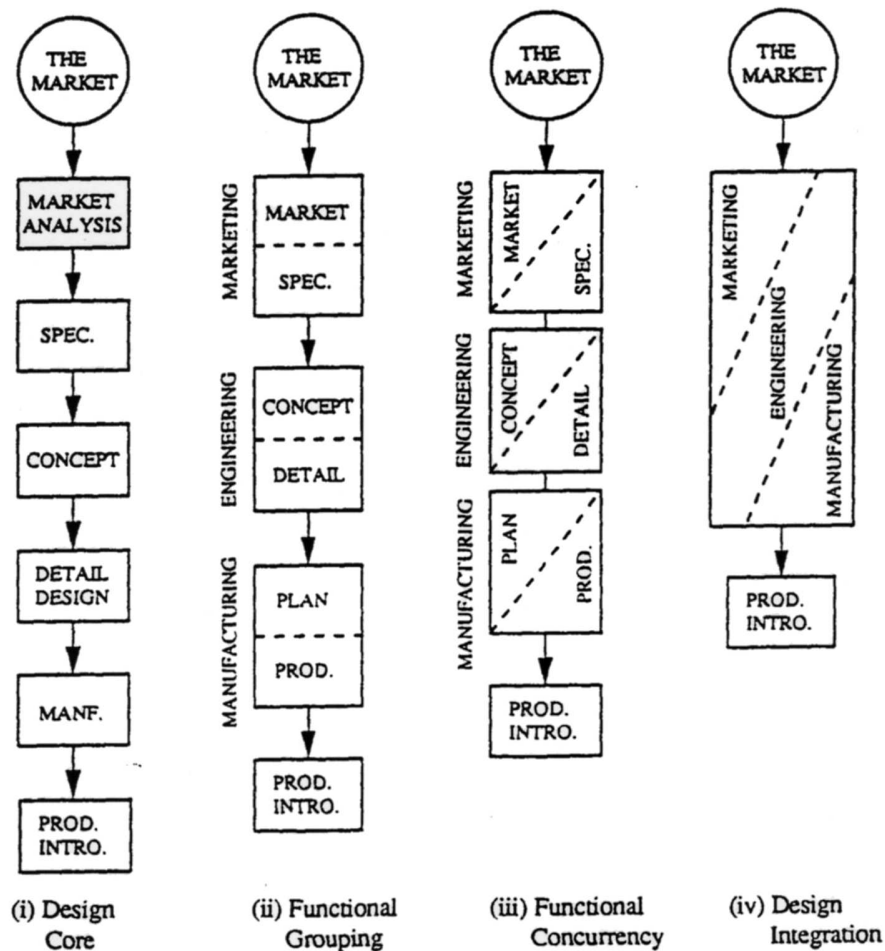


FIG. 3.4 – L'évolution de l'intégration de la conception
(Source [Lea95])

Le DFM n'est apparu que plus tard et préconise de prendre en compte les contraintes de fabrication au plus tôt dans le processus de conception pour garantir la fabricabilité du produit. En ce sens, il est très similaire aux outils d'intégration métier, on peut dire que les uns instrumentent l'autre. Même si on verra dans les études socio-techniques que les outils seuls ne peuvent répondre totalement aux questions de la conception distribuée et intégrée.

L'approche "conception intégrée"

Avant d'introduire la conception intégrée, parlons de l'intégration de la conception dans le processus global de développement des produits. Pour Leaney [Lea95] l'ingénierie concurrente n'est qu'un sous-système qui vise à l'intégration de la conception avec la fabrication et le marketing. Il montre sur la figure 3.4 que l'on peut passer d'une description séquentielle (basée de très près sur la description de Pahl et Beitz) à une description tout-intégrée en déplaçant puis en faisant disparaître les frontières entre les métiers.

Le terme de "conception intégrée" fait cependant référence à plus que l'intégration de

la conception dans le processus de développement de produit d'un point de vue purement technique. Historiquement, le terme semble être apparu dans un article sur les calculs de structures en 1989 par Tichkiewitch [Tic89] : "...la prise en compte des problèmes de fabrication et de maintenance dès la conception permet de penser "conception intégrée" en demandant de repenser certaines méthodes de calculs de structures." On se sert du calcul de structures comme aide à la conception et non plus comme seule vérification *a posteriori* du résultat.

Pour Brissaud "concevoir est mettre en relation des entités (individus, objets et connaissances) qui ne peuvent être déterminées au préalable" [BG98]. Il n'y a pas uniquement concourance des activités des métiers de conception mais bien une collaboration étroite et concertée. La conception intégrée est donc une question d'organisation, mais aussi d'outils et de méthodes spécifiques pour son instrumentation. Ces outils et méthodes se basent sur la communication et l'interaction. Des documents formels ou non représentant une réalité du produit, le téléphone, les réunions en sont autant d'outils. Ces outils sont mis en oeuvre par des acteurs et n'ont de réalité que dans l'action d'où la nécessité de ne pas baser les études des processus de conception uniquement selon un point de vue des techniques.

De l'étude conjointe des outils d'intégration et de leur utilisation, Blondaz propose les différentes hypothèses pour la conception intégrée comme suit [Blo99] :

- un processus de conception est un enchaînement de décisions de conception,
- chaque décision de conception fait intervenir en général plusieurs critères,
- certains critères de prise de décision sont imprévisibles,
- certains critères de prise de décision sont incommensurables,
- certains critères de prise de décision sont inquantifiables,
- les décisions sont entrelacées avec les critères,
- certaines décisions sont prises dans l'incertain,
- chaque critère renvoie à des représentations spécifiques,
- les informations disponibles évoluent durant le déroulement de la conception,
- les acteurs de la conception conditionnent les décisions par leur connaissance technologique,
- les acteurs de la conception conditionnent les décisions par leur connaissance du projet,
- les critères sont apportés par des acteurs distincts,
- la liberté laissée sur le support d'information est nécessaire pour la coopération.

Par la suite et pour réellement comprendre la conception, une approche transversale est nécessaire, s'attacher à l'étude des techniques, des produits ou des outils seuls ne peut pas donner une vision suffisante. Des dimensions sociales et cognitives sont progressivement apparues dans les recherches sur ce processus de conception et notamment au laboratoire 3S avec, par exemple, de nombreux partenariats avec le laboratoire de sciences humaines CRISTO². Cette approche sera développée plus en détail au chapitre 4.1.

²CRISTO = Centre de Recherche "Innovation Socio-Technique et Organisations industrielles"

Conclusion

Un système mécanique est donc caractérisé par un assemblage varié de composants avec une forte diversité de formes en trois dimensions, comportant des mouvements et dont les couplages multiphysiques sont importants. Nous avons donné un bref panel de l'évolution de la "conception de produits/systèmes mécaniques" depuis les méthodes visant à structurer et formaliser les méthodes pour maîtriser les trois aspects délais/coûts/qualité. Les récentes contraintes du marché font apparaître un besoin d'optimisation sur ces aspects qui a conduit à de nouvelles approches telles que l'ingénierie concurrente et la conception intégrée. Nous avons insisté notamment sur l'importance d'impliquer au plus tôt tous les acteurs du développement du produit (et particulièrement les fabricants) et de coordonner la collaboration des équipes de conception. Pour finir nous avons introduit l'intérêt d'une approche socio-cognitive de l'activité de conception.

3.1.2 Description d'un processus de *design* VLSI

Le produit de la microélectronique : le circuit intégré

La maturité des méthodes de conception et de fabrication de la microélectronique est principalement due à une demande de la part des concepteurs au pied du mur devant le nombre croissant de transistors par circuit. D'un positionnement manuel des cellules (par cellule il faut comprendre "petit ensemble de transistors"), les méthodes ont dû évoluer pour prendre en compte les milliards de transistors par puce actuellement. La différence se voit nettement dans les évolutions architecturales des microprocesseurs PentiumTM par exemple, sur la figure 3.5. De surcroît, la loi de Moore affirme, entre autres choses, que cela va continuer dans cette voie. Vers la fin des années 1970, de nombreuses études ont été menées pour réduire le temps et le coût de passage de la conception à la fabrication des puces. En effet, cette frontière était devenue très complexe et intensive à traverser car le dessin des masques de lithographie, aboutissement de la conception du circuit avant la production, nécessitait des connaissances très étendues de procédés de fabrication de plus en plus complexes.

Une des particularité des produits de la microélectronique est qu'ils se basent sur un nombre limité de composants : résistances, capacités, inductances, diodes, transistors, etc. ou, si l'on regarde d'un peu plus haut, des portes logiques telles que AND, OR, NAND, etc. Ces composants sont utilisés de manière paramétrée et en grand nombre afin de créer par assemblage des circuits complexes. Une autre particularité est la connectivité : tout composant est relié par une connexion à un autre composant du système, le système complet doit aussi communiquer avec le monde extérieur, ce qui amène une notion d'interface et de frontière physique. Cela revient à une conception de type architecturale.

Un premier principe : une conception structurée

La description des éléments du circuit peut s'établir sur deux plans : l'aspect comportemental et la représentation géométrique. C'est sur ces deux aspects que le concepteur va faire progresser la conception de la puce. L'aspect comportemental est représenté par la

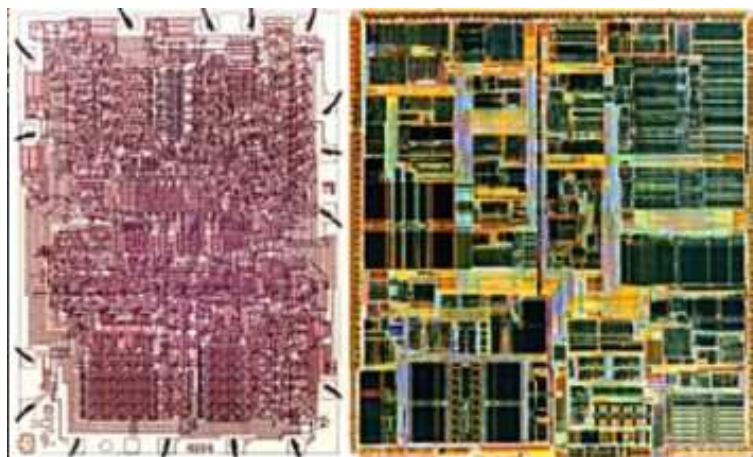


FIG. 3.5 – Deux microprocesseurs de chez Intel
le Intel4004 (1971) et le Pentium IV (2000)

netlist et la géométrie physique du circuit par le *layout*. Le flot de conception passe de l'un à l'autre avec des itérations parfois de l'un vers l'autre comme on le voit sur la figure 3.6. Ce processus de conception est très proche d'une description systématique des processus de conception de type Pahl et Beitz, avec un enchaînement d'étapes selon une démarche séquentielle. La présence très marquée de bibliothèques de composants, d'aspects automatiques et d'une "liaison unique et monodirectionnelle" vers la fabrication induisent des différences importantes de principes que nous développerons par la suite.

Le but final de la conception VLSI est la production des masques de lithographie des différentes étapes du processus de fabrication de la puce, le nombre de masques peut atteindre plusieurs centaines. Afin d'obtenir ces masques, le cahier des charges de l'activité de conception VLSI peut être posé de la façon suivante :

- Minimiser le temps de développement bien sûr (ce qui comprend la totalité du cycle de développement ante fabrication, et inclut aussi la/les phases de test),
- Répondre au plus proche aux performances attendues en terme de cahier des charges fonctionnel du produit, mais aussi en terme de rapidité de fonctionnement, de surface occupée sur la puce, de puissance, de consommation d'énergie,
- Minimiser la connectivité (car la rapidité et la puissance dépendent de la longueur du trajet des électrons),
- Faciliter la génération des activités de tests,
- Garantir la fabricabilité.

Ce cahier des charges des objectifs de l'activité de conception implique la création de deux notions : la structuration des données de conception et les niveaux d'abstraction dans la description du circuit. La structuration des données va dans le sens de la notion de procédures qui visent à aider l'automatisation (automatisation des étapes de vérification et de fabricabilité), afin de traiter des problèmes plus complexes. Le terme d'abstraction, ou de niveaux d'abstraction, participe de la démarche de division des tâches : on sacrifie des niveaux de détails afin d'avoir une vue plus globale.

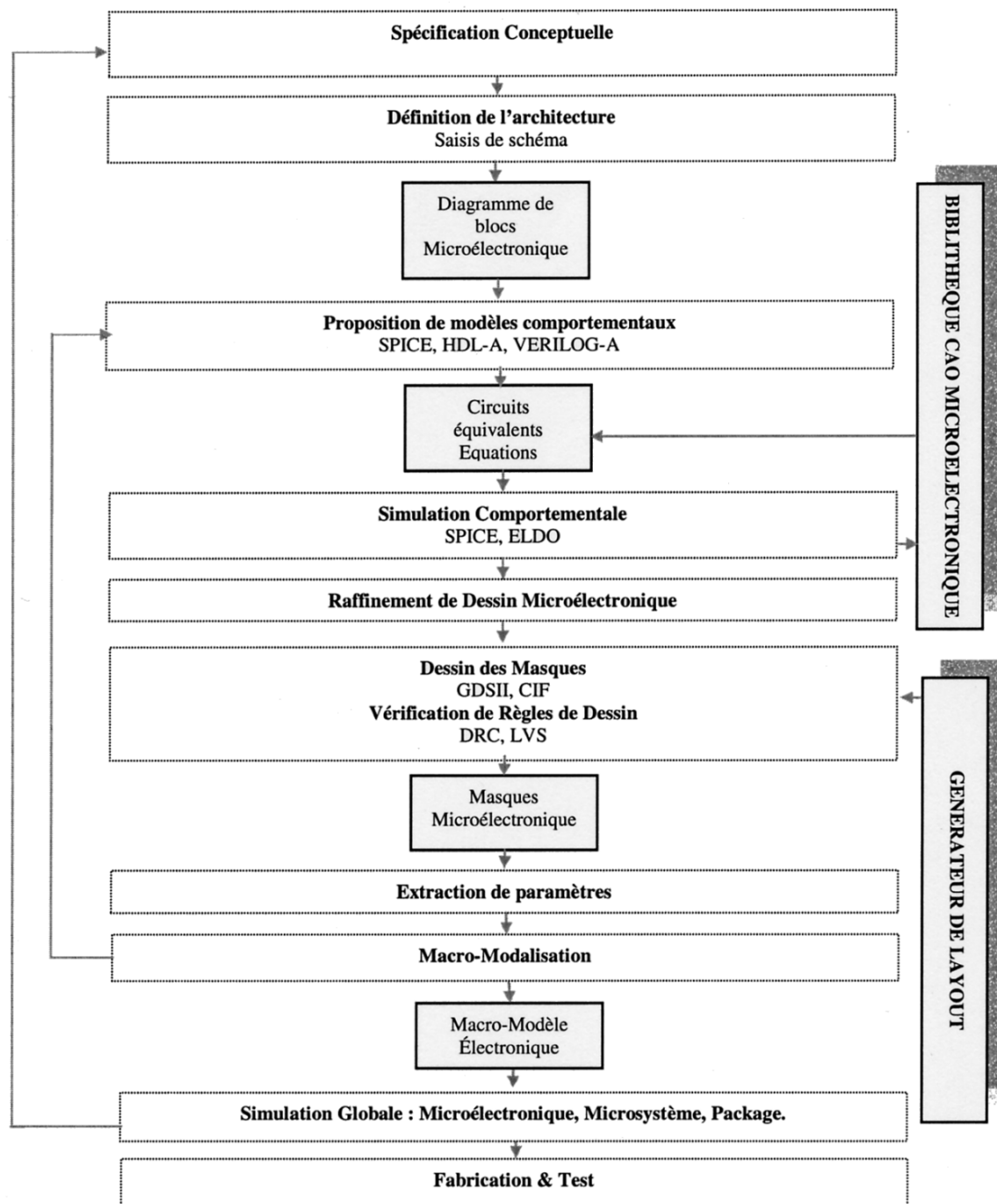


FIG. 3.6 – Le flot de conception VLSI
(Source [Jun03])

Un deuxième principe : la séparation entre conception et fabrication

La complexité des circuits microélectroniques avait pour gros défaut un manque de retour d'informations quant aux conséquences des décisions prises lors de la conception des circuits à des niveaux qui ne sont pas physiques. Rares, voire inexistantes, étaient les garanties de bon déroulement des activités de fabrication. De plus, les technologies de fabrication évoluent très rapidement avec des procédés de plus en plus performants en terme de miniaturisation mais aussi de plus en plus complexes à maîtriser. La méthode préconisée alors fut basée à la fois sur la création d'une structure bornée dans laquelle les concepteurs peuvent faire évoluer leur produit avec des garanties de fabricabilité et sur un format d'échange de données. Il en existe de nombreuses formes, mais la désignation générale est HDL³ et désigne un langage textuel qui décrit le comportement d'un circuit, sa structure, ou bien les deux. On peut faire l'analogie avec un langage de programmation informatique dans la mesure où il est lisible par des humains et nécessite une compilation pour pouvoir être interprété par le système.

Les hypothèses qui ont conduit à l'élaboration de ce format sont les suivantes :

- Il existe un cadre de contraintes géométriques qui garantissent la fabricabilité du circuit. Toute conception dans ce cadre, certes très contraignant, possède une garantie de fabricabilité.
- Les connaissances des différents métiers de la fabrication sont formalisables sous la forme de règles géométriques (par exemple la taille minimale d'un motif ou bien la géométrie dite Manhattan).
- Il n'y a pas de négociation possible sur ces règles imposées par la fabrication, les propositions des concepteurs sont évaluées dans cet espace de fabricabilité.

On trouve trois principaux langages ou formats : le format CIF, le format GDS II et le format EDIF.

Le format CIF (abréviation de *Caltech Intermediate Form* [HS80]) est une de ces formes de description de circuits intégrés. Ce format propose un nombre limité de commandes de bases qui permettent de décrire les formes géométriques en deux dimensions des différentes couches des puces électroniques. Il se présente sous une forme textuelle très concise, on y trouve deux principales catégories de commandes : des descriptions purement géométriques, et des actions de contrôle de routines et de macros. A l'aide de cette représentation, les concepteurs peuvent effectuer le transfert entre leurs conceptions logiques et la vue finale technologique. (cf figures 3.7 et 3.8)

Le format GDS II Stream (qui est une marque déposée par la société Calma) est aussi un format intermédiaire qu'il faut compiler / convertir avant d'obtenir le masque. En ce sens, il est très similaire au format CIF.

Le standard EDIF⁴ est né en 1985 pour répondre à des problèmes de confidentialité lors du fleurissement de standards de données "maison" qui ne laissaient pas d'autre

³HDL = *Hardware Description Language*

⁴EDIF = *Electronic Design Interchange Format*

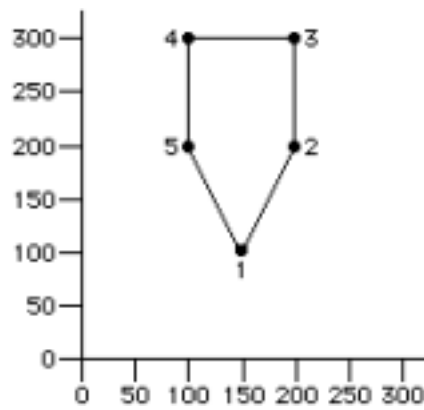


FIG. 3.7 – Un exemple de code CIF

la description de ce "polygone" donne $P\ 150\ 100\ 200\ 200\ 200\ 300\ 100\ 300\ 100\ 200$;

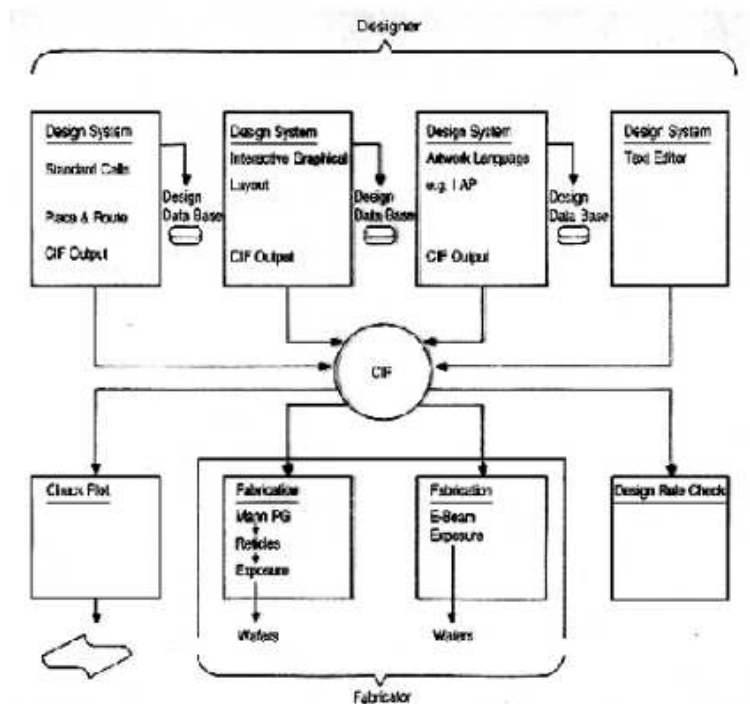


FIG. 3.8 – Le CIF et sa vocation d'interface entre concepteur et fabricant

choix aux clients que de jurer fidélité à leur fabricant pour pouvoir communiquer leurs conceptions. De plus, la multiplicité des langages rendait difficiles les traductions. EDIF résoud ce problème en étant un langage neutre non propriétaire rendu public en 1988. Plus récent et moins populaire que les deux précités, il est plus accessible dans la mesure où les mots-clés et mnémoniques se rapprochent beaucoup des langages de programmation informatiques tels que C, etc.

De nombreux bénéfices découlent de ces formats :

- Une standardisation des données permet le développement des outils CAO et des procédés post traitement.
- Les fonderies silicium peuvent accepter les conceptions de toute entreprise ne possédant pas de moyen de fabrication, ou encore des projets d'étudiants à l'Université.

Le principal avantage est indéniablement la possibilité d'automatisation de la vérification des conceptions. A partir de cette forme de représentation textuelle, des modes de visualisation graphique ont été créés et on a maintenant des outils de CAO et des méthodes pour chacun des très nombreux niveaux d'abstraction qui décrivent un circuit microélectronique.

Un troisième principe : gérer la complexité par des niveaux d'abstraction

La notion d'abstraction est une notion complexe. Le dictionnaire⁵ la décrit de la façon suivante :

Abstraction : Opération intellectuelle, spontanée ou systématique, qui consiste à abstraire.

Abstraire : Dégager d'un ensemble complexe les traits communs aux éléments ou aux individualités qui le composent.

Dans le domaine de la microélectronique, on a fait appel à cette notion pour des raisons de complexification des circuits, le terme est donc à prendre plus dans un sens de clarification que dans un sens de recherche de facteur commun.

On distingue deux façons d'abstraire dans la conception de circuits électroniques. L'une est un véritable passage du concret (i.e. description géométrique physique d'un transistor) à l'abstrait en terme de fonction (par exemple, réaliser une multiplication entre plusieurs variables) (sens 1). L'autre est une simplification en terme de niveaux de détail, descendre d'un niveau d'abstraction consiste à poser une loupe sur la partie voulue (sens 2). Dans certains cas, on reste dans l'un des niveaux d'abstraction décrit plus avant, dans d'autres, on en change. Sur la figure 3.9, le passage de (a) à (b) est un grossissement dans un niveau d'abstraction fonctionnel. Le passage de (c) à (d) en revanche n'est pas uniquement un grossissement "optique" car les modes de représentation associés ne sont pas du même niveau d'abstraction au sens 1. Le terme d'abstraction dans la conception de circuits intégrés est donc assez changeant selon les sources.

⁵Dictionnaire ATILF, de l'université de Nancy, "Le Trésor de la Langue Française Informatisée" sur Internet : <http://atilf.atilf.fr/>

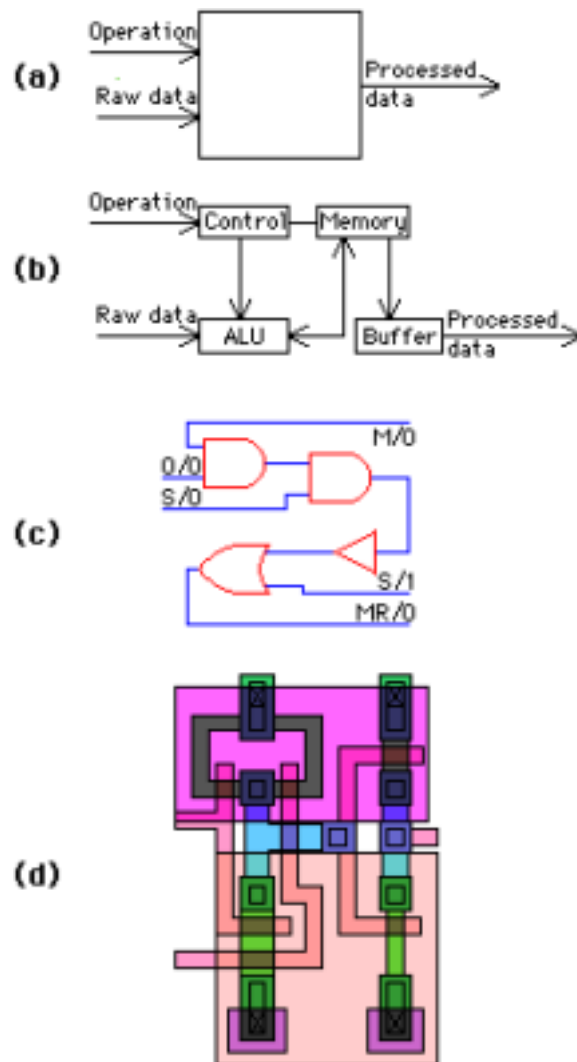


FIG. 3.9 – Une vision des niveaux de visualisation et de raffinement en microélectronique
 (a) La boîte noire, (b) L'architecture, (c) La description logique, (d) Le layout.
 (Source [Rub94])

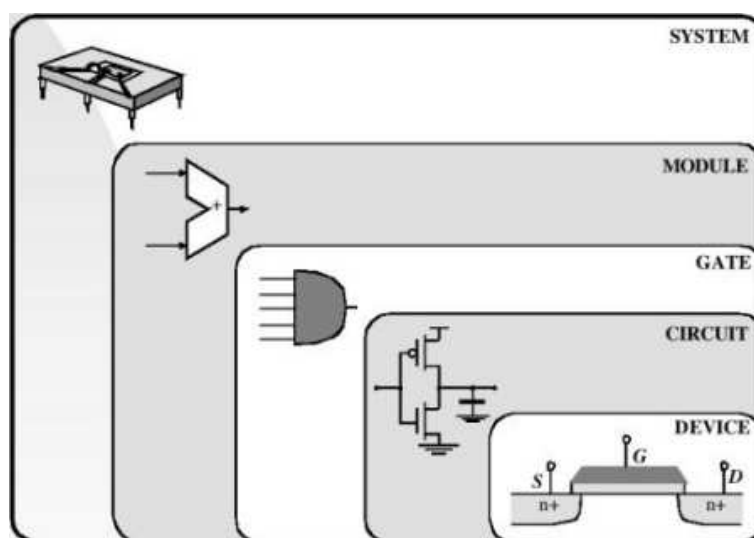


FIG. 3.10 – Les différents niveaux d'abstraction
Selon Rabaey, Chandrakasan, et Nikolic de l'Université de Berkeley.

On trouve dans la description de Jan M. Rabaey, Anantha Chandrakasan, et Borivoje Nikolic de l'Université de Berkeley (cf figure 3.10) cinq autres niveaux d'abstraction (avec certains recouvrements) qui décrivent le produit dans sa globalité :

- Système
- Modules
- Portes logiques (OR, AND, NAND, etc. issues de la logique booléenne)
- Circuit (ensemble de composants tels que résistances, condensateurs, transistors...)
- Composants en eux-mêmes, à travers les caractéristiques géométriques intrinsèques comme par exemple la longueur de grille pour un transistor, ou la taille de son implantation ionique n+. Ce dernier niveau d'abstraction est le plus proche de la technologie, ce sont les layouts, masques de lithographie.

Cette taxonomie est hybride car dans un seul axe descriptif, les deux sens du terme d'abstraction se mélangent même s'il s'agit plus d'une vision plutôt de type 2.

On peut proposer une autre classification selon deux axes comme sur le tableau de la figure 3.11 :

- Un axe dans le sens 1 avec trois niveaux dans les domaines comportemental, structurel et physique.
- Un axe selon le sens 2 avec aussi trois niveaux : architectural, logique et au niveau du circuit (un circuit microélectronique est, à y regarder de près, un ensemble de polygones de matériaux conducteurs et semi-conducteurs).

Entre chacun de ces niveaux, il existe des traductions à effectuer. Les deux principales sont d'une part, les activités de synthèse pour passer d'une représentation comportementale à une représentation structurelle puis physique (et aboutir au *layout*) et d'autre part, les activités d'analyse qui remontent des descriptions physiques à des descriptions

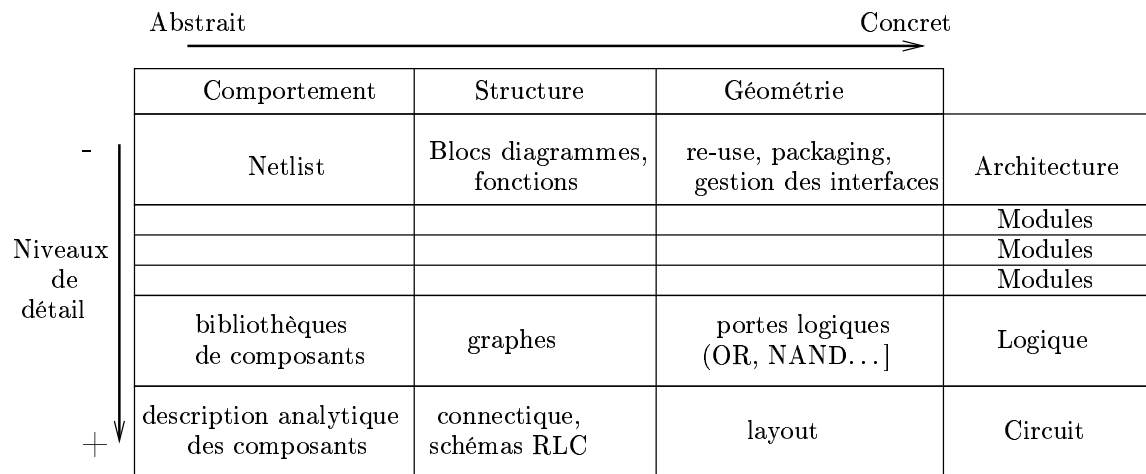


FIG. 3.11 – Un modèle des niveaux d'abstraction

comportementales (pour produire automatiquement des *netlists*).

Un quatrième principe : vers une standardisation et une automatisation

Outils méthodologiques Afin d'aider le concepteur dans sa tâche, de nombreux outils et méthodes ont été créés. Au niveau méthodologique, une approche *top-down* consiste simplement à descendre les niveaux d'abstraction du système de la description comportementale de l'architecture globale vers la géométrie détaillée du circuit. Une approche *bottom-up* consiste à assembler des briques de base paramétrées afin d'obtenir un système complet, et ce à tous les niveaux d'abstraction. Plus on utilise cette approche à un niveau d'abstraction élevé, plus on se rapproche d'une conception *re-use*, pour finir par réutiliser des parties complètes de circuits.

Néanmoins, certaines règles orientent les équipes de conception :

- Régularité de motifs à tous les niveaux d'abstraction : standardisation maximale des composants.
- Modularité : faciliter la coordination et la réutilisation.
- Agencement : on essaie de localiser les blocs par fonction dans le but de limiter les longues connexions, synonymes de pertes de puissance et de temps.
- Prise en compte du test des circuits : on applique une approche DFT⁶.

Dans la conception VLSI, la partie de conception typiquement appelée *Conceptual Design* ou bien "conceptualisation" est réalisée de manière routinière à travers l'utilisation de bibliothèques de composants. On a besoin de temps de conception très courts et la réutilisation de morceaux entiers d'un circuit précédent n'est pas rare, même si seule une petite partie de celui-ci est pertinente. Ainsi, des méthodes existent pour évaluer le temps de design et son coût, ces méthodes guident dans le choix de la façon de concevoir :

- *custom* (très long mais très optimisé),
- *cell based* (basé sur la réutilisation de cellules de base),

⁶DFT = *Design for Test*

- *prediffused* (les agencements des cellules sont repris sur d'autres puces),
- *prewired* (qui reprend des pans entiers de puces précédentes même si une grosse partie de la surface ne servira pas).

On est typiquement dans une approche *bottom-up* d'assemblage de briques de base en vue de concevoir des systèmes complexes comme mosaïques de fonctions élémentaires bien maîtrisées. La finalité de cette approche est d'utiliser des briques de base de niveau d'abstraction de plus en plus de haut, vers le courant re-use qui considère la réutilisation en conception de morceaux importants de circuits.

La conception de circuits en microélectronique est donc partiellement *top-down* et partiellement *bottom-up* à différents niveaux d'abstraction. Les deux approches convergent et on tend vers une rencontre de plus en plus haut dans la grille d'abstraction avec l'approche *re-use*.

Quant au DFTest, c'est une approche fondamentale dans l'industrie de la microélectronique, elle a été fort développée. Le coût engagé à tous les moments de la conception d'une puce pour le test est de l'ordre de 20% à 40%. Il intervient durant la conception, après et en cours de fabrication mais aussi en fonctionnement. Le test d'un circuit intégré doit permettre d'autoriser la mise en service en fin de ligne de production avec un certain niveau de qualité. Il doit aussi permettre le diagnostic afin de faire remonter les fautes en conception (via l'équipe de fiabilité, cf chapitre 3.2). Bien entendu, son coût doit être minimal, que ce soit en terme de structure ou de temps de test, d'utilisation de machines spéciales ou bien d'immobilisation du wafer hors de son flot de production. Il intervient selon quatre moments différents de la vie du circuit :

- en vérification (au moment de la conception, pour s'assurer que le circuit remplit ses fonctions, avec des méthodes de simulation)
- l'analyse de la défaillance (des tests sont effectués en filigrane tout au long de la fabrication, avec un retour d'information pour l'équipe de fiabilité)
- en production (durant la fabrication, sur le wafer, et une fois encapsulé dans le boîtier)
- en utilisation (les méthodes de test en utilisation sont appelées *concurrent* ou "parallèles", dans le cas où les tests sont effectués en comportements spéciaux, on les appelle "test hors ligne")

Ces différents modes de test sont présentés dans le processus de développement du circuit dans la fig 3.12.

Le DFT est donc un ensemble de techniques que l'on met en oeuvre au moment de la conception pour faciliter le test : améliorations d'accèsibilité, d'observabilité, test automatique (le BIST⁷ [McC85b, McC85a], par exemple, est une de ces techniques, très utilisée pour des structures régulières telles que les mémoires), fonction de test implémentées directement sur la puce... On peut aussi créer des architectures redondantes [RLO98], ou mettre en place des modes de corrélation entre les fonctions réalisées afin de détecter les dysfonctionnements.

Outils informatiques Il existe plusieurs catégories d'outils d'aide à la conception de circuit microélectronique : les logiciels de représentation du circuit soit de manière

⁷BIST = *Built-in Self-Test*

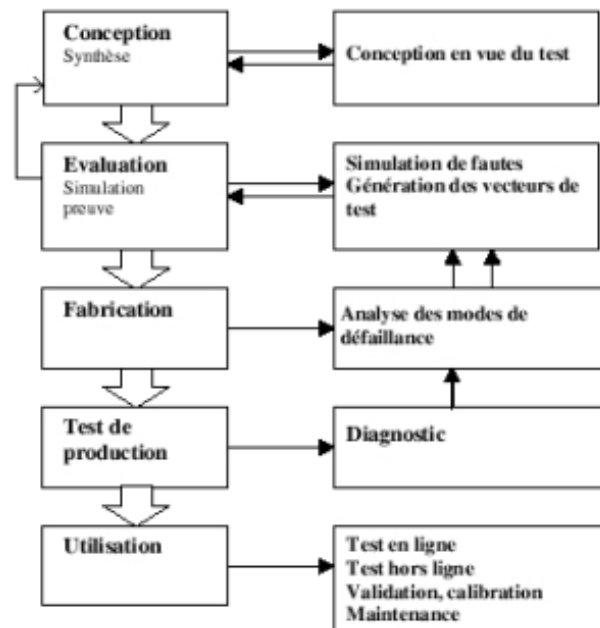


FIG. 3.12 – Cycle de conception et fabrication avec mise en place du test
(Source [Cha01])

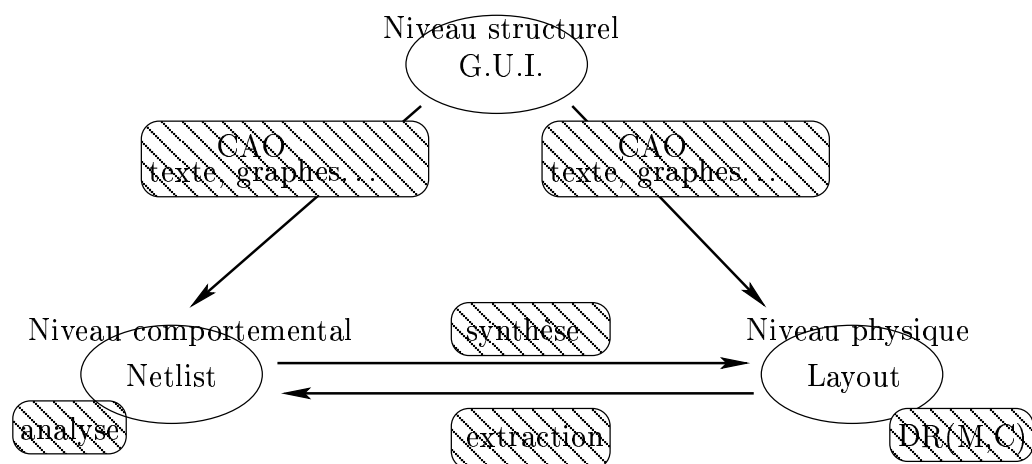


FIG. 3.13 – Figure descriptive des outils suivant les niveaux d'abstraction

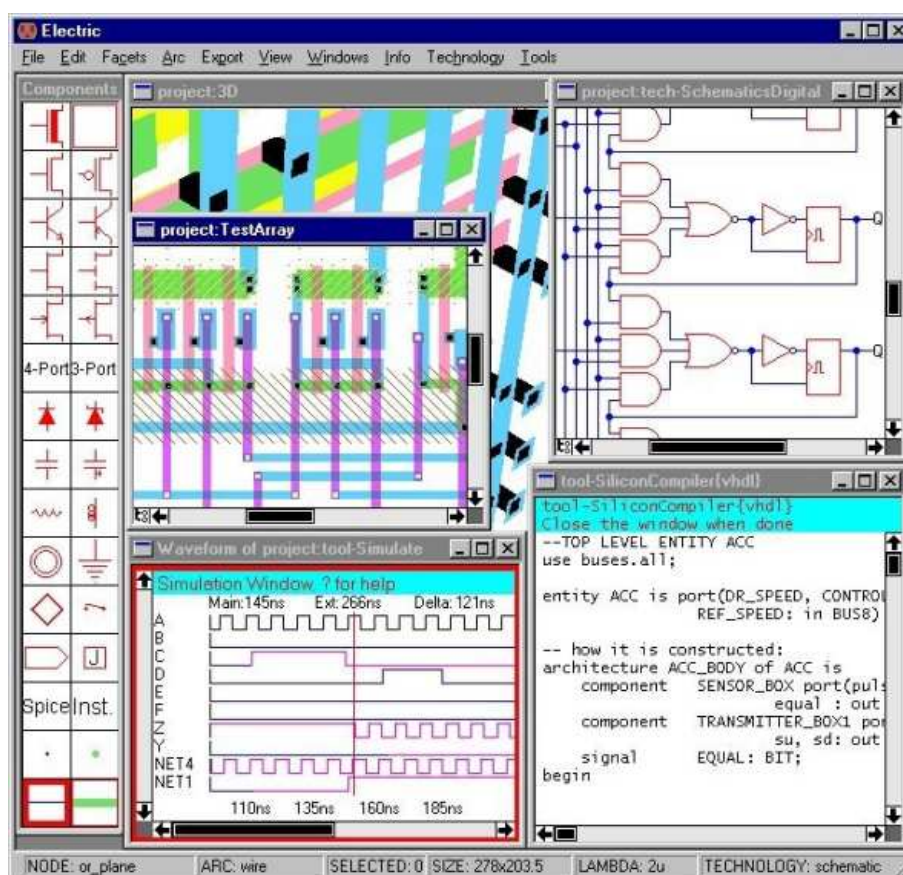


FIG. 3.14 – Exemple d'un logiciel intégré. (ElectricTM de S.M. Rubin)
on y voit plusieurs types de représentation, circuit, layout, HDL...

graphique, soit de manière textuelle, les programmes de synthèse qui agissent en tant que convertisseurs entre les différents niveaux d'abstraction et les programmes d'analyse qui vérifient si le circuit est correct en terme de fonctionnement. Enfin, des programmes convertissent l'aboutissement de la conception en spécifications de fabrication selon des règles qui garantissent la bonne marche du procédé de production (sachant que cette conception est bornée dans le domaine de fabricabilité normalement). Ces outils de traduction peuvent agir dans les deux sens, i.e. ils aident le passage vers le *layout* ou vers la *netlist*. (cf figure 3.13)

- Dans le cas des outils d'extraction, on donne la description géométrique du circuit et le logiciel identifie les composants de manière automatisée afin de produire la netlist.
- Pour le flux inverse, on a les outils de synthèse physique. Ces outils génèrent le layout à partir de la netlist.

Le but final est d'avoir un processus de transformation des spécifications comportementales en spécifications de fabrication totalement automatisée avec l'utilisation de bibliothèques de composants à divers niveaux d'abstraction. A l'heure actuelle, certains outils appelés *silicon compiler* réalisent cette transformation dans un nombre limité de cas. "La compilation sur silicium est un outil de CAO. Elle consiste à générer automatiquement un système intégré spécifique. Elle s'apparente à la compilation logicielle qui génère automatiquement un code en langage machine." [Mig99]

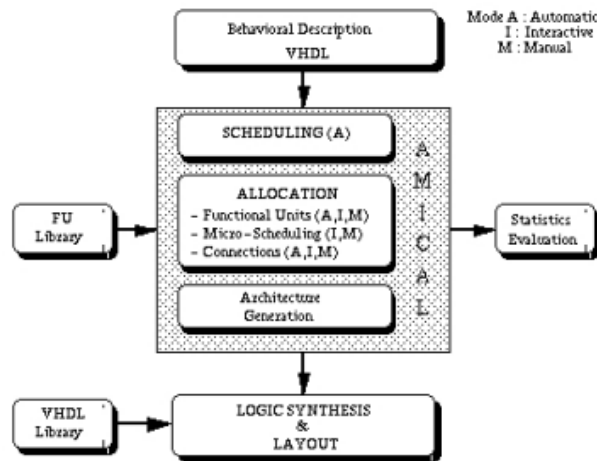


FIG. 3.15 – Exemple de l'environnement AMICAL
un "silicon compiler" développé au TIMA de Grenoble

A un niveau proche de la technologie (i.e. des masques de lithographie), la TCAD⁸ est un outil (ou bien une équipe de travail dans une entreprise, par analogie avec leurs outils et leur fonction) qui vérifie les layouts. Le DRM et le DRC servent à la vérification en terme de fabricabilité du travail des ingénieurs qui dessinent les masques, ce sont les incarnations informatiques des hypothèses d'un cadre de fabricabilité pour les langages HDL par exemple.

- DRM : *Design Rules Manual*. C'est l'ensemble des règles de dessin des masques qui sont pour la plupart implémentées informatiquement dans les logiciels de CAO tels que Cadence.
- DRC : *Design Rules Check*. C'est un outil de vérification de layout, une version automatisée du DRM en quelque sorte.

Lorsque le designer est arrivé à un certain niveau de maturité sur son dessin des masques, il "lance" un DRC. Cette étape est résolue sous la forme d'un programme qui scrute le fichier informatique réalisé sur l'outil de CAO (d'où l'intérêt des formats HDL) et qui produit un compte-rendu avec toutes les impossibilités techniques détectées sur le design. Ce compte-rendu est sous la forme d'un fichier texte qui peut faire plus d'un millier de lignes et qu'il faut analyser afin de discerner les véritables modifications à apporter des imprécisions du logiciel. Dans la pratique, le designer cesse son travail de création de niveaux de masques environ une dizaine de jours avant la date de fin du projet car l'étape de DRC n'est pas réalisée en fond de tâche pendant le dessin mais représente une étape (avec ses itérations) à part entière.

Le travail du dessinateur de masque est double. Il doit dessiner les composants d'après le cahier des charges fourni par le concepteur d'un niveau d'abstraction supérieur, mais aussi ajouter certaines structures pour faciliter des étapes de fabrication. On peut par exemple citer les *dummies* qui sont des carrés de matière (silicium ou métaux selon le

⁸TCAD = *Technology Computer-Aided Design*

masque sur lequel il travaille) n'ayant strictement aucune fonction dans le comportement de la puce mais qui servent à homogénéiser la surface afin de faciliter/rendre possibles les étapes de CMP. Il existe des routines de programmation automatisées dans les logiciels de CAO pour les définir mais le dessinateur doit tout de même faire appel à son savoir-faire pour en enlever ou en remettre le cas échéant. Ces connaissances lui sont propres et sont intrinsèques à son niveau d'abstraction, inconnues des niveaux immédiatement supérieur ou inférieur.

Conclusion

Le produit typique de l'industrie VLSI est le circuit intégré de technologie CMOS, assemblage monolithique de milliards de composants discrets sur un substrat de silicium. Nous avons vu que leur conception a dû faire face à de nombreuses difficultés telles que la complexité croissante des circuits et la rapidité d'évolution des technologies de fabrication. Il en ressort des méthodes de conception très structurées, basées sur une séparation franche entre fabrication et conception, celle-ci étant bornée dans un espace garantissant la fabricabilité. La gestion de la complexité s'est faite grâce à la mise en place de nombreux niveaux d'abstraction et a abouti à des méthodes et outils standardisés visant à l'automatisation.

3.1.3 Pour les MEMS, une approche mixte

Nous avons présenté successivement une vue sur les processus de conception de systèmes mécaniques et de systèmes micro électroniques. Les méthodologies de conception semblent être aussi éloignées que les produits peuvent sembler différents au premier abord. Mörhinger [Möh04] effectue la comparaison des méthodes de conception entre plusieurs "mondes" en s'aidant d'un mode de représentation en trois dimensions, sur quatre domaines : mécanique, microélectronique, mécatronique et informatique (au sens conception logicielle).

Les trois axes de cette représentation sont :

- les phases du processus de conception (pas au sens de la maturation du produit, mais au sens des étapes d'une approche de type *top-down*),
- les résultats de ces phases en terme d'état d'avancement du produit,
- un axe spécifique au domaine étudié : pour la mécanique et la microélectronique, il s'agit des différents modes de représentation avec une progression dans l'abstraction (au sens 2).

Mörhinger conclut que les processus de conception sont finalement assez proches sauf dans le cas de la programmation de type objet. En effet, si on regarde par exemple les deux cubes (cf figure 3.16) représentant les flux de conception mécanique et VLSI, on peut voir une similitude dans la forme prise par le processus. Ce n'est pas étonnant dans la mesure où il représente deux approches apparentées au *top-down* pour la mécanique et au *bottom-up* dans le cas d'une conception "*custom*" pour le VLSI, cas où les deux approches sont les plus semblables. Les résultats auraient été différents s'il avait choisi une conception "*re-use*" pour le domaine des circuits intégrés. De plus, il est difficile

de parvenir à une telle conclusion car il convient aussi de comparer le produit en lui même.

Par ailleurs, Ullman [UWC90], dès 1990, mesure la différence entre les mondes électronique et mécanique en sept points de mesure :

- le type d’objet,
- le type de problèmes de conception,
- la relation entre la forme et la fonction,
- le potentiel de décomposition,
- la complexité du langage,
- la complexité graphique,
- les méthodes de conception.

On voit qu’il prend en compte le produit mais les points de mesure proposés sont de niveaux de description très différents. Les méthodes de conception ne sont pas à mettre au même niveau que la complexité graphique, par exemple, qui n’est qu’un exemple d’outil de représentation. En revanche, la distinction en terme de modes de représentation est réelle et pertinente.

Après analyse de ces deux approches, nous proposons une comparaison en cinq points :

- les caractéristiques intrinsèques du produit,
- le type de problème de conception (selon la définition de Ullman, cf chapitre 3.1.1),
- les modes de représentation du produit,
- la relation entre forme et fonction et le potentiel de décomposition,
- la méthodologie de développement.

Ces points comparent les deux domaines à travers des caractéristiques du produit et de la méthode de conception.

Les caractéristiques du produit Les circuits intégrés, si on se place au plus bas niveau d’abstraction, sont un assemblage de composants fonctionnels sur un substrat monolithique de silicium, il n’y a pas de mouvement autre que celui des charges électriques. Au contraire, les systèmes mécaniques sont des assemblages très divers de composants extrêmement variés. L’exemple du moteur à explosion résume bien ce concept. De plus, les produits de la microélectronique ne sont pas en rapport direct avec l’environnement humain, ils communiquent avec le monde extérieur à travers une interface. La plupart des systèmes mécaniques doivent faire preuve d’ergonomie, de sécurité pour l’utilisateur... Ceci n’est pas une contrainte de conception en VLSI.

Le type de problèmes de conception Dans le chapitre 3.1.1, nous avons vu la proposition de Ullman sur les types de problèmes de conception. Si l’on se base sur cette taxonomie, les systèmes mécaniques requièrent l’intégralité de cinq types de problèmes tandis que la conception de circuits intégrés consiste plus souvent en de l’agencement de composants et à leur configuration. Ces choix et configurations se déroulent à tous les différents niveaux d’abstraction, selon si on est dans un cas à forte possibilité de ré-utilisation ou bien dans un cas totalement *custom* où il faut descendre jusqu’au dessin des masques de lithographie.

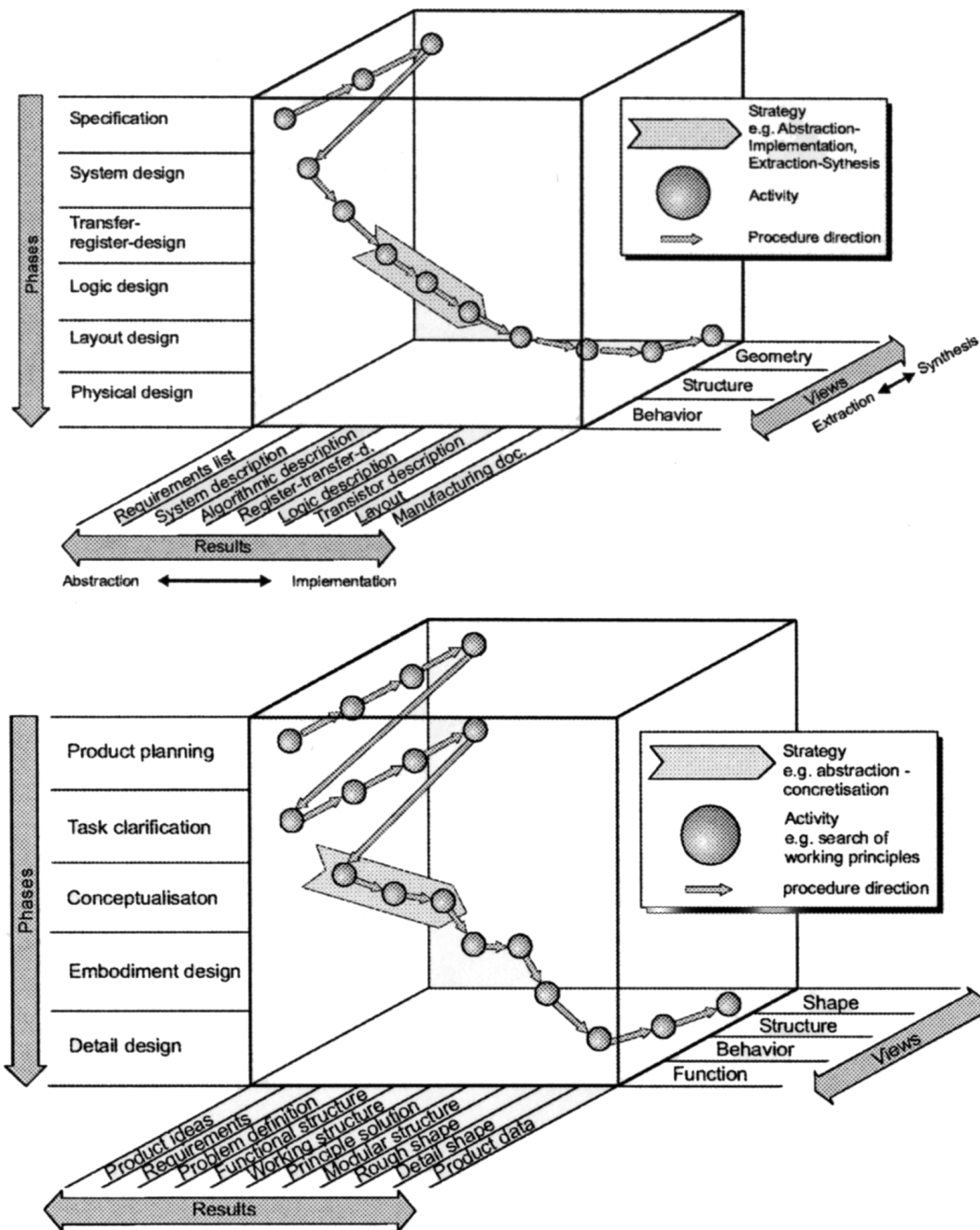


FIG. 3.16 – Les représentations de Möhringer
 Les cubes correspondent aux conceptions mécanique (en haut) et VLSI (en bas)
 (Source [Möh04])

Les modes de représentation du produit A ce niveau, la différence est flagrante. Dans le domaine VLSI, il existe toujours un niveau d'abstraction (en fait le plus proche de la réalité physique, i.e. les masques de lithographie ou bien le niveau d'abstraction (au sens 1) supérieur, la représentation schématique des circuits RLC...) où l'on peut représenter le produit par un ensemble de composants discrets parmi une bibliothèque finie. En ce sens, le lexique de conception est assez limité. Dans le domaine des systèmes mécaniques, ce lexique est bien plus vaste (roulements à billes, paliers lisses, visserie, engrenages...) voire n'existe pas de manière finie (par exemple, les "batis" mécano-soudés ou usinés ou moulés ont une infinité de formes).

La géométrie des circuits intégrés est très simple et par couche, les formes sont toutes plus ou moins rectangulaires. Un système mécanique possède là aussi une plus grande variété de formes et surtout en trois dimensions. Cette troisième dimension n'est pas juste un empilage de couches, que ce soit au niveau fabrication (par exemple certaines techniques de prototypage rapide fonctionnent par dépôts de couches) ou surtout au niveau fonctionnel, ce qui constitue une différence énorme.

La relation entre forme et fonction et le potentiel de décomposition C'est surtout la troisième dimension, comme décrite précédemment, qui fait que le potentiel de décomposition est bien plus réduit dans le cas d'un système mécanique que dans le cas d'un circuit intégré. En terme de géométrie, les circuits sont surfaciques. Ces surfaces sont intrinsèquement additives et la surface d'une cellule est indépendante de celle des autres cellules, on doit y ajouter la surface occupée par les connexions. En mécanique, les produits sont volumiques et ces volumes sont complètement dépendants les uns des autres (par exemple dans le cas d'un train d'engrenages coniques les entraxes, les alésages et les arbres qui portent les éléments réalisant les pivots, et les engrenages en eux-mêmes ne peuvent pas être dissociés).

L'arborescence qui permet de simplifier les problèmes en les décomposant en cellules élémentaires est bien plus délicate à effectuer dans les systèmes mécaniques où, on l'a vu, il n'existe pas toujours de décomposition fondamentale.

Il semble y avoir une bijection entre la fonction et sa solution technologique (donc la forme) dans le domaine VLSI si l'on descend suffisamment bas dans l'arborescence, ce qui n'est pas le cas en mécanique.

La méthodologie de développement Nous avons vu que l'une des raisons de la réussite de l'industrie des circuits intégrés sur silicium tient au fait que la fabrication et la conception fonctionnelle sont clairement démarquées, la conception se déroulant dans un cadre confiné de fabricabilité (cf chapitre 3.1.2). Le concepteur de circuit, à un niveau d'abstraction lui permettant de spécifier des fonctions systémiques, n'a aucune idée de la façon dont vont être réalisés ses designs. De la même façon, la complexification des systèmes fait que les dessinateurs des masques de lithographie n'ont en charge qu'une partie extrêmement restreinte des circuits. Ces dessinateurs sont les véritables équivalents de l'opérateur des machines outils, en effet, les opérateurs de salle blanche de production industrielle ne font que régler les machines pour y enfourner les wafers de silicium, sans avoir aucune idée de ce qu'il y a dessus. Il leur est impossible de comprendre les fonctions

réalisées par le système global.

D'un autre côté, dans le domaine de produits mécaniques manufacturés avec opérations d'usinage par exemple, nous avons insisté sur le fait que l'intégration produit/process, c'est-à-dire la prise en compte des contraintes de fabrication à toutes les étapes du développement du produit est un atout majeur. On se situe donc dans une approche complètement opposée à ce niveau, en impliquant les fabricants dans la conception du produit selon les préconisations de l'ingénierie concourante. Si l'on souhaite faire un parallèle dans le domaine de l'intégration produit/process, on peut rapprocher les équipes de création des règles de dessin du *Design Rule Manual* et les créateurs d'outils d'intégration de fabrication.

Tableau récapitulatif

Mesure	VLSI	Système mécanique
Caractéristique du produit	monolithique, intégration des composants fonctionnels, <i>packaging</i>	assemblage divers de composants extrêmement variés, ergonomie
Type de problèmes	selection et configuration	tous types de problèmes selon Ullman
Complexité des représentations	lexique limité et géométrie simple, 2D et demi	lexique extrêmement vaste et formes complexes en 3D
Relation forme / fonction et potentiel de décomposition	"bijection" composant / fonction à de très nombreux niveaux d'abstraction	très interdépendant et très souvent indécouplables
Méthodologie de développement	prescriptive, systématique, automatique, séparation franche conception/fabrication	guidée, structurée, collaborative, intégration du cycle de vie

tableau comparatif VLSI et systèmes mécaniques

Les caractéristiques intrinsèques des MEMS ont été proposées au terme de la première partie, elles sont issues aussi bien d'une miniaturisation de systèmes mécaniques que d'une adaptation de la micro électronique.

En effet, même si on peut identifier des blocs fonctionnels, ceux-ci sont de nature plus complexe et dépendants les uns des autres que les éléments de base de la microélectronique. Plutôt qu'un agencement, ils nécessitent souvent un redimensionnement afin de valider les performances attendues, quand ce n'est pas une re-conception totale.

Au niveau des modes de représentation du produit, les structures sont également en deux dimensions et demi (2D 1/2) mais la taille des composants et des motifs varie bien plus dans le cas d'un MEMS que d'un circuit intégré.

Un produit de type MEMS est à la charnière entre les deux mondes. Nous pensons que la différence qui existe cependant entre ces mondes, et notamment au niveau méthodologies de développement, fait que le processus de conception d'un MEMS n'appartient à aucun des deux mondes. Il utilise certaines méthodes de chacun des deux mais il peut aussi nécessiter la création de nouvelles méthodes. Dans le chapitre suivant nous nous intéressons aux méthodes adaptées à la conception de MEMS puis nous étudierons certains outils d'aide pour des étapes spécifiques de la conception.

3.2 Des méthodes adaptées à la conception de MEMS

Dans ce chapitre, nous allons détailler le processus de conception adapté aux micro systèmes électromécaniques à travers plusieurs approches. Tout d'abord, nous expliquerons les implications de l'approche *concurrent engineering* dans le développement de MEMS, approche quasiment obligatoire par la nature même du produit. Nous nous attacherons alors à comprendre les implications des approches DFTest. Puis nous décrirons le travail de l'équipe de fiabilité et son apport en terme de validation de connaissances à divers niveaux de maturité. Nous regarderons ensuite les apports d'une méthode de conception très structurée, à travers les travaux de la National Science Fondation qui affichent une volonté de rapprocher la conception de MEMS de celle des circuits micro électroniques. Enfin, nous détaillerons les diverses descriptions du processus de conception d'un MEMS selon une approche *top-down*.

3.2.1 Une approche *concurrent engineering* obligatoire pour les MEMS

À l'origine le *concurrent engineering* faisait partie du domaine des produits mécaniques (historiquement du moins cf chapitre 3.1.1). Cependant, il s'adapte bien à la conception des micro systèmes intégrés, comme le montrent, avec une vision très globale, Myers et al. [MMCM00]. Pour eux, la caractéristique principale vient de la différence entre assemblage et intégration (c'est-à-dire fabriquer déjà assemblé). De plus, ils proposent que les acteurs très spécialisés responsables des différentes parties d'un cahier des charges global pour MEMS (à savoir détecter, traiter l'information, agir localement et communiquer) doivent interagir et concevoir sans aucune idée de hiérarchie dans les statuts ou les responsabilités. Ce sont des concepts inhérents au *concurrent engineering*. La figure 3.17 montre dans le cas de la fonction détection que les trois aspects R (recherche), D (développement), A (application, au sens de produit commercialisé) doivent être coordonnés pour l'optimisation du système final, cette représentation apporte une dimension d'intégration supplémentaire au traditionnel R vers D vers A simultanés, qui mènent à l'assemblage du système final.

Dans la conception des circuits intégrés, on considère que différentes disciplines coexistent de la même façon que pour une conception mécanique. Le test avant fabrication est une des étapes fondamentales de la conception d'un circuit intégré et il ne peut être réalisé manuellement, mais le concepteur peut améliorer le degré de testabilité de son "morceau" de circuit en insérant très tôt cette contrainte dans son cahier des charges. Cela revient à des notions de DFT. TEN [TJ94] est un environnement informatique qui a été développé par Siemens Nixdorf Informationssysteme (SNI) afin de créer une méthodologie

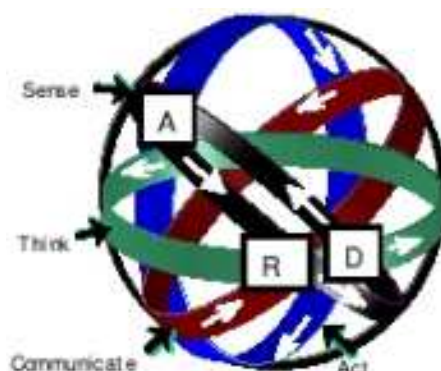


FIG. 3.17 – R vers D vers A dans chacun des quatre grands axes de fonction des microsystèmes

Source [MMCM00]

prenant réellement en compte la testabilité des circuits, TEN est d'ailleurs décrit comme un "*Concurrent Test Engineering Environment*". Il repose sur plusieurs principes :

- Le *First Time Right*
- Une stratégie basée sur des contraintes de testabilité sur toute la vie du produit d'un point de vue économique
- DFTest
- La prise en compte d'un grand nombre d'erreurs de conception par les outils
- L'intégration
- Un ensemble d'outils adaptés à toute conception de circuits intégrés
- Support pour de multiples standards de systèmes

Le *Design for Test* est une approche fondamentale dans l'industrie de la microélectronique et a été fort développé. Mais ces méthodes semblent plus facilement adaptables pour la microélectronique digitale voire analogique que dans le cas des MEMS car les défaillances rencontrées peuvent être aussi d'ordre mécanique, avec des ruptures de la structure elle-même ou bien des problèmes totalement spécifiques tels que les couches sacrificielles qui ne sont pas totalement gravées et donc ne libèrent pas les structures. Dans le domaine des MEMS, les équipes de test et de fiabilité en sont encore aux prémices, nous allons voir pourquoi en détaillant le travail de l'équipe de fiabilité.

3.2.2 Une validation des connaissances de fabrication non matures : l'équipe de fiabilité, vers le MEMS-DFTest

En microélectronique, on connaît maintenant bien les principaux mécanismes de défaillance, à travers de nombreuses plaques de test et des contrôles statistiques permanents depuis de nombreuses années. Les procédures de test standards ont été mises en place et continuent d'enrichir les bases de données de connaissances en fabrication. De nouvelles procédures de test sont mises au point en recherche et développement sur les nouvelles structures et sur les nouvelles technologies de fabrication.

Lors de l'apparition d'une technologie nouvelle, immature, l'équipe de fiabilité (en

collaboration avec les technologues de salle) s'emploie à la qualifier et ce sur des durées de 10 à 20 ans. Ils créent des batteries de tests, sur un certain nombre de lots, sur un certain nombre de puces, afin de produire des documents tels que des plans de qualification : des ADCS. Ces documents s'appliquent lors de l'apparition de nouveaux designs, de nouvelles dimensions de géométrie ou bien de changement de matériaux. Une fois la qualification réalisée en laboratoire, on passe à des étapes de *monitoring* en salle blanche où finalement le passage à l'étape de production est suivi. Par exemple, chaque série de dimensions de largeur de grille de transistor a fait l'objet de la séquence qualification/*monitoring*. Ces largeurs sont classées plus ou moins chronologiquement 6, 7, 8, 9... Pour donner un ordre de grandeur, 6 correspond à une largeur de grille de 0.35 microns, 10 de 0.09 microns. Les plans de qualification (c'est-à-dire les procédures et les outils de tests) sont validés puis servent à produire des rapports de qualification qui sont à communiquer aux clients.

Pour une qualification, trois lots par exemple, sont choisis au hasard afin d'être testés en laboratoire (ces tests peuvent prendre environ une semaine, des méthodes étant disponibles pour accélérer le vieillissement des circuits en utilisant des lois d'extrapolation qui passent de quelques semaines de test à des comportements sur des dizaines d'années, etc.) avant le passage à la production. Les outils utilisés en laboratoire sont des étuves pour réaliser des recuits, des machines de cyclage thermique, les classiques oscilloscopes, voltmètres... On trouve aussi bien sûr des ordinateurs avec cartes d'acquisition et logiciels statistiques créés pour ces applications. On vérifie ensuite grâce au *monitoring* en salle blanche s'il y a des dérives sur les procédés, avec des techniques statistiques.

Dans le domaine de MEMS on se heurte à des problèmes majeurs, "erreurs" de jeunesse pour la plupart, et surtout des manques de connaissances :

- Manque de connaissances des mécanismes de défaillances (un mécanisme de défaillance est une suite d'événements qui mènent à un défaut, lors de la fabrication ou lors du fonctionnement, un mode de défaillance représente la façon dont le défaut va influencer le comportement du système)
- Manque de connaissances des tests à effectuer (par exemple, les tests qui permettraient de mieux maîtriser les insuffisances de gravure lors des libérations de membranes ne sont pas connus)
- Manque de connaissances des lois d'extrapolation sur la durée de vie
- Manque de connaissances en mécanique à ces échelles et sur ces matériaux

De la même façon, des échantillons et des machines de test manquent. En effet, la production des circuits intégrés étant grandement prioritaire dans les grandes entreprises sur les efforts de recherche et développement en MEMS, la quantité de plaques que l'on peut faire passer entre deux lots de puces est infime. En laboratoire, les machines et outils sont les mêmes que pour la microélectronique mais les logiciels de traitement sont encore à développer...

L'apport de l'équipe fiabilité est pourtant essentiel dans la mesure où il permet de faire remonter des contraintes de fonctionnement dans le temps. Ce qui peut se traduire en terme de règles de dessins (si une structure supposée bonne car classique et validée en FEM casse pour une durée de vie très inférieure à l'attente par exemple), de spécifications de processus, de mécanismes d'usure. Si on prend l'exemple des poutres

reliant les structures suspendues au bâti, les modes de fracture, les endroits de cassure, les géométries prônes à fractures, etc. doivent être prises en compte dans une conception ultérieure. L'équipe de fiabilité valide les connaissances afin d'agréments le corpus des méthodes de fabrication. C'est en effet dans ce domaine que les connaissances évoluent le plus rapidement et sont donc soumises à des problèmes de maturité. En ce sens, cet acteur tient un rôle particulier dans la conception, il n'agit pas directement sur le produit.

A terme, les connaissances des fautes de géométrie et des dysfonctionnements des MEMS seront donc injectées dans les étapes de conception par l'intermédiaire de cette validation et capitalisation des savoirs. De nombreux travaux vont dans ce sens, notamment ceux de Benoit Charlot au TIMA [Cha01]. Ces connaissances sont très proches des procédés de fabrication. Elles interviennent dans les étapes de conception détaillée, voire d'optimisation des géométries plutôt que lors des étapes de conceptualisation. Dans le cas d'une conception en accord avec les principes DFT, ces informations sont capitales car elles orientent le concepteur à s'attarder sur certaines parties de son produit.

3.2.3 Une volonté de tendre vers le "*structured design*"

En 1995 un colloque s'est tenu au California Institute of Technology à Pasadena, CA, USA, sponsorisé par la National Science Foundation (NSF) afin de réfléchir sur le potentiel des méthodes très structurées de conception de l'industrie de la microélectronique VLSI dans le domaine des MEMS [Ant95]. Les questions principales abordées durant le colloque portaient sur :

- les méthodes de synthèse automatiques ou semi-automatiques pour générer des masques de lithographie,
- les besoins en terme de simulation de fonctionnement mécanique et électrique,
- les langages de description afin de faciliter les échanges d'informations entre recherche, conception, fabrication et test des MEMS,
- les besoins en terme de simulation des processus de fabrication.

Toutes ces questions vont dans le sens d'une adaptation plus ou moins rapide de la philosophie de conception VLSI et se basent sur le fait qu'il existe de nombreux points communs entre une structure MEMS et un circuit intégré. Les caractéristiques intrinsèques des circuits intégrés font que ceux-ci se prêtent particulièrement bien à des méthodes très structurées et automatisées de conception, que ce soit d'un point de vue fonction ou bien réalisation physique comme nous l'avons décrit dans le chapitre 3.1.3.

Mais dans le cas des MEMS, nous avons mis en évidence la complexité des motifs et la variation de taille. De plus, même si on peut identifier des blocs fonctionnels ceux-ci sont de nature plus complexe et dépendant les uns des autres que les éléments de base de la microélectronique et nécessitent souvent un redimensionnement afin de valider les performances attendues, quand ce n'est pas une re-conception totale.

De plus, les géométries mises en jeu ne sont souvent pas de simples rectangles mais des polygones dont les angles ne sont pas limités aux angles droits, voire des formes circulaires, elliptiques ou bien polynomiales... Dans le cas de ces géométries non Man-

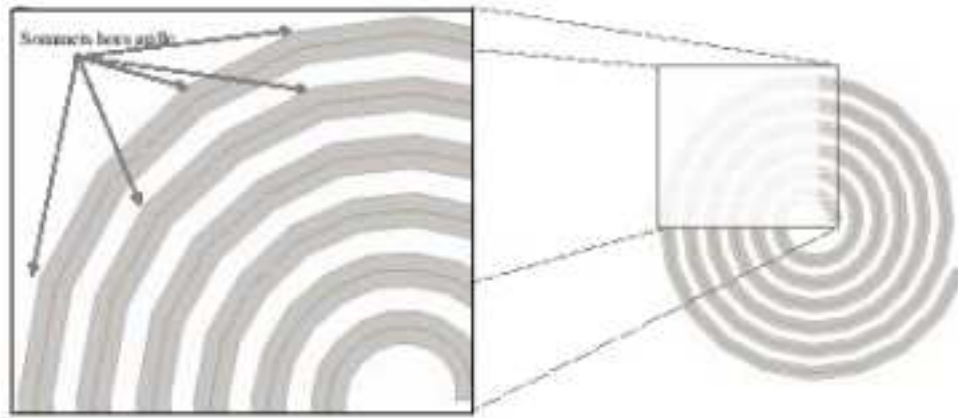


FIG. 3.18 – Un exemple de transformation/pixelisation d'une forme non Manhattan.

hattan, des logiciels transforment les formes gauches en polygones avec de nombreuses arêtes et sommets, méthode très gourmande en temps de calcul et en masse de données [Jun03] (un cercle peut être décrit simplement par les coordonnées de son centre et son rayon ou bien par une myriade de points selon le niveau de précision...) (cf figure 3.18).

Les bibliothèques de composants, les méthodes avancées de simulation et d'analyse, et l'étape de synthèse directe depuis une représentation schématique vers le layout sont les bases de cette approche. Mais la principale question soulevée reste celle de la représentation des systèmes en eux-même. Quelles sont les informations qui définissent le mieux une structure MEMS ? Sa géométrie finale en 3D avec les matériaux utilisés ou bien le layout des masques ? Faut-il garder les informations sur les structures ou bien sur les fonctions réalisées ? Un modèle du processus de conception suivant ces préconisations est présenté (cf figure 3.19). On y voit clairement la délimitation franche entre conception et fabrication même si des informations sur la technologie sont présentées comme une donnée d'entrée lors de la création des bibliothèques de composants. La préconisation est une synthèse directe depuis les descriptions schématiques vers le *layout* mais aussi une étape de vérification automatisée de celui-ci qui sert d'itération en apportant un retour sur la conception *via* la bibliothèque de composants. Cette approche cherche à éviter que la fabrication serve d'itération dans le processus de conception. Il n'y a donc pas de retour après le processus de fabrication/test achevé. La séparation conception/fabrication est toujours présentée comme un idéal à atteindre, notamment pour se débarrasser des cycles de prototypages. Le masque de lithographie n'est plus présenté comme le point central de la conception mais bien comme un aboutissement (de manière automatisée) du travail de conception qui porte sur les descriptions de plus haut niveau d'abstraction.

En résumé, cette méthode très structurée et proche de celle utilisée dans le cas VLSI repose sur les trois avancées suivantes :

- Création d'un langage de type HDL spécifique pour les MEMS : pour pouvoir utiliser les méthodes automatiques de génération de layout à partir de niveaux supérieurs de description et surtout supporter les formes complexes.
- Création de bibliothèques de composants lors d'un passage réussi à la fabrication : afin d'aller dans le sens des courants *re-use* et de favoriser l'approche *bottom-up*.

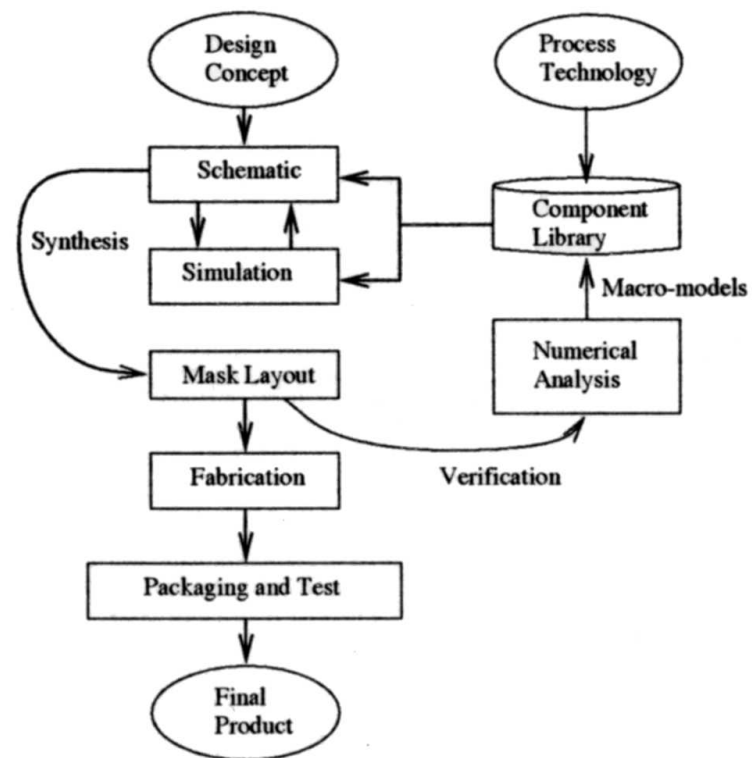


FIG. 3.19 – La proposition de NSF en terme de processus de conception de MEMS
(Source [[Ant95](#)])

- Création de méthodes et d'outils d'analyse et de simulation multi-domaines : pour limiter voire éliminer les étapes de prototypage.

3.2.4 Mais un processus plus complexe : *top-down "meets" bottom-up*

Un grand nombre d'applications, peu en production effective mais beaucoup fonctionnant au moins comme démonstrateurs, ont prouvé les possibilités du domaine des MEMS. Certaines sont devenues des standards, ou des classiques, ce qui permet aux concepteurs de se baser sur une bibliothèque de solutions lors de ses recherches conceptuelles (à l'instar des typiques et très académiques solutions macro pour réaliser des pivots : montage de roulements, paliers lisses autolubrifiants, etc.). Ainsi les spécifications du cahier des charges entrent directement dans la recherche de solutions mais aussi dans les étapes postérieures de conception détaillée et d'optimisation.

De nombreux auteurs proposent des modifications de l'approche top-down classique, par exemple McCorquodale [MGK⁺03] amène une notion de parallélisme de trois domaines sur la figure 3.20.

On voit, sur cette proposition, qu'il y a une conception en parallèle des parties électronique digitale, électronique analogique et mécanique. On voit aussi apparaître des étapes de simulation et vérification *cross-domain* c'est-à-dire prenant en compte la totalité du système. Ces étapes de vérification et de coordination des trois conceptions en parallèle apparaissent à deux moments particuliers : après une modélisation comportementale de chacun des domaines afin de vérifier les contraintes des uns sur les autres et pour homogénéiser les représentations. Une fois cette étape de structuration des données effectuée, on a une nouvelle vérification *cross-domain* sur la totalité du système. La présence d'une bibliothèque de composants dans la partie strictement électronique montre une volonté de profiter de la maturité et des possibilités d'une approche *bottom-up* dans les parties proches voire issues du VLSI, cette bibliothèque arrive cependant relativement tard dans le processus (notamment après la première vérification comportementale). La bibliothèque de processus de fabrication n'intervient que dans la partie de conception mécanique car les autres conceptions, selon les principes de conception VLSI, ont lieu dans des espaces bornés par les règles de fabricabilité non négociables. Nous avons déjà vu que pour la partie mécanique, la maturité des connaissances et la diversité des applications ne le permet pas. En revanche, cette bibliothèque apparaît très tôt dans le processus de conception de ce domaine. En effet, pour pouvoir mener une analyse par éléments finis nécessaire à cette approche avant la vérification *cross-domain*, il faut avoir une géométrie quasiment complète du produit, avec la disposition des couches et donc l'enchaînement des étapes de fabrication. Une fois la deuxième vérification globale du système effectuée, on passe à l'extraction automatique du *layout* qui sera vérifiée avant de produire les masques. L'ensemble des étapes suivant la vérification du système est réalisé avec les outils de la technologie VLSI car les trois domaines sont alors décrits dans un langage commun, au format des outils VLSI.

D'autre part, Fedder [Fed00] détaille la conception d'un MEMS comme suit :

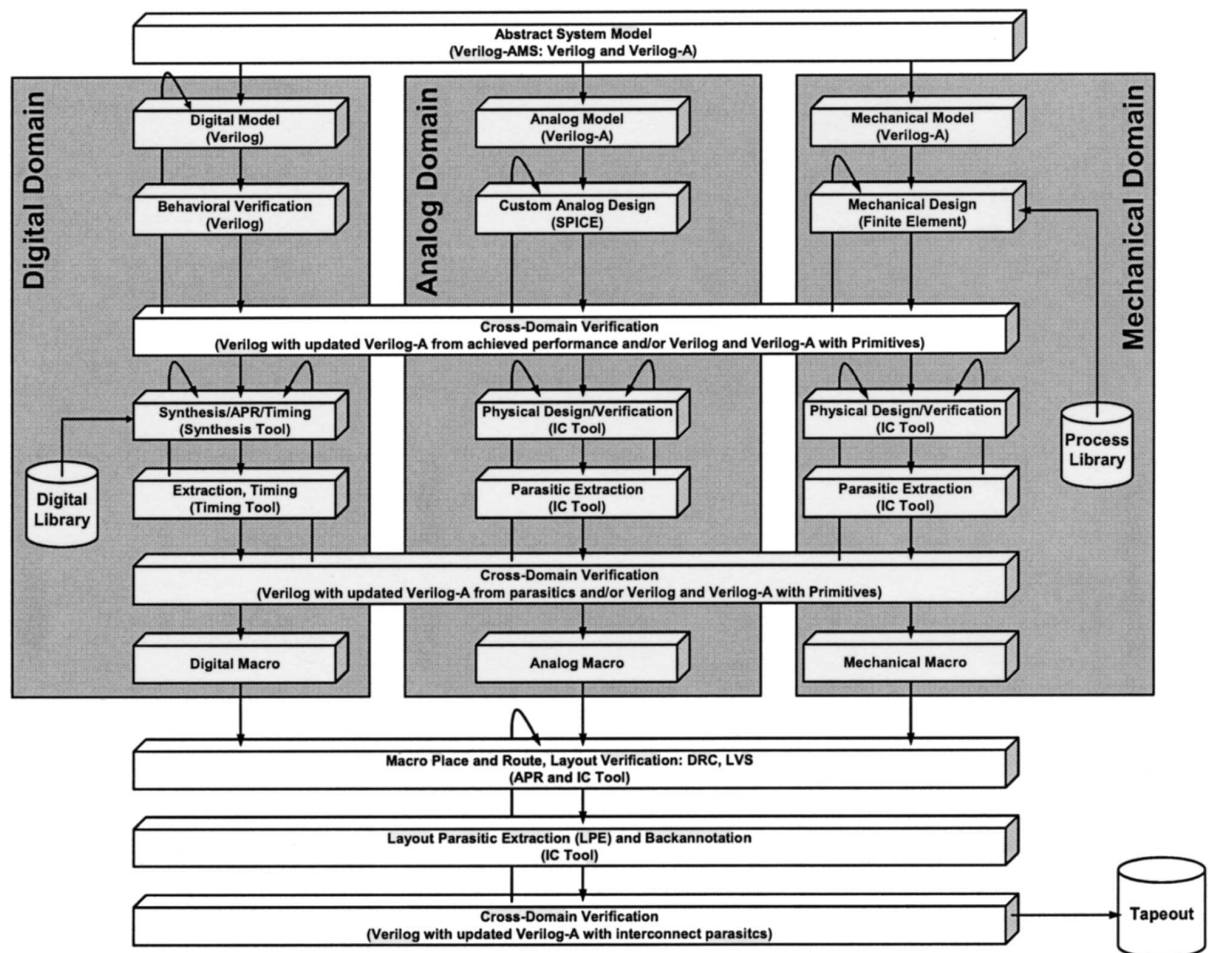


FIG. 3.20 – Une proposition d'approche top-down pour les MEMS
(Source [MGK⁺03])

1. Clarification du cahier des charges	C'est un travail de précision sur le cahier des charges initial, il détaille à ce moment les fonctionnalités principales du produit. Ce sont souvent des spécifications très techniques pour des fonctions uniques, par exemple dans le cas d'un filtre électromécanique de type résonateur les spécifications de départ sont : fréquence centrale, largeur de bande de fréquence, bande passante, gain et bruit.
2. Génération de concepts de solutions	Pour cette recherche sur les principes de fonctionnement, on procède souvent par analogie avec des solutions existantes ou bien en évaluant des principes physiques permettant le fonctionnement imaginé par le concepteur.
3. Embodiment	A partir des idées de solutions, on aboutit à la géométrie provisoire du produit, celle-ci sera amenée à être modifiée par la suite mais elle restera similaire dans ses grandes lignes. Typiquement, le domaine des possibilités technologiques oriente grandement le développement du produit. Dans le cas du filtre cela définit aussi le nombre de structures de résonateurs, le type de matériaux, le concept utilisé pour les poutres/ressort de couplage...
4. Conception détaillée - Optimisation et vérification	Cette phase précise la géométrie du produit en y ajoutant des contraintes qui n'étaient pas forcément présentes dans le cahier des charges initial, orienté fonctionnalité. En décomposant suffisamment le système, on arrive à un niveau d'abstraction (aux deux sens décrits dans le chapitre 3.1.2) où les outils d'analyse et/ou de simulation peuvent permettre une évaluation de la géométrie et des principes de solution.
5. Evaluation physique, prototypage	Le produit passe en fabrication, puis en caractérisation. Idéalement, cette étape commencerait bien plus tôt (étape 3 par exemple) si des processus de fabrication non standards sont nécessaires et qu'il faut les développer en parallèle avec le produit.

L'approche top-down selon Fedder [Fed00]

Cette description est une adaptation en cinq points de l'approche *top-down* de Pahl et Beitz [PB96] que nous avons détaillée au chapitre 3.1.1. Dans cette description du processus, Fedder insiste sur le fait que, dans des cas de plus en plus nombreux, les concepteurs se sont attachés à produire des modèles paramétrés d'éléments standards. Ces éléments doivent pouvoir valider les performances attendues en terme de fonctions aussi bien qu'en terme de succès de la séquence de fabrication uniquement par des moyens de dimensionnements des paramètres. Par exemple, dans [MF97] on trouve des exemples de structures suspendues avec actionnement par peignes interdigités générés automatiquement selon des spécifications de départ telles que fréquence de résonance (cf figure 3.21).



FIG. 3.21 – Génération automatique de résonateurs en fonction de spécification fonctionnelle

(Source [MF97]) (fréquence de résonance, de haut en bas : 3kHz, 10kHz, 30kHz, 100kHz et 300 kHz)

Conclusion sur les méthodes de conception de MEMS

La conception de MEMS se prête d'autant plus particulièrement à la conception en *concurrent engineering* avec sa pluridisciplinarité fondamentale, encore plus marquée que pour les circuits intégrés, car dans le type même des produits conçus les notions d'intégration sont fondamentales. Mais l'expérience industrielle prouve que l'on n'est encore dans le cas d'une approche séquentielle de type *top-down* avec des itérations très coûteuses lors d'étapes de fabrication sur des produits avec peu de chances de réussite. Selon Fedder et Mukherjee [MF97], l'étape de prototypage remplace souvent la simulation en temps qu'itération dans le processus de développement du produit, ce qui est dramatique en terme de temps et de coût.

Nous avons mis en évidence le statut particulier de l'équipe de fiabilité. Elle n'agit pas directement sur le produit mais valide les connaissances de fabrication et permet d'enrichir le corpus de possibilités technologiques. Son apport est d'autant plus important que l'on connaît la rapidité d'évolution et l'aspect incertain de ces connaissances.

3.3 Des outils d'aide à la conception de MEMS

La complexité des principes physiques et les actions couplées des divers domaines mécaniques, électronique, thermique, etc. dans le fonctionnement des MEMS, font que des

outils de simulation et de modélisation sont nécessaires pour aider le concepteur. De plus, de nombreux modes de représentation très structurés sont créés pour tenter de caractériser les MEMS à diverses étapes de leur conception. En effet, le succès de la micro électronique dans l'automatisation du passage conception/fabrication passe par les langages de description formels, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.1.2. Nous avons discuté dans le chapitre précédent de la volonté de rapprocher la conception VLSI de celle des MEMS, nous verrons plusieurs exemples de représentation allant dans ce sens. Par ailleurs, certains outils de simulation de processus de fabrication existent, nous verrons que ce ne sont cependant pas des outils d'intégration métier, tels que nous les avons décrits dans le chapitre 3.1.1.

3.3.1 Des outils de simulation, FEM ou analytique

Les outils d'aide à la modélisation et au calcul : Sugar, Solidis... SOLIDIS [FKB⁺97] est un environnement informatique qui permet l'analyse couplée multiphysique des micro systèmes de type actionneur. Il prend en compte les effets électrostatiques, thermomécaniques et piézoélectriques. C'est un logiciel basé sur la théorie des éléments finis mais dont les éléments sont spécialement taillés pour les champs couplés. Les principaux problèmes de la simulation FEM, dans le cas des microsystèmes MEMS, sont la non-linéarité et le fait que le mouvement résultant du champ qui l'a créé modifie la géométrie et donc le champ lui même (par exemple, dans le cas d'une activation électrostatique, le champ électrique, et donc la force d'attraction des structures, dépend directement de la distance entre les électrodes; c'est cette même distance que l'on cherche à modifier avec l'actionnement). L'environnement SOLIDIS se présente comme un ensemble d'outils informatiques dont les concepts et les algorithmes sont optimisés pour prendre en compte ces difficultés. Les résultats sont classiquement donnés sous forme de représentations graphiques en 3D et permettent de visualiser des déformations, champs de contraintes ou de températures, etc. (cf figure 3.22)

Le principal problème des méthodes par éléments finis est le coût en temps de calcul si le système modélisé est trop important.

De nombreuses simulations de structures MEMS peuvent se réaliser analytiquement, sans faire appel aux éléments finis. Le logiciel SUGAR, de l'Université de Californie à Berkeley, est basé sur un module de MatlabTM et propose des simulations modales et fréquentielles pour des structures MEMS. Sugar v2.0 supporte l'import des géométries dans le format standard CIF et il donc est compatible avec les logiciels de dessin VLSI industriels tels que CadenceTM. L'avantage certain de ce type de simulation est de pouvoir paramétrer et étudier l'évolution d'un critère de conception (l'angle de rotation d'un micro miroir dans l'article [CBW⁺02], ou bien des fréquences de résonance pour l'étude que nous avons menée dans le cadre d'un projet de fin d'étude d'un étudiant (voir chapitre 5)), en fonction de paramètres géométriques (cf figures 3.23 et 3.24)).

Mais la réalité industrielle est toute autre. Certains concepteurs utilisent souvent des routines personnelles implémentées sur des logiciels tels qu'ExcelTM ou MatlabTM dans lesquels ils utilisent leurs modèles analytiques personnels, ou des analogies électriques ou mécaniques (selon leur formation) (cf figure 3.25). Ces analyses leur donnent des tendances

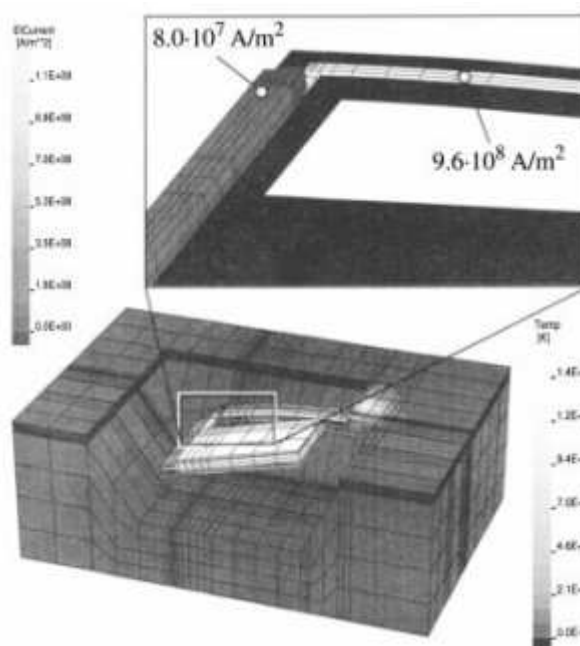


FIG. 3.22 – L'environnement SOLIDIS
Résultats en terme de déformation et de distribution des températures pour un actionnement thermomécanique (de type bilame) (Source [FKB+97])

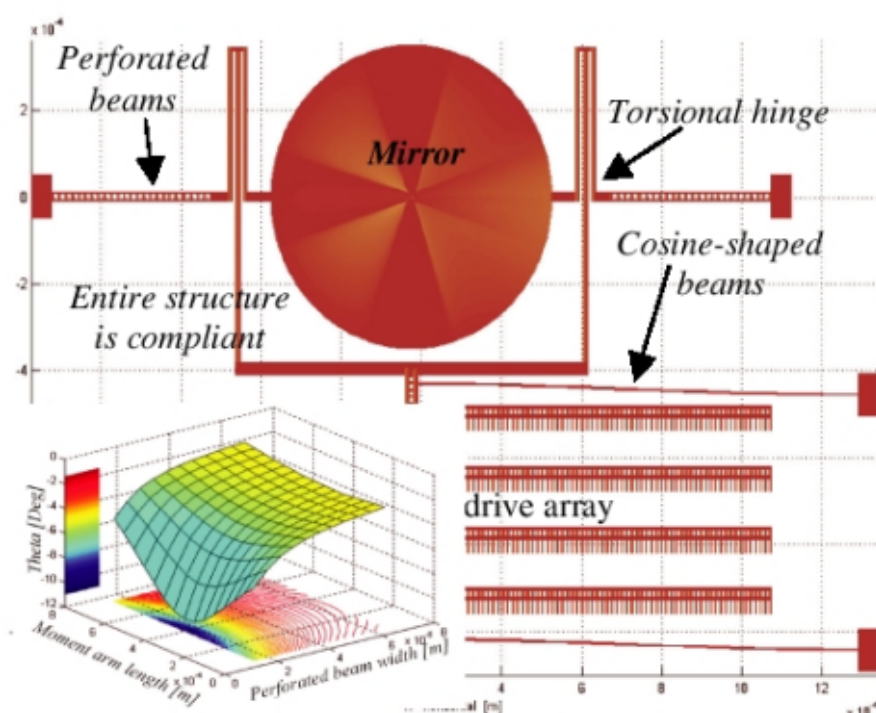


FIG. 3.23 – Analyse paramétrée sur Sugar
Résultats en termes de rotation du miroir en fonction de paramètres géométriques (longueur de poutre...)

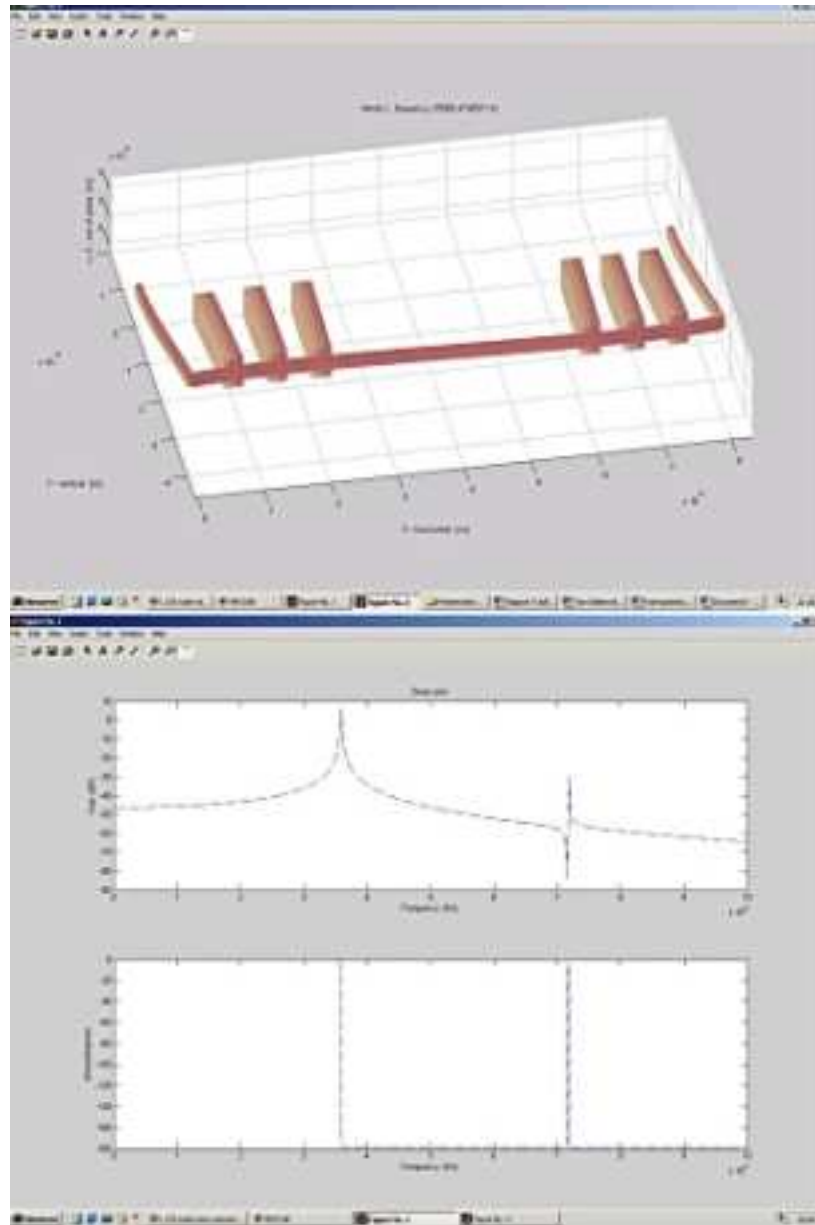


FIG. 3.24 – Analyse modale sur Sugar
Fréquences de résonance pour un actionnement à peignes électrostatiques

Domaine d'énergie			
Electrique	Résistance	Capacité	Inductance
	$U = Ri$	$C \frac{dU}{dt} = i$	$U = L \frac{di}{dt}$
Mécanique	Frottement fluide	Masse	Constante de raideur
	$F = k \frac{dx}{dt}$	$F = m \frac{d^2x}{dt^2}$	$F = kx$
thermique	Résistance thermique	Capacité thermique	
	$\Delta T = R_n \phi$	$C \frac{dT}{dt} = \phi$	—

FIG. 3.25 – Equivalences électriques
(Source [Cha01])

de variation pour ensuite concevoir le composant MEMS avec leur expérience personnelle. Pour eux, les "gros" outils ne sont pas assez réactifs et, de toute façon, ils ne cherchent pas une simulation précise mais, encore une fois, des tendances qui leur permettront de mieux appréhender les phénomènes physiques. Pour l'optimisation, cela se passera après les tests sur le prototype en salle de caractérisation.

Outils intégrés spécifiques MEMS vs outils génériques Dans le commerce, la simulation et la CAO pour les MEMS n'ont pas été oubliées. On voit apparaître des environnements "tout intégrés", permettant de concevoir un micro système électromécanique complètement et aboutir à des dessins de masques de lithographie pour toutes les étapes du processus de fabrication. Parmi ces logiciels (ou ensembles de logiciels), on trouve par exemple CONVENTORWARETM et MEMCADTM.

COVENTORWARE⁹ est un environnement informatique qui propose une aide intégrée comprenant quatre modules :

- ArchitectTM,
- DesignerTM,
- AnalyserTM,
- IntegratorTM.

Cette plateforme CAO permet une conception de détecteurs et de RF-MEMS en *semi-custom* à travers l'utilisation d'une bibliothèque de nombreux composants. Ces blocs réutilisables sont supposés être *Ready-to-fab* (c'est-à-dire avec garantie de fabricabilité) car ils utilisent des procédés de fabrication standards (par exemple issus des technologies MUMPS des fonderies multi utilisateurs).

ArchitectTM permet cette conception en agencement de cellules tandis qu'avec DesignerTM on peut créer des *layouts* et produire sa propre séquence de fabrication à l'aide d'une base de données de matériaux et de procédés de fabrication (par exemple dépôt CVD, gravure anisotrope...). DesignerTM produit automatiquement une vue en 3D et exporte dans tous les formats standards (GDS II, CIF...).

⁹<http://www.coventor.com>

AnalyserTM effectue des analyses depuis DesignerTM et propose un module de simulation par éléments finis. On peut utiliser IntegratorTM pour envoyer ses conceptions dans des logiciels de dessin de micro électronique, tels que CadenceTM ou SynopsisTM afin de faire le lien avec les procédés de fabrication des lignes industrielles VLSI.

Dans le cas d'une création personnelle, sans utilisation de la base de composants, une séquence d'utilisation de CoventorTM peut se dérouler comme suit :

- définition et posage des différentes couches,
- dessin des masques en 3D (layout),
- maillage de la vue 3D en éléments finis et précision des conditions aux limites (tensions, encastrements...),
- simulation pour validation en terme de fonctionnement (par exemple sous la forme de champs de contraintes et de déplacement)

La géométrie 3D ne peut être obtenue que lorsque le concepteur a décrit toutes les étapes de fabrication de son produit ainsi que l'intégralité des masques. On obtient donc une représentation du produit déjà dans une certaine forme de finalité géométrique. Il est capital que le concepteur ait une idée très précise de sa géométrie, ou du moins de l'enchaînement des étapes de la séquence de fabrication (i.e. les différentes couches), pour obtenir une représentation utilisable de sa conception.

MEMCAD [ZBG⁺99] développe un environnement de conception assistée par ordinateur qui inclut des entrées de schématisation mécanique, des cellules paramétrées pour ce qui est des parties électroniques et permet d'utiliser tous les logiciels de l'industrie VLSI. Le flot de conception supporté permet aussi bien de concevoir un système complet, que des cellules paramétrées réutilisables par l'intermédiaire d'une base de données. La figure 3.26 montre les deux approches qui permettent soit de concevoir des cellules, soit de les réutiliser. Cette plateforme de conception est très teintée par l'approche VLSI car on retrouve la séparation franche entre fabrication et conception et les étapes de vérification sont purement fonctionnelles, l'hypothèse du cadre de fabricabilité est très présente.

A l'opposé, dans l'industrie, des logiciels non orientés micro systèmes sont couramment utilisés pour la simulation. ANSYSTM ne fait pas réellement la différence entre un viaduc soumis au poids de l'eau qui passe dessus et une poutre de quelques centaines de microns soumise à une force répartie électrostatique d'un point de vue mécanique. Le principal problème, comme on l'a expliqué précédemment, est que les éléments ne prennent pas forcément en compte différents champs, ni leurs couplages. Ainsi, dans le cas de la poutre actionnée par un bilame piézoélectrique, les éléments prenant en compte la physique de la piézoélectricité ne permettraient pas (au moment où nous nous en sommes servi, une version *ad hoc* a pu sortir depuis) de procéder à des simulations en mécanique non linéaire. Le phénomène mécanique qui permet l'actionnement étant du flambement, donc hautement non linéaire, les simulations n'ont pas pu aboutir (voir annexe A).

3.3.2 Les modes de représentation pour l'optimisation

Il existe de nombreux travaux sur les façons de modéliser les micro systèmes. Ces modes de représentation sont souvent très structurés et servent principalement à appliquer des méthodes d'évaluation quantitatives sur les solutions qui ont déjà une réalité, ne serait-ce qu'en terme de géométrie. On peut citer par exemple :

- les modèles analytiques,
- les modèles de simulation par éléments finis (pour analyse structurelle, couplées, modales, transitoires...),
- les équivalents électriques (pour une intégration dans le flux de conception structuré de la microélectronique) (cf 3.25),
- la modélisation comportementale par langage de description du matériel de type HDL,
- la modélisation nodale (représentation intermédiaire entre HDL et FEM, le logiciel SABERTM, ou librairies MATLABTM).

Dans de nombreux articles, les recherches sur la méthodologie de conception amènent des modes de représentation des MEMS qui tendent à vouloir faire rentrer les éléments mécaniques et électromécaniques dans des petites boîtes paramétrées, afin de les faire cohabiter avec les bibliothèques de composants des techniques VLSI. Ces représentations très structurées ne manquent pas d'attrait. En effet, les méthodes *bottom-up* VLSI ont prouvé jusqu'ici leur efficacité au moins en termes commerciaux, et il est vrai que la maturité des méthodes et outils de simulation et d'optimisation permettent de travailler très efficacement sur une conception qui entrerait dans ce canevas. A l'heure actuelle, seuls quelques types d'applications ont atteint des réalités conceptuelles et industrielles suffisantes pour pouvoir prétendre à l'utilisation de ces méthodes. Par exemple, les traditionnelles structures suspendues de type résonateurs/accéléromètres (cf chapitre 1) font souvent l'objet de démonstrateurs. Nous présentons ici deux exemples de modes de représentation qui adaptent avec succès ces concepts.

Exemple du giroscopie : Le système "giroscopie" est ici composé de seulement trois éléments de type MEMS : des actionneurs à peignes électrostatiques, des poutres suspendues (on voit une poutre sur la figure 3.27 en bas, en tant que composant paramétré) et des plaques suspendues (aussi appelées membranes selon les applications, dans le cas du giroscopie, ces plaques ont des rôles structurel et inertiel). Le fait d'utiliser des composants standards permet de se placer dans l'approche *bottom-up* d'assemblage de briques atomiques et de concevoir le système global sans descendre aux derniers niveaux d'abstraction.

Exemple d'un résonateur suspendu par des poutres "crab-leg" : Sur ce schéma, on retrouve l'élément atomique paramétré de type "poutre" déjà présent dans la figure 3.27. En effet, la suspension de la masse est réalisée par deux poutres à 90 degrés et la figure 3.28 montre une représentation, une capture d'écran de FEM et une simulation modale directement réalisée d'après la représentation schématique.

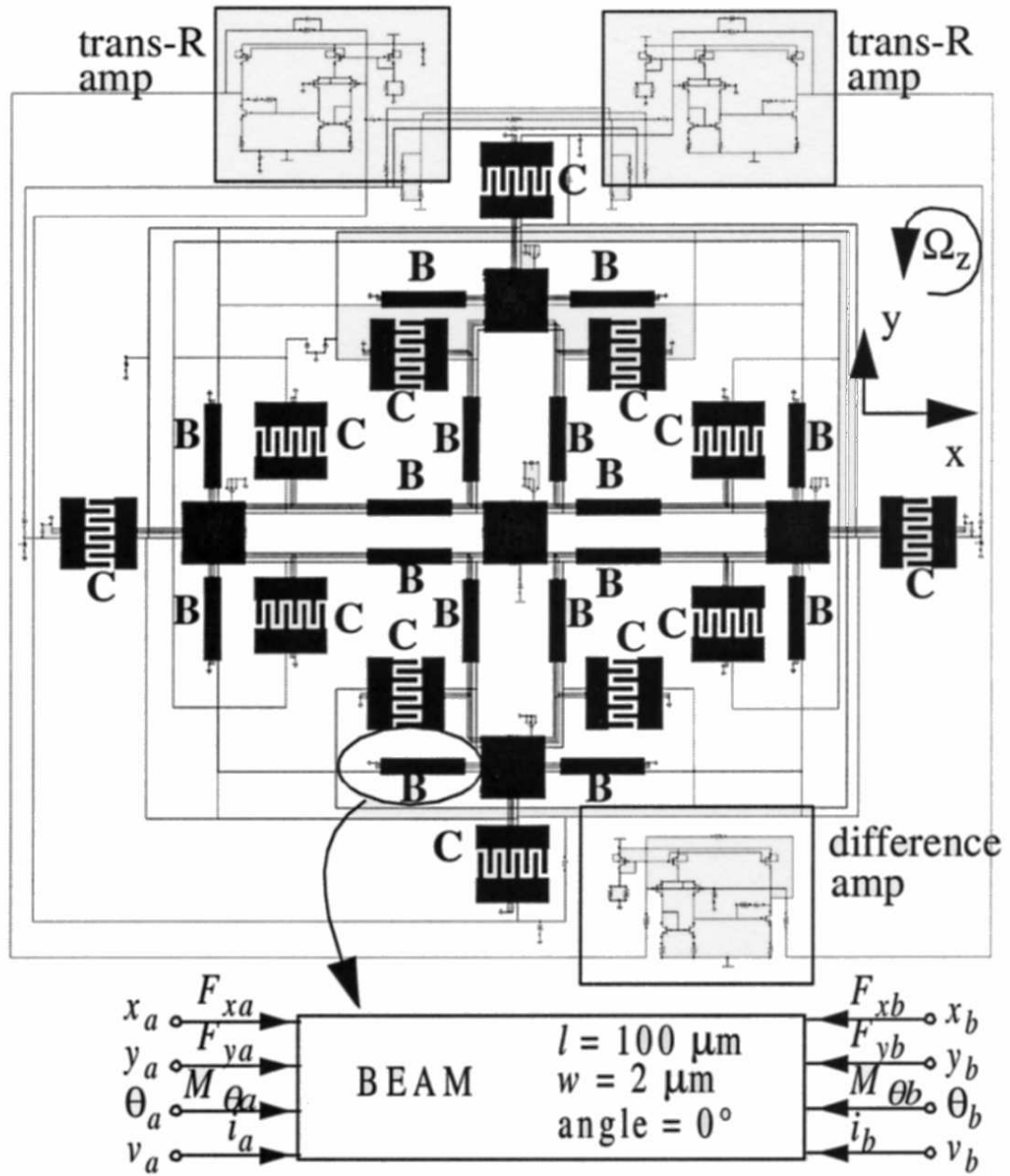


FIG. 3.27 – Schéma d'un gyroscope dans l'environnement ADI
(Source [Fed00])

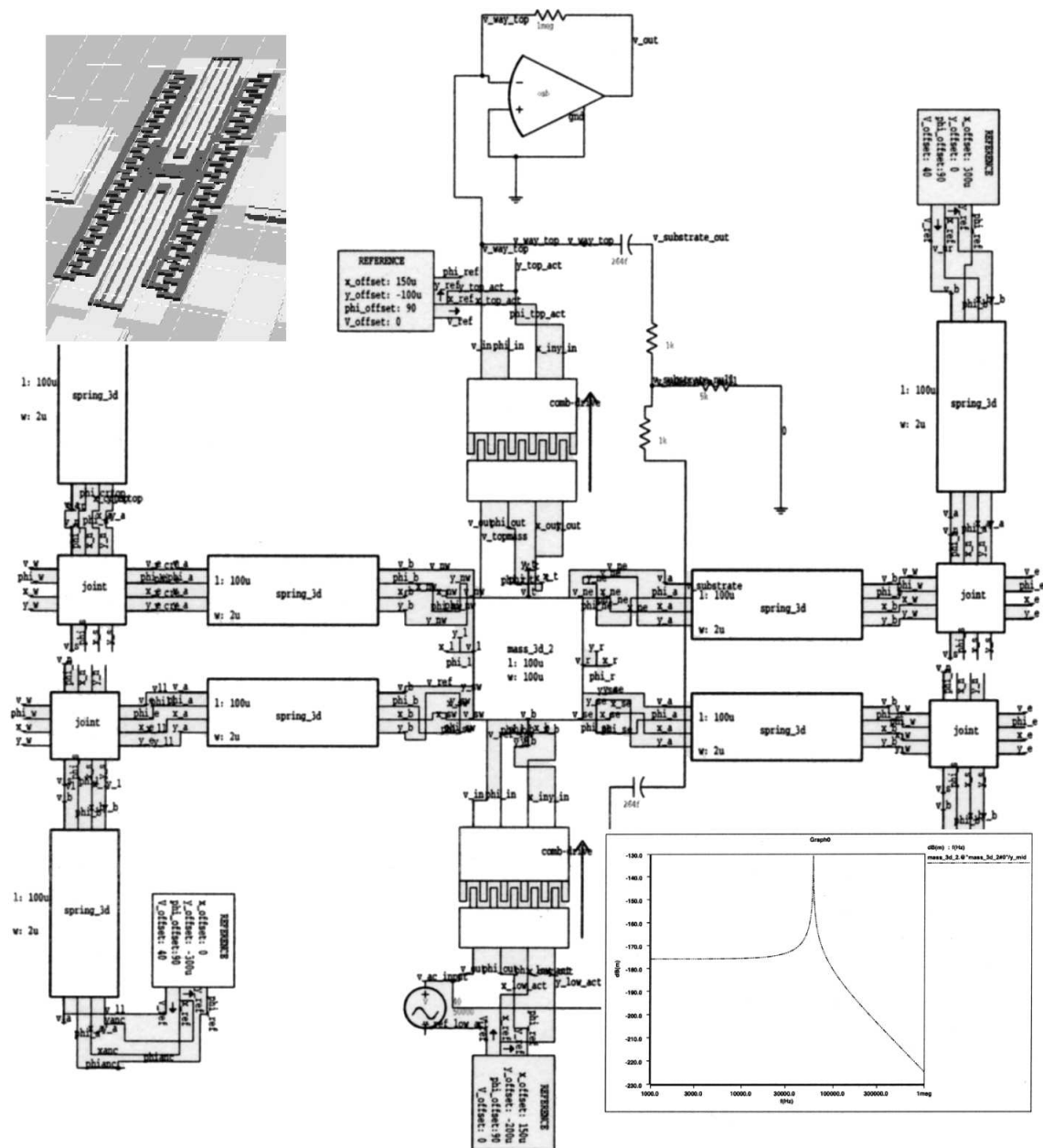


FIG. 3.28 – Une représentation d'un résonateur
(Source [MF97])

Dans ces cas particuliers utilisant des morceaux de systèmes que l'on peut désormais qualifier de "classiques", il est évident que ces modes de représentation, qui permettent alors d'utiliser les outils de simulation et d'optimisation de la CAO, apportent beaucoup à la conception. Mais seulement une fois celle-ci d'un niveau de maturité suffisant pour permettre la mise sous cette forme schématique.

3.3.3 Des aides à la génération de concept

Les générateurs automatiques de concepts *pre-embodiment* (si l'on se place dans une approche *top-down* de description du processus de conception où la phase de conceptualisation pose les bases pour les étapes suivantes) sont un genre d'outils un peu particulier. Les concepteurs doivent avoir une idée à partir de laquelle développer les séquences de fabrication et la géométrie planaire de leur produit, même si ces idées ne sont absolument pas formalisées et résultent par exemple d'un brainstorming. Les méthodes qui apportent une aide dans ces étapes très en amont dans le processus de conception sont nombreuses, les outils les supportant le sont moins. Cette étape du développement du produit transforme les spécifications du cahier des charges (prévisionnel aussi bien que fonctionnel à ce moment-là du processus de la conception) en paramètres de conception qui pourront alors être synthétisés, évalués et faire l'objet d'un classement ou d'un choix.

Dans l'industrie en général, on utilise des méthodes telles que :

- Brainstorming, travail par analogies,
- Méthode Delphi,
- USIT (unified structured inventive thinking),
- Functional synthesis model [CB96],
- FBS (function/behaviour/state) [TUY93],
- FEBS (function/environment/behaviour/structure) [DTB00], etc.

Toute la difficulté réside dans le fait que l'on travaille sur un objet qui n'existe pas. Les études, comparaisons, évaluations, choix, etc. se font *a priori* et les concepteurs font appel à toutes leurs connaissances, de manière consciente ou non. Il est très difficile de produire un design original alors que l'on en a déjà observé de nombreux lors des phases de documentation bibliographique, ou bien pour avoir travaillé dans d'autres projets similaires.

Ces méthodes utilisent en général des blocs fonctionnels, ou porteurs de caractéristiques de conception, pour mener à bien des activités de synthèse. Les concepteurs utilisent ces blocs pour construire un système ou bien ils spécifient leurs contraintes et paramètres de conception de très haut niveau et laissent le soin à des outils informatiques, par exemple, d'explorer les possibilités (par le biais d'algorithmes d'exploration de graphes ou de diagrammes). En revanche, cette étape fait grandement appel à des activités de décision et d'évaluation qui ne peuvent être réalisées par un ordinateur. L'homme reste au centre de l'activité créatrice de conception et cette phase conceptuelle est sans doute celle qui est la moins prône à l'automatisation.

Dans le domaine des micro systèmes, certains travaux s'attachent à l'adaptation de ces

méthodes en exploitant la similitude (apparente) avec la microélectronique. La plupart de ces approches ne remplissent pas leur but dans la mesure où elle s'apparentent à des conceptions de type *bottom-up*, c'est-à-dire lorsque l'effort de conceptualisation a déjà été fait lors de la production des briques de base. Zhou et al. [ZAP02] proposent une méthode hautement assistée par ordinateur qui effectue un travail d'automatisation sur des structures MEMS mais qui a plus sa place dans une démarche d'optimisation que dans une approche de conceptualisation.

De même, Gibson [GPHB99] utilise une séparation en modules comportementaux qui élève le niveau d'abstraction par rapport à la méthode précédente, mais qui se heurte au manque de généricité de modèles de comportements. Donc la méthode ne s'applique que pour un nombre limité d'applications (telles que par exemple les résonateurs électromécaniques), et a encore une fois plus sa place dans une optique d'optimisation automatisée de conception déjà effectuée.

Lu et Deng [LD04] apportent une méthode basée sur le FBS ou FEBS, auxquelles sont adjointes des notions de descriptions phénoménologiques multiphysiques mais orientées fabrication. On voit que même à un tel niveau d'abstraction, on ne peut s'affranchir d'une vue technologique. Leur approche combine donc une orientation vers la fabrication avec une recherche dans le domaine conceptuel de solutions technologiques. L'exemple pris est celui d'une micro pompe et les solutions retenues au final font intervenir une membrane déformable par actionnement magnétique. La méthode donne aussi le nombre de chambres de la pompe, ainsi que son architecture générale. Afin d'assurer la fabricabilité, des informations de type procédés de fabrication sont ajoutées aux phénomènes physiques dans leur base de données orientée principes et comportements. Ils mettent en avant la multidisciplinarité des applications MEMS comme différence principale par rapport aux phases de conceptualisation dans d'autres domaines. Par exemple, dans le cas des biotechnologies : la chimie, la thermodynamique et la biologie moléculaire seront des bases de phénomènes à prendre en compte. Il ne s'agit plus de caractériser la structure, mais aussi les différents flux d'information, ainsi que des flux physiques particuliers. Leur méthode est basée sur les flux aussi bien que sur les comportements, actions et substances échangées.

3.3.4 Les simulateurs de processus de fabrication

Nous avons largement insisté sur la prépondérance des connaissances en matière de procédés de fabrication lors des étapes de conception. Aussi, il paraît logique de trouver des outils d'intégration de la fabrication classique pour certains procédés de l'industrie du silicium.

De nombreux travaux se font dans ce sens, avec relativement peu de retombées industrielles. En effet, l'expérience prouve que les concepteurs vont négocier avec le technologue de salle qui est détenteur de la connaissance du processus de fabrication, ou utilisent préférentiellement une technologie connue par leur expérience propre. Ils n'utilisent que rarement des logiciels qui donnent des informations sur des étapes précises des séquences.

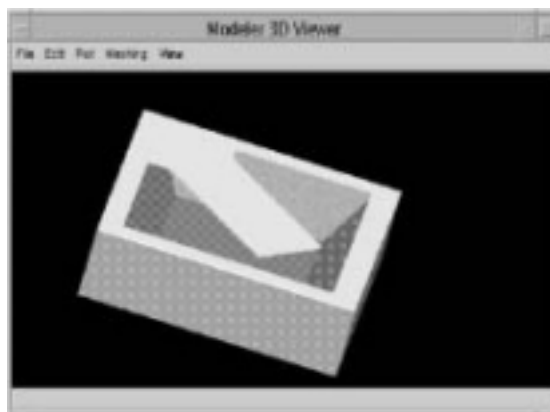


FIG. 3.29 – Outil de simulation géométrique de gravure anisotrope sur silicium
(Source [Jun03])

Il existe cependant des travaux au laboratoire TIMA de l'INPG qui proposent, par exemple, un outil de simulation de gravure anisotrope [Jun03]. Ce logiciel effectue une simulation de gravure notamment pour les cas de membranes suspendues. Une gravure anisotrope suffisamment profonde en fonction de la surface à libérer est une méthode utilisée pour suspendre des structures. Le but est de prévoir si la structure sera libérée, et éventuellement de modifier sa géométrie de masque afin de favoriser la gravure. Les paramètres d'entrée donnés par l'utilisateur se résument à la géométrie, dans un format classique CIF par exemple, et les résultats sous forme graphique (3D ou non) font l'objet d'un module de visualisation à part. Une intégration est cependant prévue dans un logiciel de simulation global et générique de séquence de fabrication. Cette simulation peut être effectuée de deux manières : géométrique (logiciel 2D ACCESIM développé au laboratoire TIMA, cf figure 3.29) ou atomistique (logiciel ACES voir figure 3.30).

On peut voir, sur ces deux exemples, que les résultats obtenus peuvent permettre au concepteur de se faire une idée sur la validité de ces étapes de son processus de fabrication. Ces outils sont bien des outils de simulation, mais pas forcément des outils d'intégration métier au sens de Blondaz[Blo99] (au chapitre 3.1.1). S'ils mesurent bien la fabricabilité d'une solution et permettent de communiquer avec les autres acteurs de la conception à travers la représentation graphique, nous n'avons aucune information sur la façon dont ils sont utilisés en réalité, ni par qui.

Par ailleurs, à l'University of California, Berkeley, certains petits outils programmés en Java donnent des indications sur des procédés de dépôts de couches (CVD, ECVD...). Ils ne présentent à notre connaissance aucune réalité industrielle et ne sont que des travaux marginaux visant plus à la diffusion de connaissances et à l'apprentissage qu'autre chose.

Conclusion sur les outils d'aide à la conception de MEMS

Les outils d'aide à la conception de MEMS sont très variés mais interviennent tous relativement tard dans le processus de développement, exception faite des outils génériques

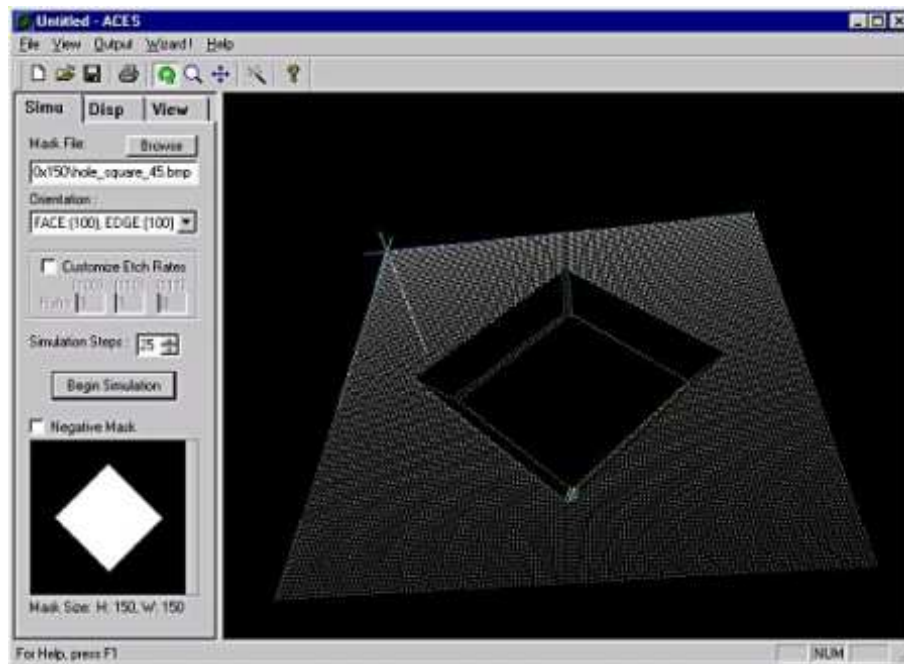


FIG. 3.30 – Outil de simulation atomistique de gravure anisotrope sur silicium
 (Source ACES :
<http://mass.micro.uiuc.edu/research/completed/aces/pages/home.html>)

de conceptualisation qui ne change que très peu pour ce domaine d'application. En effet, que ce soit au niveau simulation ou optimisation des géométries ou génération automatique de *layout*, tous réclament que le produit soit déjà clairement défini.

Chapitre 4

Une caractérisation d'un processus de conception de MEMS

4.1 Introduction, démarche de recherche

Peut-on réellement modéliser un processus de conception dans sa globalité? On sait maintenant que c'est impossible. Ne serait-ce que du point de vue de sa représentation, un processus de conception est éminemment multidimensionnel : social, cognitif, technique, dans l'action, contextualisé, suivant ou non le temps...

Le modèle que nous allons proposer ne cherche pas à décrire au plus juste le processus de conception ni à même coller de manière générique à une réalité qui de toute façon est différente pour chaque entreprise et qui est très dépendante du temps, de la maturité des technologies et de connaissances... Nous cherchons à obtenir un modèle nous permettant de mettre en évidence certains manques aux niveaux méthodologique et instrumentation. En effet, sa vocation est non normative, non prescriptive, on ne tente pas de produire un processus idéal mais bien de proposer une représentation de l'existant qui nous a été donné d'observer. Nous avons précisé que le processus de conception est à entendre en tant que réalité industrielle de l'activité, cela implique que lorsque l'on parle de modèle on ne parle que de représentations filtrées du processus. Ces représentations sont filtrées à travers plusieurs vues qui, ensemble, nous permettent d'avoir une vision plus globale.

Dans un premier temps, nous exposerons la vision multi disciplinaire et l'approche ethnographique d'observation participante qui a été menée dans cette thèse, après une brève explication et justification de l'approche. Cette étude de terrain a été conduite dans l'entreprise STMicroelectronics de Crolles ainsi que chez l'un de leur partenaire le CEA/Leti à Grenoble. Cela permettra d'exposer une grille de lecture pour cette immersion industrielle qui orientera la description du processus de conception.

Grille d'analyse des différentes dimensions d'un processus de conception

Nous avons vu au chapitre 3.1.1 que le terme de conception intégrée fait référence à plus que l'intégration de la conception dans le processus de développement de produit d'un point de vue purement technique. Cette approche sort du contexte purement technique

de l'activité de conception dans le sens où elle prend en compte les aspects humains bien plus avant. Par exemple Prudhomme [Pru99] caractérise la conception comme :

- étant une activité collective et distribuée, résultat d'un double processus d'action (avec des dimensions temporelle, spatiale et organisationnelle) et de construction de connaissances relatives au futur produit (avec une dimension cognitive),
- n'étant pas une activité de résolution de problème.

Selon Prudhomme et Schön [Sch83], ce processus est dépendant de l'organisation industrielle et se construit dans l'action.

Pour réellement comprendre la conception, une approche transversale est donc nécessaire. S'attacher à l'étude des techniques, des produits ou des outils seuls ne peut pas donner une vision suffisante. Les différents travaux ayant mené à la conception intégrée, et notamment au laboratoire 3S de Grenoble, vont dans ce sens avec des approches socio-techniques [JB98, Vin95, Lau00, Bla98, Mer98, MW92, Hat94, Buc91] et psycho-cognitives [Dar94, CCD96]. On peut citer aussi, à Paris, la théorie CK [HW03]. Les travaux du laboratoire 3S étaient, au début, axés sur la création d'outils d'intégration de la fabrication dans la conception (par exemple le projet Copest en forge [Bou93] s'occupait de procurer des renseignements sur les pièces estampées) mais des problèmes liés à la formalisation des connaissances et à la contextualisation obligatoire de ces connaissances ont montré les limites de cette approche.

Ces hypothèses nous aident retrospectivement à comprendre dans quel but créer méthodes et outils d'aide de façon à ne pas se heurter de nouveau aux problèmes de formalisation des connaissances et leur décontextualisation. Pour être efficaces, ils doivent donc :

- s'adapter au contexte industriel,
- s'adapter à l'imprévisibilité des données et problèmes,
- permettre la coopération des différents acteurs,
- prendre en compte la multiplicité et l'évolution constante des représentations du produit,
- maîtriser les connaissances associées.

Mais la coopération n'est ni automatique ni géographiquement centrée, de plus des étapes de négociation et de médiation sont nécessaires. Les travaux de Poveda [Pov01] proposent par exemple d'instrumenter ce nouveau métier de gestionnaire de projet.

De nombreux travaux dans le domaine de l'ingénierie des connaissances (*knowledge engineering*) vont dans le sens de la maîtrise des connaissances. Ce sont souvent des outils et méthodes de capitalisation et réutilisation de connaissances / savoir-faire métier mais aussi de l'historique d'un projet complet, on peut par exemple citer les travaux de Longueville [Lon03] sur les projets d'innovation ou de Baizet [Bai04] sur le calcul de structures. En effet, comme nous l'avons déjà fait remarquer avec la référence à Prudhomme, une fois le produit fini les concepteurs ont acquis de nombreuses connaissances sur le problème initial, sur des solutions et d'autres données sur lesquelles il est difficile de mettre une dénomination mais qui sont autant de connaissances qui peuvent servir sur un autre projet. L'aspect apprentissage est encore un des points troubles du processus de conception.

Ainsi, pour analyser le processus de conception nous avons trois points d'entrée sur une grille d'analyse.

- Les acteurs tout d'abord, il est important de connaître la composition d'une équipe de conception afin de pouvoir mettre en évidence les interactions.
- Les documents de la conception, que nous expliciterons à travers les travaux de Mer, Jeantet et Vinck [Jea98] sur les objets intermédiaires.
- Les connaissances enfin bien sûr, et surtout dans le domaine des micro produits qui nous préoccupe où elles sont peu stabilisées, dans une structure de technologie émergente.

Selon ces trois aspects nous fournissons une grille d'analyse pertinente et originale du processus de conception afin d'en proposer une modélisation. Par processus de conception, nous entendons le processus "réel" et donc industriel. Pour l'analyser et le comprendre il faut aller à sa rencontre, chose qui sera faite à travers l'immersion industrielle chez STMicroelectronics.

L'approche ethnographique

Pour pouvoir étudier le processus de conception, plusieurs possibilités existent. On peut procéder à des entretiens avec des concepteurs, créer de toutes pièces des expériences de conception (par exemple le Magicien d'Oz [Bla98]) ou bien s'immerger dans les pratiques réelles d'un processus industriel [MJT98], ou du moins d'un processus qui aboutit à des réalisations matérielles. Cette dernière approche permet de mieux se rendre compte par exemple des contraintes réelles de temps, de budget, de qualité et de concurrence au niveau économique. Toutes ces approches visent à la collecte de données relatives au sujet de l'étude en vue d'analyse a posteriori. Dans le cas d'une interview le procédé est évident, pour les autres approches, on dénote trois types de méthodes pour le recueil et l'analyse des données [DCP⁺01] :

- observation neutre (analyse d'enregistrements audio ou vidéo des pratiques)
- observation réflexive (confrontation des enregistrements avec les acteurs)
- observation participante (le chercheur intègre le milieu étudié, dans une approche ethnographique)

Nous avons vu que l'un des postulats de la sociologie adaptée à la conception est que l'organisation et le sens des actions de conception sont produits au cours de l'action elle-même. Donc, on peut dire que l'observation seule ne suffit pas, il faut être confrontés aux problèmes (de la même façon qu'un élève a besoin des exercices en plus du cours pour bien comprendre les notions, en y apportant une réflexion, un retour sur l'objet de connaissance). De plus, une approche par entretien ne livre l'information que filtrée à la fois par celui qui la reçoit mais aussi par celui qui la donne. Une approche d'ethnologue est par conséquent ce qui nous paraît le plus à propos pour cette étude.

Mais s'immerger dans une entreprise et participer à un projet de conception pose quelques problèmes assez délicats à régler. En tout premier lieu, se pose celui du statut. Quel va être le statut du chercheur dans ce nouveau milieu? S'il est vu en tant que tel il apportera à n'en pas douter des modifications [Wei99a] dans le comportement des autres acteurs. Dans un triple objectif de non obstrusivité, de légitimité et d'observation

personnelle, nous avons acquis les connaissances que nous jugions nécessaires dans le domaine de la conception de micro produit.

En revanche, cet investissement que l'on peut qualifier d'intense dans le travail quotidien de l'entreprise pose un autre problème, la non objectivité [Bla98]. Cette situation est délicate à gérer dans le sens où il faut s'investir pour comprendre profondément le sujet de l'étude mais ne pas oublier de conserver un recul suffisant pour, une fois le changement de "casquette" effectué, identifier les modifications que la présence du chercheur ne manque pas d'apporter. En effet, il est tentant parfois de croire discerner un dysfonctionnement dans la manière d'agir des acteurs, mais il faut bien se garder de vouloir y apporter une "solution" dans la mesure où on n'a pas encore le recul nécessaire ni la vocation à le faire, à cet instant.

Le terrain industriel est donc abordé avec un double statut d'observateur/acteur. Le but est d'observer les pratiques, de comprendre l'activité de conception et ses évolutions dans le temps, à travers les différentes phases de déroulement d'un projet complet. Mais participer à un projet dans son ensemble n'est pas possible au vu des temps de développement encore très longs. Cependant, participer à un morceau de projet et assister à la genèse et au fonctionnement des autres à différents stades de leur vie est indispensable, et ceci au quotidien. En effet, un projet se construit de manière continue mais aléatoire selon les disponibilités des hommes et des moyens et il n'est pas possible de prévoir à quel moment certaines parties de l'activité de conception seront observables, ni quelles informations seront exploitables.

Les informations mises en évidence au cours de l'étude de terrain sont de plusieurs types :

- sur l'entreprise, le marché, les produits, les méthodes de travail, les outils
- sur les améliorations possibles du processus et des outils
- sur l'état de connaissances d'ingénierie

Ces informations ont plusieurs statuts. Pour certaines, c'est une confrontation personnelle avec notre travail de concepteur qui a permis de les appréhender, pour d'autres, c'est à travers les très nombreuses discussions autour d'un café ou bien en aparté lors des réunions alors que nos connaissances faisaient défaut. Enfin, observer les équipes dans leur travail permet aussi l'acquisition d'informations. Il est à noter que ces informations sont immensément filtrées dans la mesure où elles ne sont que très peu objectives.

L'environnement industriel : STMicroelectronics

Dans l'entreprise STMicroelectronics à Crolles, les micro systèmes électromécaniques font l'objet d'un groupe de recherche particulier : l'équipe *Above IC*. Elle doit son nom au fait que les MEMS sont présentés comme de nouvelles structures et qui, à terme, devraient s'intégrer dans le processus de fabrication de systèmes plus globaux où ils seraient fabriqués, tout intégré, "au dessus" des puces IC sur les wafers. Il s'agit d'une petite équipe d'une demi-douzaine de personnes auxquelles se joignent stagiaires et thésards. L'équipe est principalement composée d'ingénieurs de conception, de recherche en nouvelles technologies et de personnes qui gèrent les nombreux projets en cours. Elle travaille en collaboration avec d'autres équipes de l'entreprise (à Crolles ou dans d'autres locali-

sations, en France ou à l'étranger) et avec des laboratoires de recherche universitaire. On trouve, à peu près :

- Above IC Crolles I (recherche, gestion de projet, fabrication, un peu de caractérisation sur MEB)
- TCad ST Crolles I et II (simulations, calculs)
- LETI (fabrication, recherche, matériaux, caractérisation, dessin des masques, simulations particulières)
- autres laboratoires industriels et universitaires partenaires (recherche, étapes de fabrication non présentes sur les autres sites, etc.)

Les moyens de fabrications à disposition sont à la fois ceux de ST et ceux des partenaires "universitaires" (comme le LETI ou bien l'EPFL¹...). Cela pose d'ailleurs certains problèmes de compatibilité de processus, mais amène la possibilité de passer des wafers chez les partenaires. En effet, l'équipe Above IC est une équipe de Recherche et Développement relativement orientée recherche et pour pouvoir utiliser les lignes de production industrielles, il faut souvent attendre que la production commerciale laisse un créneau afin de glisser un ou deux wafers dans les machines.

Au CEA/LETI en revanche, les moyens en terme de salles blanches sont plus limités mais aussi plus accessibles.

Les étapes de caractérisation sont principalement effectuées dans les laboratoires du LETI. Certaines plaques transitent entre l'EPFL et Grenoble pour pouvoir être caractérisées.

Quand une technologie est nécessaire mais non disponible, que ce soit à ST ou au LETI, il s'agit de voir si on fait sous-traiter l'étape ou bien s'il y a investissement de matériel. Dans le cas d'un nouveau matériau, il suffit parfois d'acheter une "cible" et d'utiliser une machine standard. Ce sont ces entreprises qui fournissent la technologie qui sont appelées sous-traitants ou fournisseurs et non pas une entreprise qui fournirait un composant du système global (comme par exemple des essuies-glaces sur une automobile).

4.2 Les différentes vues du processus de conception

4.2.1 Les acteurs, l'équipe de conception

Tout au long de cette immersion en milieu industriel, nous avons été amenés à travailler avec de nombreuses personnes et sur de nombreux sites. En suivant différents projets à différents moments de leur maturité, nous avons pu caractériser le panel "d'acteurs" qui contribuent au développement du produit. On peut distinguer deux types d'acteurs dans un projet MEMS : ceux qui sont responsables d'un projet complet et que nous appellerons les concepteurs MEMS, et ceux qui apportent une expertise en tant que consultants.

L'équipe de conception telle qu'il nous a été donné de l'observer est la suivante :

¹Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, en Suisse

- Le concepteur MEMS, spécialiste mécanique. Il est responsable du concept général du produit ainsi que de sa géométrie, on peut sans doute dire qu'il crée "l'âme" du produit. Il choisit le principe de fonctionnement de l'application (en accord avec les managers de projet et des intérêts économiques difficilement maîtrisables), dessine le produit dans toutes ses dimensions et réalise la version du dossier de masque qui est fournie à l'équipe de dessin.
- Le spécialiste de la physique de l'application. Selon les applications, il s'agit d'un spécialiste RF (radio fréquences), biologie, optique, fluides, etc. Son apport est fondamental car il est impossible pour le concepteur MEMS de connaître avec exactitude certains paramètres très spécifiques et pourtant porteurs de contraintes importantes pour la conception. Par exemple, les dimensions des pistes de connexion porteuses du signal RF et leurs variations sont très codifiées et influent directement sur la géométrie du contact dans le cas du *switch*.
- L'équipe de design électronique VLSI. Si l'on se place dans le cadre d'un MEMS plutôt autonome, il apparaît que le concepteur électronique prend part entièrement à la conception du système global. Mais dans le cas d'un micro composant tel qu'un *switch*, on peut voir l'équipe VLSI comme un client.
- Les équipes de technologues de salle blanche. Ils sont les détenteurs des connaissances de fabrication, nous avons vu que celles-ci sont bien trop complexes et surtout en permanente évolution pour que le concepteur MEMS les maîtrise toutes. L'expérience prouve que, même si le concepteur connaît bien les différentes méthodes de fabrication (car nous avons vu qu'il lui est impossible de faire évoluer le produit sans cela), on ne peut pas compléter un cahier de lot sans l'avis d'un technicien de salle.
- Les responsables des tests, de la fiabilité et des caractérisations. Une fois le produit de retour des étapes de fabrication (ou en cours de fabrication dans certains cas très orientés "recherche"), de nombreux tests sont effectués afin de vérifier le fonctionnement des applications et la bonne marche de certaines étapes du processus de fabrication. La caractérisation apporte des données importantes pour les équipes de fiabilité, pour les équipes de technologues et aussi au concepteur sur ses choix de fabrication, de principes de solution, etc. Souvent, cela soulève de nombreuses questions aussi bien que cela répond à certaines attentes. Par exemple, une application dont les premières versions présentaient des ruptures de poutres suspendues au niveau des encastrement va permettre de travailler à la fois sur les géométries d'encastrement, sur les matériaux utilisés et sur les paramètres de fabrication.
- Les dessinateurs des masques de lithographie. Cette équipe est spécialisée dans le dessin sur certains logiciels et redessine les masques que leur donne le concepteur MEMS. Une fois redessinés selon les standards géométriques de la microélectronique (CIF, GDS II, cf chapitre 3.1.2), les masques sont obtenus d'un sous-traitant.
- Les spécialistes des méthodes numériques. Ils réalisent les simulations numériques (par exemple avec les méthodes utilisant les éléments finis) dans les cas où le

concepteur MEMS ne dispose pas des possibilités de calculs ou bien si celles-ci demandent des compétences particulières, notamment dans des cas très complexes multi-physiques couplés.

- Le manager de projet. Son rôle est très classique, il contrôle la bonne marche des projets. Il n'agit pas directement sur le produit, mais il observe, structure et oriente le processus de conception et ceux qui le mènent à bien. Ses connaissances doivent aborder tous les domaines du domaine et de l'application pour un pilotage efficace du projet. Il a un rôle capital afin d'aider à la convergence vers une solution et vers l'optimisation du triptique coût/délais/qualité comme l'a montré Olivier Poveda [Pov01].
- L'équipe du packaging. Le packaging est un des éléments essentiels pour la bonne commercialisation des MEMS. Dans le contexte étudié, l'aspect R&D faisait que l'équipe de packaging proposait des solutions techniques lors de réunions sans pour autant apporter réellement quelque chose au niveau du produit. C'est un problème de maturité des composants.
- Le client. Il est mentionné que celui-ci peut être l'équipe VLSI dans le cadre d'un composant MEMS discret à intégrer dans/sur une puce. En effet, le but final est de fournir une "boîte noire" de plus dans la bibliothèque des composants utilisables par les concepteurs, boîte noire suffisamment maîtrisée et paramétrée pour pouvoir l'inclure dans un système plus important à un certain niveau d'abstraction. Dans le cas d'un *switch*, le nombre de connexions avec l'extérieur, les tension et/ou l'intensité (et donc puissance) de commande, la rapidité de commutation sont des caractéristiques demandées par les designers et qui donc peuvent être autant de contraintes imposées dans le cahier des charges initial. Dans le cas d'un MEMS "autonome", on revient plus à une notion de client classique c'est à dire comme instigateur de la première version du cahier des charges fonctionnel.

En réalité de nombreux acteurs de la conception endossent plusieurs rôles. En effet, le contexte de Recherche et Développement fait que les équipes sont réduites et travaillent en permanence sur plusieurs projets. La plupart du temps le concepteur MEMS réalise par exemple lui-même ses tests quand il n'est pas responsable de certaines étapes du processus de fabrication. Le problème classique de la compréhension avec ces équipes si diversifiées, et surtout entre mécaniciens et électroniciens, n'en est pas vraiment un, car on arrive rapidement à un jargon commun très technique et fort utile lors des phases aval de la conception détaillée. En revanche, certains problèmes comme par exemple la présence de capacités ou inductances parasites sur une géométrie "mécanique" demande un apprentissage plus long car ces compétences acquises par le concepteur ne le sont que par l'expérience et la confrontation. Cet exemple dépasse la construction d'un vocabulaire commun et manie des notions fondamentales de l'électronique.

Cette description de l'équipe de conception nous permet une meilleure compréhension du processus.

Tout d'abord d'un point de vue strictement temporel sur le flux de maturation du produit, on voit apparaître une séquentialité due à certaines interactions entre les membres de l'équipe. On remarque que cette séparation d'activité entre le concepteur

de MEMS et l'équipe de dessin des masques apporte à la séquentialité un caractère marqué et obligatoire. Dans la pratique, il peut y avoir un délai de plusieurs mois entre le moment où le concepteur dépose son projet de masques et le moment où les masques physiques lui sont livrés. Les masques sont sous-traités par une entreprise spécialisée dans la production de masques de lithographie, souples (rapides à obtenir, moins coûteux mais peu stables dans le temps) ou bien en dur (sur plaques de verre, lents à obtenir mais avec une meilleure précision, chers mais ayant une bonne durée de vie). Alors commence seulement le début de la séquence de fabrication, ce qui amène une autre séquentialité, avec un délai tout aussi incompressible et encore plus difficilement maîtrisable à l'heure actuelle. Le contexte de recherche et développement fait que les wafers de microsystèmes MEMS ne sont pas une priorité dans le flux de production de l'entreprise. Pour résumer, on assiste à un goulet dans le processus de développement du produit qui peut rappeler la séparation franche du passage à la fabrication dans la conception VLSI.

Ensuite, nous avons pu mieux appréhender les différents apports des spécialistes de la physique de l'application et des technologues de salles en remarquant à quels moments du processus ils intervenaient. La collaboration avec les techniciens est diffuse tout au long du développement du produit, que ce soit lors des analyses bibliographiques ou de la veille technologique (qui porte bien son nom car très centrée sur les procédés de fabrication ou les nouveaux matériaux) ou bien lors de la création des différentes versions du cahier de lot et du dossier des masques. En revanche, les spécialistes physiques n'interviennent que ponctuellement pour préciser leurs besoins ou bien valider certaines parties de géométrie ou un choix de matériaux. Ils interviennent aussi durant la caractérisation où ils peuvent avoir un certains nombres de tests spécifiques à effectuer. Par exemple, dans le cas du *switch* thermique RF du Leti [RBB⁺03], une fois que celui-ci fonctionnait correctement en actionnement, encore fallait-il s'assurer qu'il n'y avait pas de perte au niveau du signal RF. De plus, il fallait contrôler quelle puissance pouvait circuler dans le *switch*, ainsi que les effets couplés comme le collage des surfaces au contact (toujours pour des problèmes de puissance).

Et même si le *packaging* n'intervient que très peu pour l'instant, nous avons vu au chapitre 2.4 que son importance est capitale. La maturité des applications et le contexte de R&D fait que nous ne pouvons qu'envisager sa place dans le processus global. Mais nous pensons nécessaire une collaboration en filigrane durant toutes les étapes de la conception, au même niveau que le concepteur MEMS (i.e. le concepteur mécanicien). On peut imaginer que le choix d'un *packaging* de type SiP ou SoC apparaisse dès les premières étapes de clarification du cahier des charges. Un peu plus tard dans le processus, le choix de l'utilisation d'une technologie et d'une géométrie standardisée de *packaging* peut apporter des contraintes fortes sur la forme que prendra le produit final au niveau de sa géométrie sur le wafer ; mais le choix de la création d'un *packaging* adapté à une application pourra au contraire faire apparaître un flux de contraintes en sens inverse.

D'après ce que nous avons vu, à la lecture de la littérature et en extrapolant depuis notre passif de mécanicien, nous pensons que l'équipe de conception de MEMS doit travailler selon les principes de co-conception de l'ingénierie concourante. L'équipe de co-conception est composée de trois spécialistes, responsables en commun de la définition du produit à travers trois parties :

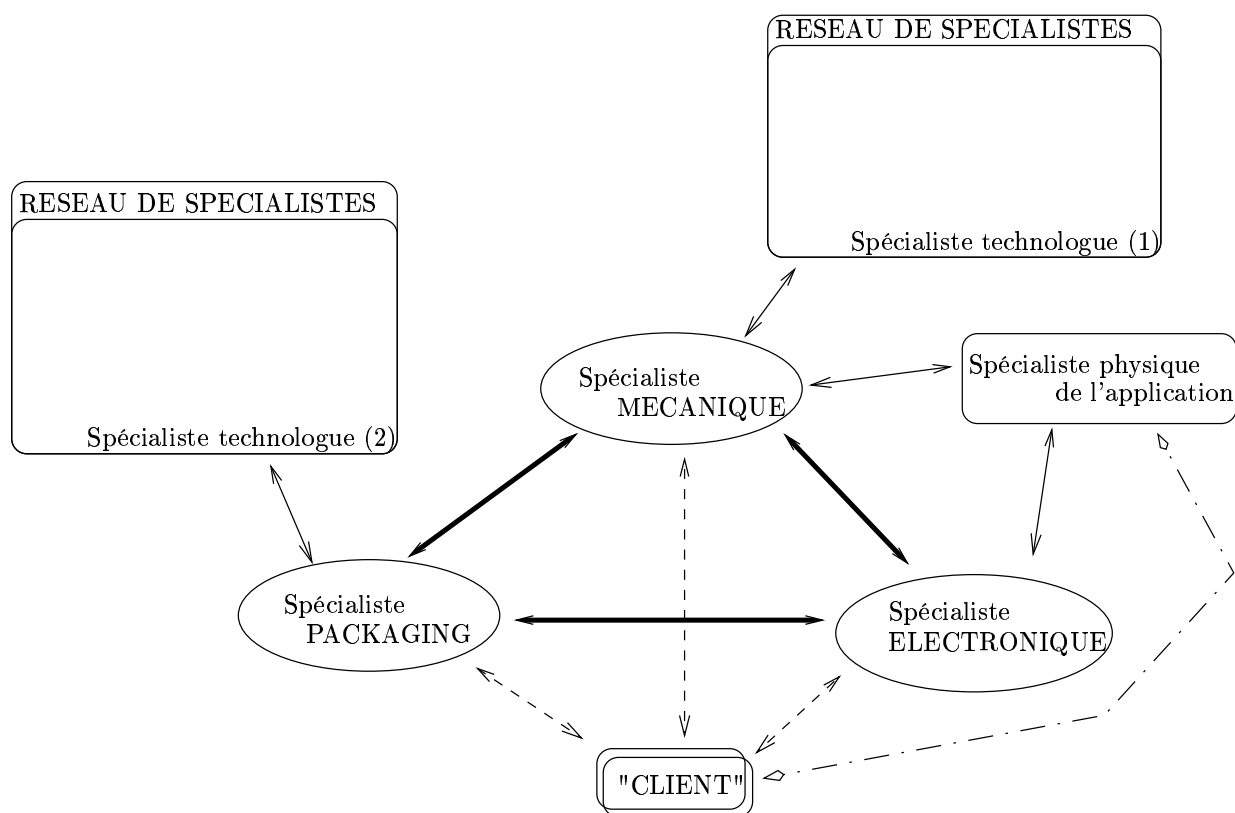


FIG. 4.1 – L'équipe de conception d'un MEMS

- l'aspect mécanique (que l'on retrouve dans la littérature anglo-saxonne sous le vocabulaire *micromachined element design*)
- le *packaging* (*package design*)
- la partie électronique (*electronic design*)

Ils seront contrôlés dans leur travail par un manager de projet.

Cette équipe de conception de MEMS doit travailler en collaboration avec d'autres acteurs, ceux-ci n'interviennent qu'en tant que spécialistes d'un domaine d'expertise à consulter : les technologues bien sûr, les spécialistes de la physique de l'application, le client qui pourra être une équipe de conception d'un gros système microélectronique ou bien les responsables de l'architecture globale incluant le MEMS. La figure 4.1 résume cette proposition.

Les flèches en gras représentent une collaboration en co-conception, le produit émerge d'une communication permanente de ces trois acteurs principaux.

Les flèches fines représentent une demande d'expertise, elles sont bidirectionnelles pour affirmer le caractère d'apprentissage simultané des deux parties lors de l'échange des connaissances.

Des flèches en traits interrompus lient le client et les trois acteurs principaux, par exemple lors de la phase de précision du cahier des charges. L'aspect bidirectionnel représente encore un fois l'apprentissage conjoint. Il existe de surcroît une relation particulière entre le client et le spécialiste de la physique de l'application dans la mesure où ils

partagent un certains nombres de connaissances ou bien le spécialiste physique apporte son expertise au niveau de la création du besoin chez le client. Le spécialiste physique peut aussi par exemple être une personne faisant partie de l'entité "client" comme dans le cas de la télécommunication et des spécialistes RF. Idéalement, le client devrait être le quatrième pôle de l'équipe de conception et agir aussi en terme de co-conception mais ça n'est pas vraiment le cas pour l'instant et rien ne permet d'extrapoler sur ce point.

Nous pensons que les spécialistes technologues, selon la nature diffuse de leur apport sur le produit, la très grande technicité des procédés et le manque de stabilité sur les connaissances associées, agissent plus comme une base de référence en perpétuelle évolution que comme un acteur à part entière. Contrairement au cas du spécialiste physique, on a un choix parmi un réseau de spécialistes. En effet, la personne compétente à l'instant t n'est pas forcément clairement définie (pas comme dans le cas d'un carter en mécanique générale par exemple, où les problèmes de fonderie concernent le spécialiste fondeur, les problèmes de bâtis mécano-soudés concernent le soudeur, etc.) et l'aspect non stabilisé des connaissances laisse un flou sur la personne. Nous avons aussi précisé par les numéros entre parenthèses que le concepteur mécanique et le concepteur *packaging* ne font pas appel aux mêmes technologues mais nous avons gardé un seul réseau de spécialistes (peut-être est-ce l'aspect R&D qui en est ici la raison). En revanche, la partie électronique n'a que peu de rapports avec les technologues car elle évolue, selon les principes de conception VLSI dans son espace de fabricabilité. Les aspects technologiques de compatibilité seront à négocier avec l'équipe mécanique, le budget thermique étant imposé par les parties électroniques. (cf chapitre 2.2.3)

4.2.2 Les documents utilisés dans la conception de MEMS

Toute conception est riche en documents qu'ils soient institutionnels, formalisés, personnels... Dans la conception de MEMS, on retrouve des documents provenant à la fois de l'aspect mécanique et de l'aspect électronique du produit. Certains de ces documents peuvent être qualifiés d'objets intermédiaires, nous détaillons plus bas leurs caractéristiques. Une analyse de ces documents nous a permis de mettre en évidence des aspects chronologiques du processus ainsi que de comprendre les relations entre certains acteurs.

Les objets intermédiaires

On appelle "objets intermédiaires" [Mer98, VJ95, Jea98] une catégorie de documents ou d'objets ayant une réalité physique ou virtuelle, rencontrés lors de l'activité de conception. Cela peut être des documents formels (compte-rendus de réunions, fiches de résultats de simulation, plans d'ensemble...) ou bien informels (croquis, pages de notes personnelles lors d'un entretien). Cela peut aussi être des maquettes (virtuelles ou non), des prototypes ou bien des objets réels de référence (par exemple dans la conception d'une suspension de VTT, le VTT lui-même sert de référence aux concepteurs [HM96]). Dans la conception mécanique, le dessin a bien sûr eu une énorme influence et a été l'objet de nombreuses études [UWC90] et son utilité en tant que partage d'information et organisation de l'activité n'est plus à démontrer, bien que certains travaux ont montré

que son aspect très structuré pouvait en quelque sorte brider les concepteurs à certaines étapes très créatrices de la conception. Par ailleurs, les objets intermédiaires sont des marqueurs temporels de l'activité de conception, à travers, par exemple, l'évolution dans leur formalisme, ils représentent les différents états successifs du produit. Certains d'entre eux sont aussi représentants d'une irréversibilité dans le processus dans la mesure où ils marquent le choix souvent définitif d'une solution. Les objets sont donc intermédiaires dans le cycle de développement du produit, ils sont commis par des acteurs et sont aussi des intermédiaires pour supporter la communication entre les acteurs, ils ont donc des fonctions de représentation, de communication et de médiation.

Pour résumer les objets intermédiaires ont trois fonctions principales qui les définissent :

- ils sont une représentation de connaissances sur le produit,
- ils font office de marqueurs temporels de l'état d'avancement du produit, et donc du processus de conception,
- ils ont une fonction d'aide à la médiation, la négociation.

Les documents de la conception de MEMS

De nombreux objets sont produits à tout moment du processus de conception de MEMS que nous avons étudié, et ce par l'ensemble des acteurs en présence. Le tableau suivant propose une liste des objets produits par l'acteur que nous avons appelé "concepteur MEMS" ou bien "Mécanicien" (cf figure 4.1), ainsi que de leurs utilisations. Nous leur en avons associées plusieurs : communication, diffusion, travail personnel, archivage, médiation, base pour la construction d'un autre objet...

n°	Objets	Utilisations
1	Brouillon, notes, croquis sur tableau	Production personnelle, communication avec les spécialistes
2	Présentation/diaporama, compte-rendus de réunions	Diffusion plus que communication (liste de diffusion par e-mail), archivage
3	Cahiers de lots vx.xx	Communication et négociation avec les techniciens de la fabrication
4	Dossier de masques	Communication avec la structure de réalisation des masques
5	Résultats de test (notes, images pour diaporama ou compte-rendus), le wafer, le produit en version x encapsulé	Production personnelle, archivage, communication, diffusion

Objets rencontrés dans la conception de MEMS

Nous allons, dans un premier temps, détailler successivement les trois documents qui sont les plus spécifiques au domaine des MEMS, adaptation de documents issus de la microélectronique : le cahier de lot, le dossier de masque et quelques résultats de caractérisation. Puis, nous analyserons leur influence sur le processus de conception.

Le cahier de lot Le cahier de lot est l'équivalent d'une gamme de fabrication, il propose un enchaînement de la séquence de fabrication. On y retrouve des connaissances très techniques sur chaque procédé de fabrication, les réglages des machines et le nom des opérateurs associés. C'est en revanche un objet assez ouvert, dans la mesure où il est construit par le concepteur MEMS en collaboration avec les spécialistes technologues. Chaque étape est débattue avec le membre du réseau d'expert le plus pertinent. La figure 4.2 présente deux pages extraites d'un cahier de lot en cours de création. On peut constater des notes manuelles prises par le concepteur lors de discussions avec les spécialistes technologues et la présence de données techniques très précises comme bases de la discussion.

Durant notre étude de terrain, nous avons pu suivre la création d'un de ces documents en accompagnant le concepteur MEMS chez ses différents interlocuteurs. Le cahier de lot est sans doute le document qui présente le plus de caractéristiques avec les objets intermédiaires. Il a une vraie fonction de négociation et de médiation.

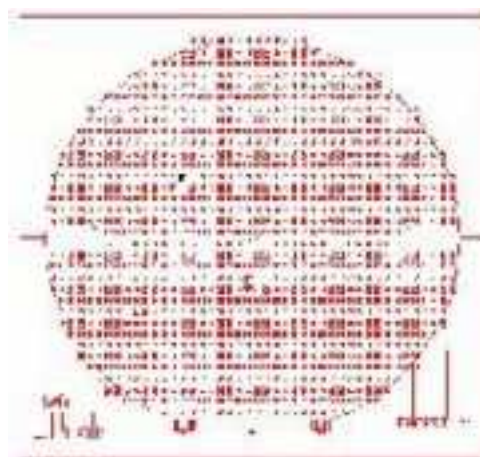


FIG. 4.3 – Exemple d'un DTS, un niveau de masque

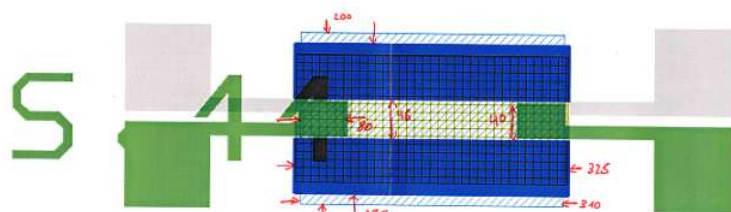


FIG. 4.4 – Superposition des niveaux de masques d'un switch

Le dossier de masques Le dossier de masques est l'ensemble des différents dessins CAO des étapes de lithographie, depuis les croix d'alignement en passant par toutes les étapes de dépôt et de gravure. La figure 4.3 montre une vue d'un niveau de masque, on retrouve la forme du wafer et on voit la multitude de structures MEMS qu'il est possible de placer sur un même wafer.

Dans le cas des MEMS, ils ont une maniabilité différente. En effet, le nombre d'étapes de fabrication et la complexité (en terme de nombre de motifs) des masques de lithographie pour un microprocesseur font qu'il est impossible pour un concepteur de travailler seul sur un projet. En revanche, pour les MEMS, l'équipe de conception manie couramment cet ensemble de documents institutionnels et formels. La figure 4.4 montre la superposition des niveaux de masque pour le switch à actionnement piézoélectrique présenté dans [ZGD⁺04], si plusieurs couches sont placées presque directement les unes au-dessus des autres, la géométrie est tout de même appréciable.

Dans la pratique, et dans le contexte de recherche et développement dans lequel nous nous plaçons, le dossier de masques est complété par le concepteur MEMS puis envoyé avec d'autres informations jugées nécessaires telles que certains principes de fonctionnement ou contraintes dimensionnelles fortes. L'équipe qui s'occupe de réaliser le dossier final, à travers des logiciels de DAO spécifiques, redessine complètement tous les niveaux. Le dessinateur contacte ensuite le concepteur lorsqu'il y a une ambiguïté ou s'il estime que certaines formes donneront des erreurs. Le dossier de masques n'est pas pour autant un

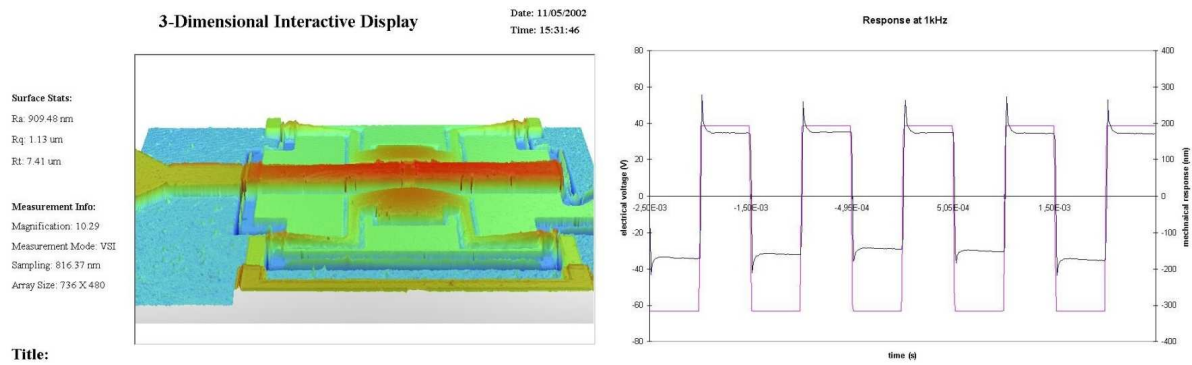


FIG. 4.5 – Des résultats de caractérisation

A droite, un profil par interférométrie ; à gauche des courbes de tension à l'oscilloscope

objet de médiation et de négociation ouvert. Il n'est pas construit en collaboration entre ces deux acteurs mais il est en quelque sorte validé par le dessinateur. Cette étape est très longue et apporte un délai relativement compréhensible car il faut ensuite commander le jeu de masques à un sous-traitant.

Les résultats de caractérisation Une fois les wafers sortis de la ligne de production, le concepteur entame une campagne de tests de ces structures. L'enjeu est double : valider les performances du produit et extraire de nouvelles connaissances scientifiques et techniques de fabrication. Au niveau des documents, on trouve beaucoup de courbes réalisées avec des oscilloscopes, des photographies depuis un MEB² ou, comme sur la figure 4.5, des captures d'écran de matériels tels que des interféromètres.

Ces documents participent au processus de conception dans la mesure où ils servent de base de discussion entre l'équipe de conception et les experts. Les résultats de caractérisation participent à l'aspect apprentissage, sur à la fois le produit, les techniques de fabrication, le problème de conception et les solutions proposées. Ces documents sont une base pour rédiger et formaliser les connaissances lors de points d'avancement. Lors de notre immersion industrielle, nous avons participé à des séances de caractérisation de structures, l'acteur construit des connaissances qu'il formalisera lors de la rédaction de compte-rendus ou de présentations pendant les réunions d'avancement des projets.

Bilan sur l'analyse des documents

Selon le tableau précédent de présentation des documents, les premiers sont des objets informels utilisés pour la communication et la négociation aussi bien que pour de l'archivage personnel. Ces documents ne présentent pas réellement de spécificité dans le cadre des MEMS. Ce sont cependant des objets intermédiaires, ils en présentent au moins un certain nombre de caractéristiques évidentes telles que la représentation d'un état du produit, ou bien l'aide à la négociation. Ces objets sont souvent très ouverts et par leur étude nous avons pu mettre en évidence des caractéristiques sur les connaissances

²MEB = microscope électronique à balayage

entrant en jeu dans la conception du produit.

Les suivants sont des objets institutionnels et formels. Ces documents sont véritablement plus spécifiques à la conception de MEMS, le cahier de lot et le dossier de masques ont des équivalents dans les domaines de la mécanique et de la microélectronique mais présentent, nous l'avons vu, des caractéristiques propres. C'est donc de l'adaptation que vient la spécificité de ces documents. Ils n'ont cependant pas le même statut :

- le cahier de lot est un objet ouvert, de négociation, il se construit en collaboration importante avec les spécialistes technologues,
- le dossier de masques est un objet plus fermé, les négociations qui peuvent avoir lieu entre le concepteur MEMS et le dessinateur sont dues à des incompréhensions ou des erreurs lors du transfert de l'information.
- les résultats de caractérisation servent à enrichir le corpus de connaissances techniques et scientifiques, mais aussi à des discussions entre concepteurs et spécialistes sur les raisons de tel ou tel dysfonctionnement. Ils participent au processus d'apprentissage sur le problème et les solutions.

Ces documents sont définitivement des représentations du produit et des marqueurs temporels du processus de conception et une source d'irréversibilité dans la maturation du produit. Ils marquent aussi la présence d'un délai dans le processus : dessin et production du dossier de masque, réalisation physique d'une version du produit.

En se basant sur ce constat, nous pouvons utiliser ces objets et notamment leur rôle de marqueur temporel pour mettre en évidence certains aspects d'articulation du processus de conception. Par exemple, il existe plusieurs ruptures dans le processus que l'on peut faire correspondre à des changements dans le type ou bien l'utilisation de certains objets. En tout premier lieu, l'apparition de dessin et plus uniquement du texte fait que la conception a déjà passé un cap d'irréversibilité dans la mesure où cette première "gamme de solutions" matérialisée par un premier croquis est figée pour la suite du processus, les autres solutions envisagées serviront à d'autres projets. Cela n'est cependant pas une caractéristique du domaine des MEMS.

La production en concomitance de la géométrie du masque en deux dimensions et des couches (avec création d'un code couleur pour chaque couche pour aider à la représentation, chose difficile avec une seule couleur on s'en rend compte lors des étapes de communication avec l'aide du tableau blanc) dans la troisième dimension fait apparaître le problème de représentation dû aux formes planaires très étendues des MEMS. Souvent, une anamorphose de la troisième dimension est nécessaire. En effet, certaines couches sont de l'ordre de la dizaine de nanomètres tandis que les structures sont plus souvent dans des ordres de grandeur de la centaine de microns (soit une différence de quatre ordres de grandeur). Ce genre de représentation est pourtant la plus utilisée, surtout lors du travail en commun avec les spécialistes technologues. De nombreux objets sont produits pendant ces rencontres, avec pour commencer une explication du produit et des attentes du concepteur, sur par exemple une ébauche de cahier de lot, ou bien quelques croquis (dépendant de l'état d'avancement du projet). Ces problèmes de représentation nuisent bien entendu souvent à la communication entre les acteurs.

Dans le domaine des MEMS, on trouve peu de maquettage car il n'y a pas d'utilisation

manuelle à proprement parler des produits, exception faite de la phase de caractérisation des prototypes. Le seul rapport entre le concepteur et le produit en cours de conception est un rapport visuel abstrait, d'où l'importance des modes de visualisation. Dans le cas des circuits intégrés, ce rapport est différent car il est plus aisé de "comprendre" le produit sur une représentation abstraite (par exemple les schémas RLC en électronique) que sur une cinquantaine de masques de lithographie superposés. Dans le cas des MEMS, la géométrie jouent un plus grand rôle quant à son rapport à la fonction, le concepteur peut "voir" comment va fonctionner le produit sur une vue 3D de la géométrie sur un logiciel, ou bien sur un croquis. Dans le cas du *switch* à effet bilame, nous avons été amenés à utiliser une règle double décimètre en plastique afin de "simuler avec les mains" le double flambement de la poutre. La règle est effectivement un objet intermédiaire car elle a aidé à la compréhension mais ce n'est qu'un artefact cognitif [Nor93]. Dans ce cas, le concepteur préférera une maquette numérique pour représenter le produit pour des raisons d'effet d'échelle. En effet, la taille du produit final fait qu'il est aisé de faire des erreurs de compréhension des phénomènes et notamment ceux concernant les effets surfaciques et les effets volumiques.

4.2.3 Les connaissances utilisées dans la conception de MEMS

Précisions sur la nature de ces connaissances

La notion de connaissance est très complexe. De nombreux travaux s'attachent à sa définition, caractérisation, capitalisation et réutilisation, en un mot à sa gestion. Si l'on se base sur une typologie proposée dans la littérature, on peut voir que le terme de "connaissance" est un regroupement de plusieurs notions [Tsu95, Erm98] :

- Données : information brute.
- Informations : données ayant déjà fait l'objet d'une action : tri, catégorisation... On y ajoute une notion d'intérêt, de but, parfois la communication.
- Connaissances : informations ayant fait l'objet d'une action de synthèse.
- Savoirs : connaissances théoriques généralisées.
- Compétences : applications des connaissances, les compétences apparaissent dans l'usage.

Mais une connaissance (dans le sens général du terme, hors débat sur l'aspect analyse) n'existe pas en elle-même, elle n'existe que dans son rapport avec ce(lui) qui l'a produit, ce(lui) qui l'a reçoit. Comme le précisent Prudhomme et al. [PBP01], on peut parler d'*objets de connaissances*, produits d'une action cognitive personnelle de son détenteur et contextualisée. Ces notions font que la représentation des connaissances est forcément incomplète dans la mesure où le rapport personnel de l'individu à la connaissance n'est pas représentable.

Il est très important de se pencher sur cette notion de connaissance pour une étude de la conception des MEMS car les connaissances y sont peu stabilisées. Dans le domaine de la fabrication par exemple, la rapidité d'évolution des technologies et leur extrême complexité font qu'il existe peu, voire pas, de base de connaissances sur lesquelles s'appuyer pour la conception du produit. Les connaissances de fabrication sont de l'ordre d'un savoir-faire très instancié et le seul détenteur est le technologue de salle. De la

même façon, une veille technologique permanente est menée par le concepteur MEMS et certains principes de solution sont encore très mal connus.

Les connaissances auxquelles nous nous intéressons sont de deux types : purement techniques et scientifiques ou bien du domaine de l'ingénierie. Lors de l'essai de mise en place d'un matériau piézoélectrique, en remplacement de l'actionnement thermique du *switch* RF, nous avons pu nous rendre compte de l'état des connaissances des deux types concernant ce matériau et son implémentation. Nous présentons en détail nos travaux dans l'étude de cet actionnement dans l'annexe A. Lors de notre stage universitaire, nous avons travaillé sur des procédés de fabrication particuliers : le fraisage et le perçage avec des outils de très faible diamètres, le processus de planarisation CMP (cf chapitre 2.2.3).

Connaissances techniques et scientifiques Pour donner un exemple de non stabilité de connaissances scientifiques, on peut citer les coefficients piézoélectriques de l'AlN. L'AlN est le matériau piézoélectrique que nous avons étudié et les coefficients le caractérisant sont issus d'une unique source, la thèse de Marc-Alexandre Dubois [Dub99]. Dubois donne un type de coefficients, e_{ij} , qui ne sont pas utiles tels quels, on doit calculer des coefficients d_{ij} à l'aide des formules classiques de contraintes et déplacement. D'où par exemple : $d_{33} = +5.53.10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$. Ces coefficients sont de dimension équivalente à m.V^{-1} donc donnent directement le déplacement (relatif) en fonction du champ électrique E (en V.m^{-1}) appliqué aux bornes du matériau. En utilisant ces coefficients, on peut simuler directement l'effet bilame qui est à la base du fonctionnement du *switch*, afin de valider les résultats expérimentaux.

Nous savions cependant que ces coefficients sont très dépendants de la manière dont le matériau est déposé, qui est elle-même très dépendante de la nature du matériau sur lequel il est déposé, etc. En outre, la méthode utilisée pour trouver dans un premier temps les coefficients est elle aussi expérimentale. En somme, ces coefficients sont utilisés pour des simulations et des comparaisons avec des prototypes alors qu'ils ont été produits sur des bases très peu stables.

Connaissances d'ingénierie L'étude qui a été faite à l'aide des plans d'expérience sur les paramètres de conception du *switch* sont des exemples de connaissances d'ingénierie. En effet, la comparaison entre les méthodes analytiques et par éléments finis sur différents logiciels donnaient déjà des connaissances procédurales et de modélisation sur les outils, des connaissances sur la géométrie ont ensuite émergé avec les études en plans d'expériences de criblage pour l'extraction des paramètres de conception. Par exemple, l'inutilité de modéliser la couche d'accroche de molybdène qui ne joue qu'un rôle insignifiant mécaniquement est une information qui permettra un gain de temps lors de futures modélisations et simulations.

Bilan sur les connaissances

L'apport des connaissances de technologies de fabrication se fait en filigrane tout au long du processus. Ces connaissances ne peuvent être qualifiées de statiques. La connaissance est changeante et dynamique tout au long du processus. Par exemple, les données et informations récoltées lors de la caractérisation du *switch* enrichissent le

corpus de connaissances générales des méthodes de fabrication. Par son intermédiaire, de nouvelles règles de dessin peuvent apparaître. Cette base de données technologiques influence directement les étapes amont de la conception alors que se décident les modes d'actionnement, le mode de fonctionnement global, la première version de la géométrie, etc. En revanche, lors de l'étape de conception détaillée au terme de laquelle est produit le masque de lithographie, ces connaissances ont un rôle plus prescriptif qui se rapproche alors du DRM³ de la conception VLSI (cf section 3.1.2). Le concepteur est alors d'avantage contraint par ses outils et par les bornes imposées par les choix technologiques. C'est aussi pourquoi cette étape est plus prone à l'automatisation.

Or, comme nous l'avons dit, les connaissances n'existent pas intrinsèquement mais en relation avec l'environnement, l'instant, les acteurs et sont statuéées (i.e. elles ont un statut tel que vrai/faux, en cours, une validité...). Dans le cas des connaissances que nous avons puees extraire des plans d'expérience, les détenteurs de ces connaissances sont multiples, l'acteur de la simulation TCAD ainsi que moi-même en temps que stagiaire-ingénieur responsable de l'étude sommes les acteurs principaux. Une thèse est en cours actuellement en collaboration entre STMicroelectronics et le CEA/Leti sur ce même actionnement piézoélectrique et donc ces connaissances sont rattachées à ce projet, elles ont été "validées" par une publication en conférence [ZGD⁺04].

L'étude des connaissances utilisées durant le processus de conception d'un MEMS et de la façon dont elles sont créées apportent des informations sur les enchainements du flot de conception. Elle nous permet aussi de mieux comprendre les interactions entre les différents acteurs. Pour résumer cette analyse, nous proposons une qualification des objets de connaissance selon cinq points. Cette classification est basée sur un objectif de traçabilité de la connaissance par l'intermédiaire des hommes et des projets pour remédier à son manque de stabilité et à la rapidité de son évolution, principalement dans les domaines techniques de la fabrication. Ces cinq points sont :

- le type de connaissance,
- le détenteur de cet objet de connaissance,
- la validité en terme de confiance,
- la date à laquelle a été formalisée l'objet de connaissance,
- le rattachement à un projet.

le type de connaissance En analysant les compte-rendus de réunions, les dossiers de masque, les cahiers de lot ainsi que les échanges entre concepteurs, et entre concepteurs et spécialistes, nous proposons une classification des types de connaissances rencontrés lors de l'activité de conception. Ces connaissances sont très orientées vers les métiers de la fabrication car, encore une fois, c'est dans ce domaine que l'instabilité est la plus grande. Nous proposons une classification en six types.

- 1. Connaissances de type procédé de fabrication intrinsèque (équipement, réglages...), relations entre les procédés de fabrication
- 2. Connaissances de type matériaux (orientées fabrication ou fonctionnalité)
- 3. Connaissances de type principes physiques

³DRM = Design Rules Manual

- 4. Connaissances de type géométrique (orientées possibilités de fabrication ou fonctionnalités)
- 5. Connaissances de type modélisation, utilisation d'outils spécifiques
- 6. Connaissances de type référence : qui, où... [Bai04]

Cette typologie prend en compte que ces connaissances sont à la fois des domaines scientifiques, techniques et de l'ingénierie.

le détenteur de cet objet de connaissance Nous appelons détenteur principal de l'objet de connaissance celui par qui la connaissance atteint un certain niveau de formalisme : compte-rendu de réunions, publication... Dans la plupart des cas, il n'est pas seul pour la création de cette connaissance, d'autres acteurs du processus de conception participent aux tests, aux réunions.

la validité en terme de confiance Le contexte de validité des connaissances est associé au rapport que le détenteur de l'objet de connaissance a avec celui-ci. Dans le domaine des MEMS où les connaissances scientifiques et techniques sont peu stabilisées, il est important d'avoir une idée de la confiance que l'on peut mettre dans une information : si celle-ci est prouvée et validée par des publications, ou bien si c'est une simple conjecture issue d'un résultat de caractérisation par exemple. Ce statut est aussi à modérer car la confiance joue sur deux niveaux : lors de la formalisation de l'objet de connaissance, c'est l'avis de son créateur, lorsqu'un autre acteur s'approprie l'objet de connaissance, il se construit son propre statut quant à l'objet.

le rattachement à un projet Que l'objet de connaissance soit relatif à un produit, à une technique ou à un procédé d'ingénierie, il est toujours associé à un projet plus vaste. Connaître le projet auquel est rattaché un objet de connaissance est important à plusieurs titres : cela permet d'avoir une référence temporelle et spatiale. Par exemple, dans le cas des thèses à ST/LETI, connaître les rattachements aux laboratoires permet de retrouver des interlocuteurs même lors de la fin du travail de thèse.

4.3 Une modélisation du processus de conception d'un composant MEMS

4.3.1 Proposition d'une représentation du processus de conception

Les différentes ruptures dans le processus que nous avons vu avec la description de l'équipe de conception et l'analyse des objets intermédiaires nous amènent à diviser la conception en cinq principales activités : conceptualisation, *embodiment*, optimisation (ou "conception détaillée"), réalisation physique et test (ou caractérisation). Cette représentation en cinq étapes est basée sur une approche *top-down* du type de celle de Pahl et Beitz telle que l'on a pu en voir dans les chapitres 3.1.1 ou 3.2. Sur la figure 4.6, nous avons placé ces cinq étapes de façon linéaire avec un décrochement marquant un passage

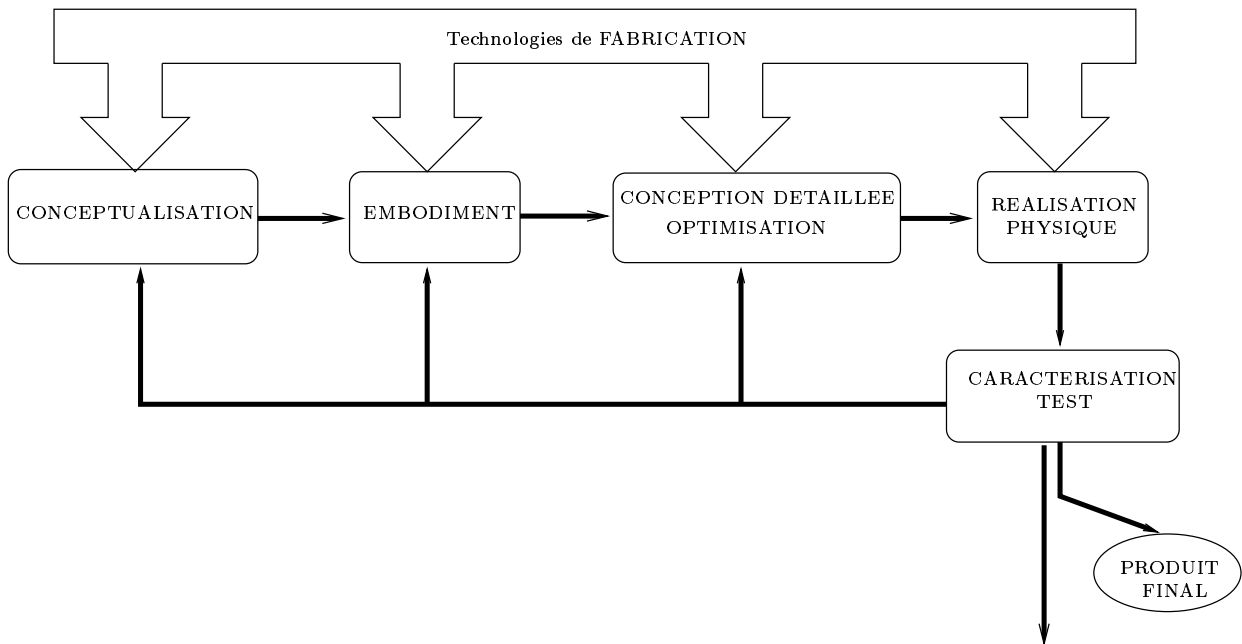


FIG. 4.6 – Une modélisation du processus de conception

pour l'étape de caractérisation/test. En effet, une fois le produit/prototype réalisé cette étape agit comme distributeur des informations obtenues. C'est à partir de ces résultats que le concepteur et le manager de projet décident de continuer sur cette géométrie en améliorant tel point ou bien de partir dans une autre gamme de solutions...

Lors de la phase de conceptualisation, on est classiquement dans un travail de clarification de la première version du cahier des charges fonctionnel et de recherche d'idées et de solutions de principe. Cette étape est extrêmement informelle et le domaine des micro produits dans lequel nous nous plaçons n'a que peu d'influence sur les méthodes.

Lors de la phase d'*embodiment* le concepteur doit agir sur trois fronts en concomitance :

- la géométrie planaire,
- les étapes séquentielles de fabrication qui représentent la demi-dimension restante,
- les matériaux principaux, ceux qui jouent une part importante dans les fonctionnalités aussi bien que dans les contraintes de fabrication pures.

Cette phase a pour objectif implicite d'aboutir à une première représentation du produit principalement à des fins de négociation et de communication avec les autres acteurs du processus de développement du produit. Une fois cette géométrie produite les modifications ne seront plus que minimales.

La phase de conception détaillée et d'optimisation consiste à s'assurer que le produit, avec les choix faits dans les étapes précédentes, puisse être réalisé et réponde aux spécifications en s'occupant en détail de tous les éléments du produit : géométrie exacte, épaisseurs des couches, choix des matériaux pour les couches d'accroche, définition des plots de connection avec l'extérieur (pour le test par exemple), etc. C'est lors de cette étape que l'on fait les simulations par éléments finis précises et surtout c'est à son terme

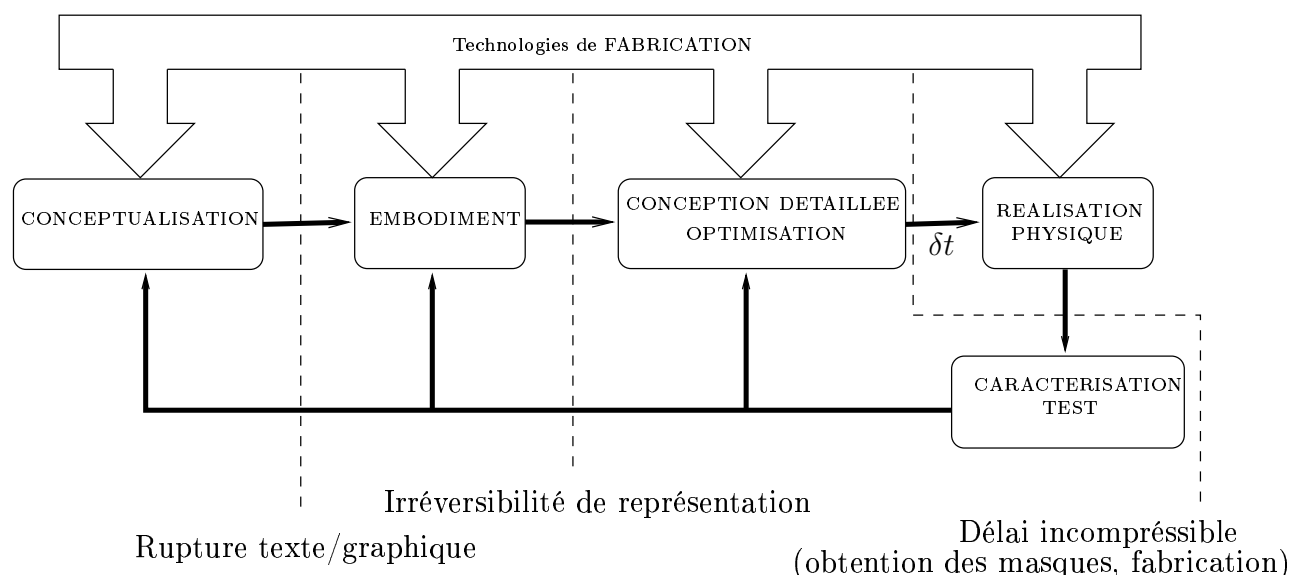


FIG. 4.7 – Une modélisation du processus de conception, avec un aspect temporel marqué

que l'on propose le dossier de masque à l'équipe qui va s'en charger ainsi que le cahier de lot. Une fois l'étape de réalisation physique complétée, le wafer est découpé, puis chaque MEMS est encapsulé pour passer à l'étape de caractérisation. L'étape de caractérisation peut aboutir à la validation du produit et son passage en production ou bien mettre en évidence des dysfonctionnements.

La figure 4.7 montre une vue du processus de conception en insistant sur l'aspect temporel et les irréversibilités qui apparaissent. Nous distinguons trois passages clef pour lesquels nous avons remarqué ces ruptures.

Dans un premier temps, l'analyse des objets intermédiaires montre que l'apparition d'une représentation graphique marque un saut dans le processus. Ce résultat est un résultat classique qui n'est pas une spécificité du domaine des micro produits.

De la même façon, les outils informatiques utilisés pour la phase de conception détaillée et l'optimisation nécessitent la mise sous un format (plus ou moins) standardisé. Cette fois encore, on assiste à une irréversibilité : la géométrie du produit est bornée à de petites modifications dès qu'elle est passée par cette étape. On remarque que cette irréversibilité agit "dans les deux sens", c'est-à-dire que si l'on suit le processus de la figure 4.6 dans le sens des flèches, le passage de l'*embodiment* vers la conception détaillée est marqué par l'irréversibilité aussi bien que le retour après caractérisation. En effet, un retour vers l'étape d'*embodiment* et plus encore de conceptualisation est bien plus difficile à opérer qu'un retour vers la phase d'optimisation. Dans de nombreux cas, on préférera essayer d'optimiser la géométrie pour rentrer dans les performances ou pour répondre à une défaillance plutôt que de remonter plus aval dans le processus. Ces retours dans le processus de conception n'ont donc pas le même statut. En effet, si les informations obtenues lors des tests conduisent à un retour sur l'étape de conception détaillée ou d'*embodiment* on peut considérer que l'on se trouve dans un cas de re-conception (par

exemple on garde le fonctionnement général et on modifie la forme des encastrement s'il y a bris des poutres à ces endroits-là). Dans le cas où on a un retour vers l'étape de conceptualisation, on se place plus dans le cadre d'un problème de conception mal posé ou d'un nouveau projet, car les changements que cela va induire vont certainement énormément modifier le produit. Dans la pratique, on observe aussi cette étape de choix et de distribution de l'information dans des itérations associées aux activités. Ces itérations internes aux activités sont les mêmes que dans la représentation de Pahl et Beitz "*iterate until end of time or ressources*", ce sont des ajustements à faire pour obtenir une version du produit dans un état d'avancement suffisant pour passer à l'étape suivante.

Enfin, il existe un délai incompressible δt une fois que le dossier de masque est envoyé à l'équipe de (re-)dessin et lorsque les lots sont lancés dans la chaîne de production. On peut dire que le projet rentre en *stand-by* pendant ce temps et qu'il reprend lors de la réception des lots, pour passage en caractérisation.

4.3.2 Les manques durant la phase d'*embodiment*

Ces différentes modélisations du processus de conception, dont nous avons été le témoin lors de notre immersion industrielle, ainsi que l'analyse des méthodes globales et locales spécialisées dans la conception de MEMS nous amènent à mettre en évidence un certain nombre de manques dans le flot de conception.

C'est à l'étape d'*embodiment* que le manque est le plus crucial et le moins étudié. En effet, nous avons vu qu'il existe des aides méthodologiques et des outils dans les étapes de conceptualisation et d'optimisation, chacune tirant partie de la ressemblance avec les mondes des systèmes mécaniques ou électroniques. De plus, l'étude des documents et des connaissances montre que c'est à cette phase que les documents les moins formalisés sont utilisés et que le concepteur a le plus besoin de collaborer avec les experts, principalement les technologues. La figure 4.8 montre cette répartition des documents dans le processus de conception ainsi que les collaborations avec les experts. L'étape d'*embodiment* est la plus pauvre en terme de documents adaptés alors qu'elle est la plus riche en terme d'interactions entre les acteurs.

Nous remarquons des faiblesses durant cette phase d'émergence de la géométrie du produit à deux niveaux :

- le manque d'un mode de représentation adapté,
- la difficulté de trouver le bon interlocuteur pour un problème de conception identifié.

Nous allons tour à tour détailler ces manques et proposer des solutions pour remédier au problème de la recherche d'un interlocuteur spécialiste.

Le mode de représentation

Dans le monde de la conception de systèmes mécaniques, les modes de représentation sont nombreux, qu'ils soient formalisés (par exemple le dessin technique ou le schéma

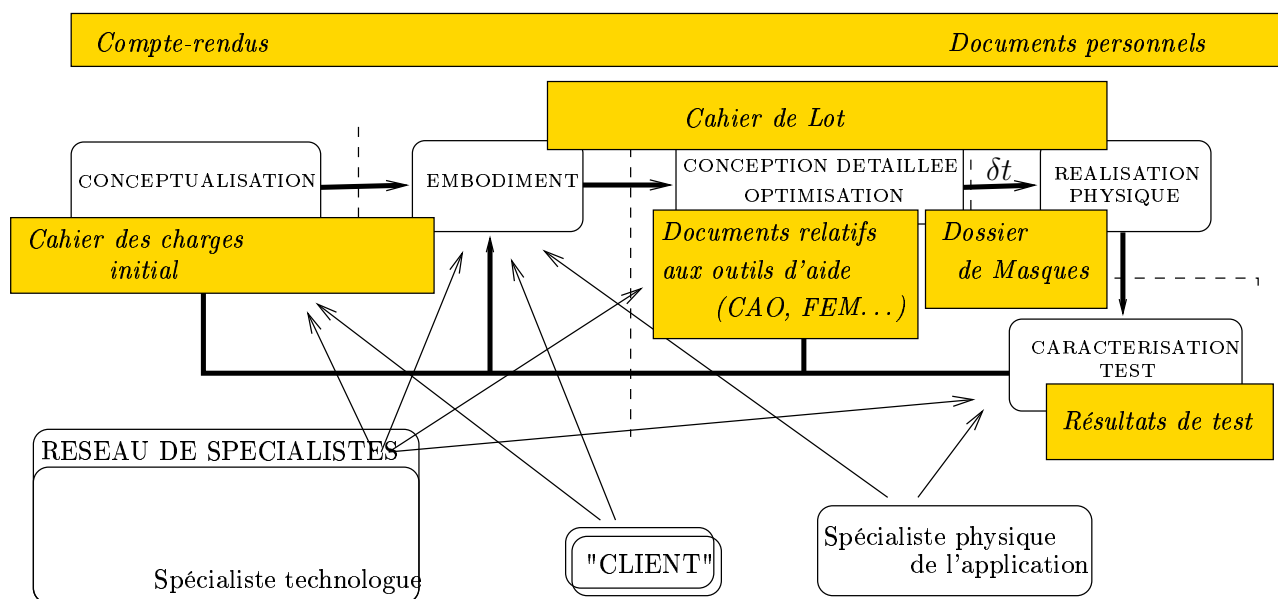


FIG. 4.8 – Les documents de la conception et leur positionnement dans le processus

cinématique [Che90]) ou bien simplement crayonnés, souvent versions simplifiées des précités. Dans le monde de la microélectronique, il en est de même avec tout un panel de symboles à différents niveaux d'abstraction (aux sens 1 et 2). Vadcard et al. [VCD95] définissent des niveaux de représentation qui s'apparentent à la décomposition selon les niveaux d'abstraction que nous avons vus au chapitre 3.1.2. Selon eux, chaque acteur apporte son point de vue de représentation dans l'activité de conception et cet enchaînement des points de vue conduit le processus de conception vers le produit final. Nous avons vu que le concepteur électronique disposait de modes de représentation pour l'aider dans sa tâche, le concepteur MEMS est confronté à un manque de représentation pertinente car les structures à dessiner sont trop éloignées des deux mondes d'où elles sont issues. Le tableau figure 4.9 montre, à divers niveaux d'abstraction, des représentations possibles d'une structure MEMS. Lors de la phase *embodiment* où l'on passe de simples idées à un début de représentation graphique, ces modes de représentation présentent de nombreux intérêts :

- ils font "naître" le produit dans le sens où ils commencent à lui donner une réalité physique en définissant l'implantation de ses composantes, sa géométrie...
- ils agissent comme "objets intermédiaires" et aident à la communication.

Au niveau comportemental, nous avons affaire à des courbes ou des résultats de simulation et au niveau physique, la seule représentation autre que le produit lui-même est le dossier de masques, c'est-à-dire la dernière étape, conclusion de la partie de conception avant réalisation physique. Ce n'est donc pas à ces niveaux-là que l'on participe à l'émergence du produit. De plus, nous avons vu au chapitre 3.3 beaucoup de travaux visant à apporter une aide à l'optimisation grâce à des modes de représentation très structurés. Ces modèles fonctionnent bien lorsque la géométrie du système est déjà définie mais n'aident en aucune manière à créer celle-ci. Nous avons vu aussi qu'il y a rupture dans le processus de conception lorsque, après la phase de clarification du cahier des charges et de conceptualisation, on propose une première représentation graphique

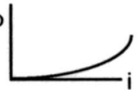
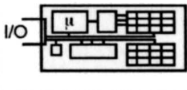
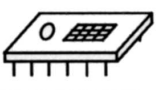
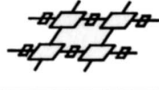
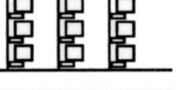
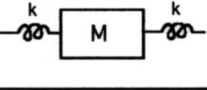
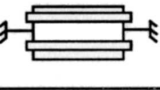
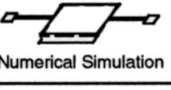
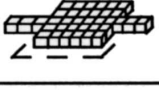
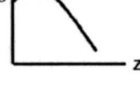
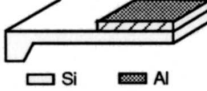
	BEHAVIORAL	STRUCTURAL	PHYSICAL
SYSTEM			
MODULE (SUB-SYSTEM)			
CIRCUIT			
DEVICE			
MATERIAL			

FIG. 4.9 – différents modes de représentation des MEMS
(Source [Ant95])

du futur produit. Cette rupture à la fois dans l'activité, dans l'apparition d'une certaine irréversibilité et dans le mode de représentation, fait acte de choix majeurs de la part du concepteur. Elle le fait aussi entrer dans une phase critique de la définition du produit. De plus, selon Blanco [Bla98], une représentation trop structurée apporte une bride à la créativité et c'est particulièrement à cette phase d'*embodiment* que l'activité du concepteur MEMS se rapproche le plus d'une activité de création. Et ce, même si nous avons vu précédemment que nous ne sommes pas réellement dans le cadre d'une conception innovante.

La principale difficulté vient de la nature 2D 1/2 des produits. En effet, la nature même du produit ne permet pas une représentation en trois dimensions aisée dans la mesure où il faut anamorphoser énormément la dimension perpendiculaire au wafer pour comprendre quelque chose à la représentation.

Pour une capitalisation des connaissances et des acteurs détenteurs des connaissances

Toujours dans une optique d'aide à l'émergence du produit, nous avons remarqué que c'est durant la phase d'*embodiment* que le concepteur MEMS entre le plus en contact avec les différents experts pour mettre en forme le produit. Les connaissances échangées durant cette phase sont très informelles et il n'est pas rare de débiter un entretien avec une question sur un point précis pour le finir sur un tout autre point avec la personne du bureau adjacent, plus compétente car ayant déjà été confrontée au problème. Ceci est

à la fois dû au manque de maturité des connaissances et du produit lui-même à cette étape.

Que ce soit sur le plan des technologies ou bien des contraintes liées à la physique de l'application, il est plus important en terme de gain de temps d'avoir un accès rapide à l'identité de l'expert qui possède une version de la connaissance recherchée à cet instant plutôt que la connaissance elle-même. En effet, nous avons vu que ces connaissances, par exemple de fabrication, sont à la fois très complexes, très entremêlées et très instables. De la même façon, nous avons vu que la multiplicité des experts et des projets fait que le concepteur MEMS s'adresse plus à un réseau d'experts qu'à une personne bien définie pour chaque problème identifié. Il nous semble alors plus pertinent de proposer une capitalisation des connaissances axée sur les personnes plutôt que sur les objets de connaissances en eux-même. C'est pourquoi nous avons adjoint cette notion de détenteur et de temporalité à notre classification des connaissances à la section 4.2.3.

Dans le chapitre suivant, nous proposons un cahier des charges pour un outil d'aide à la conception dans cette phase d'*embodiment*.

Conclusion, vers un outil d'aide à la conception

Dans ce chapitre nous appellerons "concepteur MEMS", l'acteur responsable de la partie mécanique du produit, de sa géométrie. Nous avons vu que c'est généralement lui qui mène le projet et qui effectue le passage de l'idée (validée à travers les diverses réunions d'avancement) aux différentes versions des masques, donc de la forme du produit. Il est totalement responsable du projet lors de la phase d'*embodiment* et c'est seul qu'il va faire émerger la géométrie du produit, avec les apports d'expertise des spécialistes.

L'outil que nous proposons se positionne à la fois comme un outil d'intégration dont il emprunte certaines caractéristiques et comme un outil de gestion des connaissances sur lesquelles il se base.

Nous nous sommes déjà posé la question de savoir quelles sont les connaissances auxquelles fait appel le concepteur dans sa conception de la géométrie du produit. Pour chacune de ces connaissances, nous avons aussi étudié la question de son niveau de validité et de temporalité. Enfin, nous avons insisté sur l'importance de savoir qui est le détenteur de cette connaissance et dans quelles conditions elle est arrivée en sa possession (première main, recherche bibliographique, appartenance à un projet similaire...). Afin d'utiliser cette classification dans une base de données, il convient de rajouter certains champs et certaines informations.

Dans un premier temps, nous proposons un cahier des charges pour un outil. Nous détaillerons les différents modules de l'outil ainsi que leur articulation dans une architecture globale de réseau.

Cahier des charges :

Le cahier des charges de cet outil peut se décliner en deux points principaux. Tout d'abord, il doit apporter un support d'aide pour la mise en réseau des acteurs afin de raccourcir les temps d'accès aux collaborations avec les experts. Enfin, il doit aider à la formalisation, la capitalisation des connaissances, dans une optique de veille technologique, pour favoriser leur réutilisation. Pour cela, nous utilisons les objets de connaissances détaillées au chapitre 4.2.3 pour les adapter et les rendre compatibles avec une base de données. Cette structuration formalise la connaissance et la capitalise dans le système. Le but de l'outil est d'améliorer le processus de conception en aidant à l'accès aux détenteurs des connaissances. Il doit ainsi améliorer et supporter le mode de

transmission naturel des connaissances. Il doit apporter un soutien aux projets en cours en favorisant la réutilisation des connaissances liées aux projets passés.

Les différents modules de l'outil sont les suivants :

- une base de données,
- un module de transformation de compte-rendu de réunion,
- un compte-rendu type,
- un module d'entrée manuelle de connaissances,
- un module de recherche dans la base de données et de visualisation,
- un module de maintenance.

Nous pensons qu'il faut chercher à réutiliser des actions faites par les acteurs de la conception de manière habituelle (en les modifiant un petit peu si besoin est). En effet, nous ne souhaitons pas leur ajouter un travail supplémentaire spécifique, comme par exemple remplir en plus de leurs compte-rendus de réunion une base de données, toute ergonomique soit elle. C'est pourquoi la solution d'utiliser ces compte-rendus afin d'agré-menter la base de données est un compromis acceptable car automatisable, même si une utilisation manuelle doit être possible.

Une base de données : Les connaissances sont organisées dans une base de données selon une adaptation de la classification proposée dans le modèle. D'autres champs ont été ajoutés pour aider à l'utilisation des compte-rendus de réunion. On trouve onze champs pour une entrée dans la base de données :

- Titre,
- Mots-clef,
- Date,
- Numéro du compte-rendu (nul en cas d'entrée manuelle),
- Détenteur principal,
- Détenteurs autres,
- Liste de diffusion (si il y a utilisation de compte-rendu),
- Type de connaissance,
- Indice de stabilité de la connaissance,
- Commentaire sur l'indice,
- Projet de rattachement,
- Résumé de la connaissance.

Certains champs de cette base de données sont totalement libres tandis que d'autres sont limités à un certain nombre de possibilités prédéfinies. Par exemple, l'indice de stabilité ne peut prendre que quatre valeurs : prouvé, en cours de validation, en cours d'expérimentation et simple supposition. Dans la mesure où il est assez difficile de qualifier quantitativement un indice de confiance nous avons ajouté un champs pour une précision sur cet indice (nous avons aussi proposé un nombre pair de choix pour éviter une réponse médiane systématique).

De même, le champ "type de connaissance" est limité aux six items de la typologie que nous avons proposée au chapitre 4.2.3.

Les projets sont liés entre eux pour une navigation aisée et une capitalisation sur le long terme.

Un module de transformation de compte-rendu de réunion : Les réunions d'avancement font toujours l'objet d'un compte-rendu qui sera diffusé (souvent *via* courrier électronique) aux acteurs présents, ainsi qu'à d'autres personnes. Afin de ne pas ajouter une surcharge de travail aux acteurs de la conception, un module de l'outil doit transformer de manière automatique ces compte-rendus en un format informatique acceptable par la base de données afin d'automatiser le processus d'ajout de données. Le format xml et le langage Perl sont de bons candidats pour une implémentation informatique. Les compte-rendus sont ensuite dirigés vers un espace de stockage.

Un compte-rendu type : Afin de faciliter la mise en oeuvre de l'outil et obtenir une base de données homogène (sans de nombreux champs capitaux vides par exemple), un modèle de compte-rendu est créé avec des balises et des cases à remplir. Les acteurs en entreprise rédigent beaucoup de compte-rendus, ils reprennent souvent une ancienne version qu'ils modifient pour produire le nouveau. L'utilisation d'un masque ne perturberait sans doute pas leurs habitudes. De plus, l'utilisation de champs à remplir aide à la formalisation et aussi à la création des connaissances. Les balises ont pour rôle l'automatisation du procédé de transformation du compte-rendu en un format compatible par la base de données. Une proposition de ce compte-rendu est faite en annexe C.

Un module d'entrée manuelle de connaissances : Dans certains cas, il peut être utile de pouvoir agrémenter la base de données manuellement, par exemple lors d'un entretien informel qui ne donne pas lieu à un compte-rendu écrit. Dans ce cas, c'est l'acteur qui doit remplir à travers une interface simple et ergonomique, de type explorateur Internet, tous les champs de la base de données. On peut envisager d'obtenir un document (de type compte-rendu car ils en partagent les champs) à l'issue de cette phase d'implémentation.

Un module de recherche et de visualisation : La recherche peut se faire par mots-clés, projets ou détenteur. Elle doit être suffisamment souple pour permettre un positionnement vague du problème. En effet, la phase d'*embodiment* est une phase durant laquelle le produit se dessine et donc les problèmes soulevés sont souvent très informels, très prospectifs. Une trop grande rigidité de fonctionnement de la base de données empêcherait son utilisation.

La dimension temporelle est très importante dans ces technologies émergentes à cause de l'aspect non stabilisé des connaissances qui sont manipulées. Lors de la visualisation des résultats d'une recherche, c'est-à-dire une liste de personne ayant travaillé sur la connaissance recherchée, la notion de temporalité doit être clairement indiquée. De la même façon, le niveau de confiance doit apparaître avec la connaissance. Il est difficile de quantifier un indice de confiance dans une connaissance mais une échelle de valeur indicative est appréciable. Le tri selon ces critères doit être possible.

Un module de maintenance : Ce module sert à l'acteur chargé de la maintenance du système pour contrôler la bonne marche de l'ensemble. Il est utilisé par un utilisateur spécifique "pilote". Son rôle est multiple : il gère, optimise et répare, si besoin, la base de données ; il installe des liens entre les différents projets ; il peut aussi s'assurer de la bonne utilisation de l'outil.

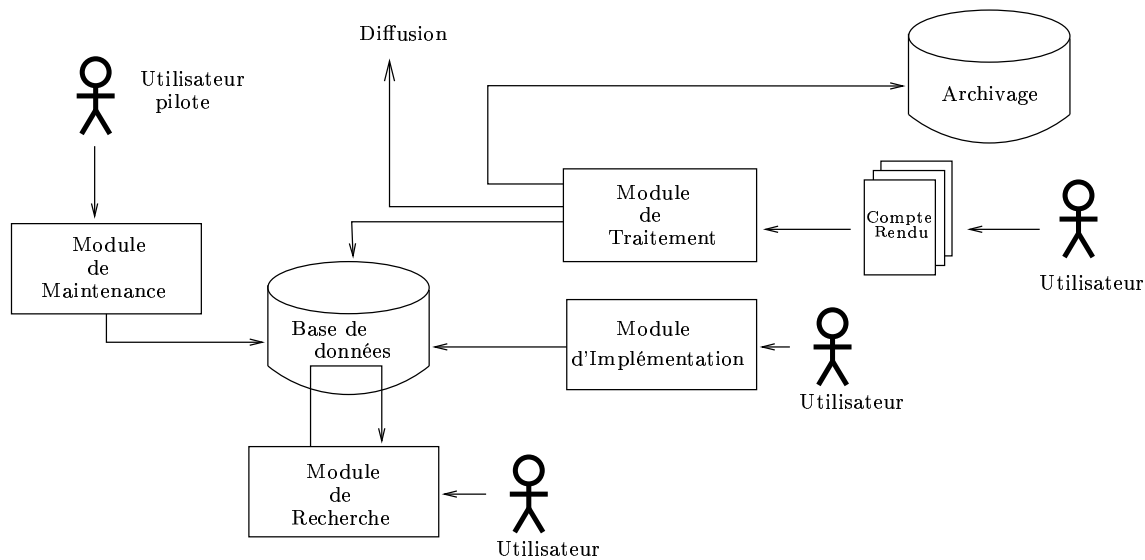


FIG. 4.10 – Structure de l'outil

Représentation de l'outil et de son environnement

La figure 4.10 propose une représentation schématique de l'articulation entre les différents modules.

Le réseau (Intranet de l'entreprise ou Internet) n'apparaît pas explicitement. De nombreux utilisateurs peuvent se connecter à la base de données pour l'implémenter ou la consulter, à travers une interface de type explorateur Internet. Sur cette figure un seul utilisateur est représenté. De même, les compte-rendus sont diffusés par courrier électronique *via* le réseau et sont envoyés dans un espace où ils seront en attente pour être traités puis archivés.

Nous avons vu le fonctionnement des modules de l'outil, nous proposons maintenant de développer ce qui a trait à l'utilisation que nous imaginons pour l'outil. En effet, nous savons que les outils ne prennent leur sens que dans l'action de ceux qui les utilisent. Nous proposons cinq scénarii d'utilisation : l'initialisation, l'entrée manuelle d'un objet de connaissance, l'entrée de connaissances depuis un compte-rendu, la recherche d'un interlocuteur pour un problème de conception donné, et la maintenance de la base de données.

Utilisateurs et utilisation :

Cet outil s'adresse à tout acteur du processus de conception, même si il est principalement destiné à ceux que nous avons appelés "concepteur MEMS". La base de données peut être implémentée par tous les acteurs. Cependant, son utilisation en temps que "annuaire des détenteurs de la connaissance" est plus centrée sur la phase informelle de création et donc plus adaptée, encore une fois, à l'acteur qui fait naître le produit.

- Initialisation du système : Un tel système ne peut fonctionner que si la base de données est fournie. Il convient donc de s'attendre à une longue période d'alimentation de la base de données avec les projets passés. La période d'initialisation doit aussi appliquer des liens entre les différents projets. En effet, les projets de recherche et développement sont souvent dépendants les uns des autres (poursuite de travaux, principe de fonctionnement différent pour une même application...). La phase d'initialisation apporte donc une structuration des données et un environnement non vide pour commencer à se servir de l'outil.
- Implémentation manuelle d'un objet de connaissance : Lorsqu'un utilisateur veut agrémenter la base de données avec un nouvel objet de connaissance, il se connecte au module d'entrée manuelle. Une interface de type explorateur Internet présente une fiche/questionnaire avec les différents champs à remplir, avec une liste de choix obligatoires dans le cas du type de connaissance et de l'indice de confiance. Les autres champs sont libres. Une fois la fiche remplie, l'utilisateur peut obtenir un document contenant les informations qu'il a entrées pour ses archives personnelles.
- Implémentation depuis un compte-rendu : La personne chargée de rédiger le compte-rendu pour une réunion d'avancement le fait sur le canevas type avec balises. Cela revient à ouvrir un document et le remplir de la même façon que tout document de ce type. Le fait d'avoir à remplir des "cases" force l'acteur à formaliser les connaissances rentrées (il reste cependant des espaces pour les remarques annexes). Le document est ensuite sauvegardé avec un nom de fichier standardisé avant d'être diffusé par courrier électronique (ou par versions papier). Il est ensuite sauvegardé dans un répertoire spécial qui sera scruté régulièrement. Lorsqu'un nouveau document apparaît dans ce répertoire, un module informatique effectue la transformation et l'implémentation dans la base de données, puis il est transféré dans l'espace de stockage, un nom standardisé de fichier est bien entendu obligatoire.

Un compte-rendu complet de réunion présente néanmoins souvent plus d'un objet de connaissance. Ainsi, dans le compte-rendu type, il existe six parties différentes correspondant à la typologie des connaissances. Chaque partie présente des champs pour écrire les informations souhaitées, l'indice de validité (parmi les quatre proposés) et le commentaire éventuel sur l'indice. Lors de l'implémentation dans la base de données, le module lit chaque partie et divise l'ensemble des données du compte-rendu en autant d'objets de connaissances qu'il y a de parties non vides. Le champ "résumé de la connaissance" est rempli avec le début du texte écrit par le rédacteur. Cette information est indicative, l'utilisateur se reportera au compte-rendu ou contactera la personne adéquate pour plus d'information.

- Recherche d'un interlocuteur pour un problème de conception : Lorsque le concepteur se heurte à un problème spécifique dans sa conception, il effectue une recherche dans la base de données via une interface de type explorateur Internet. L'outil lui donne un classement, selon un ordre choisi par l'utilisateur (par exemple la date, ou l'indice de confiance...), des acteurs ayant des connaissances sur le problème de conception.

Il donne aussi accès à l'intégralité des autres données de la base sur cette entrée, ainsi

que des liens vers d'autres projets associés (par acteurs, par type de connaissance, etc.). Les listes de diffusions font aussi partie des données que l'outil retourne. Le concepteur peut alors prendre contact avec l'acteur qui lui semble le plus en rapport avec son problème. Dans le cas où l'objet de connaissance qu'il a choisi est issu d'un compte-rendu de réunion, le numéro du compte-rendu permet de le retrouver dans la zone de stockage pour lecture.

- Maintenance : Une mauvaise utilisation d'un outil est toujours envisageable. Lors de l'implémentation d'un nouvel objet de connaissance dans la base de données, un utilisateur peut soit se tromper dans un champ ou bien entrer une information redondante.

De plus, comme nous l'avons déjà dit, les projets sont dépendants les uns des autres et il peut être avantageux pour l'utilisateur d'avoir un certain nombre de liens lui permettant d'explorer la base de données. Ces liens doivent être implémentés par l'acteur responsable de la maintenance. Rien ne permet de le faire à partir des compte-rendus ou bien à partir du module d'introduction manuelle d'objets de connaissance.

Maintenir une base de données consiste aussi à réaliser des opérations administratives telles que la mise à jour du système, la sauvegarde de la base.

Apports, validation et limitations

Les apports de cet outil sont principalement un gain de temps et une amélioration de la réutilisation des connaissances. En effet, il évite les longues périodes passées à rechercher "le bon interlocuteur" afin de débloquent un problème de conception. La phase d'*embodiment* est particulièrement prône à être améliorée dans son processus car nous avons vu que c'est durant cette phase que de nombreuses décisions capitales et irréversibles sur le produit sont prises alors que cette phase était la moins instrumentée. De plus, notre expérience personnelle nous a montré que trouver la bonne personne pour répondre à la bonne question pouvait parfois prendre plusieurs jours, voire des semaines. Par ailleurs, la place des connaissances est centrale dans les processus de conception, surtout dans le domaine des technologies émergentes où elles sont très changeantes, et où de nouvelles connaissances se créent rapidement.

Mais l'apport au niveau de la gestion des connaissances va au-delà d'un gain de temps en phase amont de conception. En effet, le fait de formaliser les connaissances associées à des acteurs et des projets permet une capitalisation et un historique particulièrement utile avec la volatilité des savoirs (souvent liés à des étudiants en thèse dans ces domaines de recherche et développement) et la non stabilité des connaissances. Le fait de capitaliser la connaissance au fil des projets et des compte-rendus de réunion présente un gain de temps par rapport à une capitalisation *a posteriori* mais manque de recul et de réflexion. En revanche, il n'entre pas dans les ambitions de cette proposition d'outil d'être un véritable support pour une capitalisation optimale des connaissances et des savoirs dans tous les domaines d'expertise. Il s'agit principalement d'une aide à la mise en réseau des

acteurs durant la phase particulière de l'*embodiment*.

Le cahier des charges de cet outil a été validé au fil de sa création par des discussions avec des concepteurs rencontrés lors du stage chez STMicroelectronics. En revanche, une véritable validation par mise en situation industrielle n'a pas pu être menée à bien pour des raisons de temps et de complexité informatique. En effet, si la création d'une base de données, d'un module de visualisation et d'entrée manuelle de connaissances sont assez aisées, l'écriture d'un module automatique de changement de format et d'implémentation est lourde en terme de temps et de connaissances techniques. De plus, un tel outil demande une implémentation sur le réseaux de l'entreprise pour être véritablement efficace ce qui demande une autre expertise d'ingénierie des réseaux. Des routines concernant certains modules ont été implémentées (en langage php), ainsi que la base de données sous le format mySQL.

Les problèmes de la qualité et de la redondance de l'information existent par ailleurs, si tous les acteurs sont à même d'implémenter la base de données sans contrôle. Cela favorise la quantité et la diversité des informations au détriment de la lisibilité à terme de l'ensemble. Ce problème a été résolu par Legardeur [Leg01] avec un acteur pilote qui valide les connaissances avant implémentation dans la base de données. Ainsi, l'ensemble des acteurs renseignent la base mais le pilote a une action préventive d'une mauvaise utilisation de l'outil.

Enfin, dans le contexte de recherche et développement et avec une utilisation en entreprise, des problèmes de confidentialité peuvent émerger. Ce problème peut être résolu par l'implémentation de profils et de mots de passe donnant accès à différentes parties de l'outil.

Conclusion

Nous avons présenté la modélisation d'un processus de conception de MEMS. Par la nature du produit, à la charnière entre mécanique et microélectronique, et le contexte de recherche et développement, nous avons proposé un processus basé sur une description *top-down*. Nous avons aussi proposé une modélisation de l'équipe de conception et des interactions entre les différents acteurs de la conception d'un MEMS.

Nous avons mis en évidence des aspects non optimaux du processus de conception, dans la phase d'*embodiment* qui est déjà peu instrumentée que ce soit en terme de méthodes ou d'outils. Des manques aux niveaux des modes de représentation et de l'utilisation optimale du réseau d'acteurs ont été soulignés. Un cahier des charges d'un outil d'aide à la conception (et à la capitalisation des connaissances dans ces projets) a été présenté.

Troisième partie

Une formalisation des connaissances des MEMS en vue de l'enseignement de leur développement

Introduction

Tout au long de ces travaux de thèse, nous avons préalablement appris énormément sur ce domaine des micro technologies, domaine que nous ne connaissions pas. Cet apprentissage s'est effectué tant au niveau des produits que des méthodes. Pour nous constituer le bagage de connaissances scientifiques et techniques nécessaire à la compréhension et l'analyse de l'activité de conception, nous avons abordé le domaine par plusieurs points d'entrée : la réalité industrielle, une étude bibliographique sur les produits, les méthodes de fabrication et les méthodologies de conception adaptées.

Les connaissances scientifiques et techniques sont issues de notre stage à l'université de Berkeley durant lequel nous avons travaillé sur des technologies de fabrications (voir l'annexe A). Les connaissances que nous avons retirées de ces études sont principalement scientifiques sur des points très précis de certains procédés de fabrication. Cela nous a permis de comprendre les possibilités et limitations des procédés, ainsi que les contraintes fondamentales qui en découlent sur le produit. Les connaissances d'ingénierie sont quant à elles issues de notre immersion industrielle. C'est à travers l'observation des pratiques de tous les acteurs de la conception et à travers notre travail personnel que nous avons pu faire un état des lieux des connaissances et de leur utilisation.

L'effort de synthèse et de formalisation nécessaire à la création d'un enseignement va dans le sens d'une prise de recul par rapport à des connaissances très techniques. En effet, choisir le contenu scientifique du cours, l'enchaînement des séances et des phases pédagogiques nous a demandé un effort de structuration qui a complété notre réflexion quant à nos questions de recherche. Le but d'un enseignement en école d'ingénieur est de préparer les étudiants à leur futur métier. Ainsi, structurer les savoirs qui leurs seront nécessaires nous a amené à avoir un regard différent sur notre immersion industrielle.

Dans cette troisième partie, nous donnerons un témoignage sur cet aspect de l'enseignement des technologies de développement de micro produits. Nous avons créé un cours d'introduction à ces technologies émergente destinés à des élèves de deuxième année d'école d'ingénieurs. Ce cours présentait un volume horaire de seize heures réparties en 8 séances. Il avait pour objectif de familiariser les étudiants avec les technologies MEMS. Nous détaillerons le contenu du cours en terme d'objectifs et de choix pédagogiques et didactiques.

Chapitre 5

Un cours d'initiation aux micro technologies

5.1 Objectifs du cours et implémentation

Objectifs Ce cours intervient dans le module de "techniques de production" en deuxième année de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydro Mécanique de Grenoble (ENSHMG). Nous l'avons intitulé "Initiations aux micro technologies" car l'objectif général du cours n'était pas de transformer les étudiants en des spécialistes en techniques de production de micro produits mais de leur donner les connaissances suffisantes pour pouvoir élargir leur choix en matière de demande de stage, d'emploi... En effet, l'agglomération grenobloise est riche en entreprises dans le domaine de la microélectronique et de petites start-ups dans le domaine des microsystèmes.

Nous avons défini des objectifs locaux à partir de certains savoirs mis en évidence dans le cadre de cette thèse. Le choix didactique de ces savoirs s'est imposé à travers notre réflexion quant à notre activité de recherche : le produit a émergé à travers les applications, les méthodes de fabrication et le processus de conception. Ainsi, nous avons choisi d'apporter des compétences et des savoirs associés basés sur :

- les méthodes de fabrication,
- les principes de fonctionnement,
- les propriétés électroniques et mécaniques des matériaux utilisés, en particuliermet des semiconducteurs,
- les méthodes de calcul,
- les méthodes de développement.

Pour chacun de ces savoirs, nous avons pris le parti de partir d'un besoin réel en terme de produit industriel.

Moyens Les moyens à notre disposition en terme horaire était de 16 heures, le cours se terminait par une séance d'examen. Les séances n'étaient pas clairement séparées en cours, travaux dirigés, etc. mais leur organisation a été laissée à notre discrétion. En terme de moyens matériels, nous disposions de salles équipées de médias de projection mais pas de moyens qui nous auraient permis de proposer des travaux pratiques ou des réalisations physiques de projets de conception. En revanche, comme nous l'avons dit, de nombreuses

entreprises de l'agglomération nous permettent de proposer des visites afin de montrer la réalité industrielle aux étudiants. De même, nos contact avec STMicroelectronicsTM nous ont permis de faire intervenir un ingénieur concepteur de MEMS dans le cours avec pour double objectif une présentation des produits et du travail industriel et une légitimisation du contenu des enseignements.

Choix pédagogiques Après une expérience d'une année de fonctionnement de ce cours, nous nous sommes aperçu que les prérequis des étudiants dans le domaine des micro produits était non seulement très limités mais stéréotypés. Pour cela, il nous a semblé essentiel de proposer une séance d'introduction au domaine des micro produits, très générale, afin de donner des moyens d'analyse de la suite des enseignements (par exemple, les principes physiques fondamentaux des semiconducteurs) et de déstabiliser leur base de connaissances très axées sur la fabrication mécanique "macro".

Nous avons choisi de proposer pour chaque séance un mélange d'activités élève et d'enseignement plus transmissif. Mais l'état des connaissances des élèves ne permettait pas de proposer des travaux personnels avant d'avoir introduit clairement le sujet et les méthodes de fabrication qui sont très spécifiques. En effet, nous avons vu que la géométrie et la nature même des produits sont très liés à la façon de les fabriquer. Cela nous a conduit à organiser les trois premières séances sur l'introduction et les méthodes de fabrications, tout en aménageant des activités de découverte pour les étudiants : débats sur la signification des termes de "micro" et de "miniaturisation", première proposition de séquence de fabrication... Par la suite, une mise en application systématique sur des projets ou des exercices courts a été mise en place, les activités élèves étant alors une synthèse des enseignements.

Un miniprojet de conception, proposé environ à la moitié de la séquence d'enseignement, s'inscrivait dans une démarche d'ordre méthodologique. Les élèves doivent mobiliser leurs savoirs mais aussi choisir parmi ces savoirs et utiliser des outils et des méthodes pour résoudre un problème donné : à partir d'un besoin réel, choisir des principes physiques et proposer une géométrie ainsi qu'une séquence de fabrication. Une fois les connaissances des élèves dans ces domaines validées par l'évaluation de ce miniprojet, nous allons plus loin en proposant une séance qui présente des moyens de calculs précis sur un exemple type, toujours tiré d'une réalité industrielle, le micro résonateur électromécanique. Cela nous permet de revenir sur les principes d'actionnements et les choix de fabrication d'un point de vue modélisation.

Pour la séance finale du cours, nous avons choisi de proposer des pistes de réflexion ainsi que des perspectives. Le choix d'un dernier exercice d'application permet une vision de l'état des connaissances des étudiants pour des apports éventuels d'informations sur des savoirs mal acquis. Dans la même optique que les savoirs transmis dans cette dernière séance, ce dernier exercice doit aussi ouvrir sur des possibilités que les moyens horaires ne nous ont pas permis d'explorer.

Implémentation, décomposition des séances Pour répondre à ces objectifs, en fonction des moyens à notre disposition et de nos choix didactiques et pédagogiques, nous avons

organisé le cours selon les séquences d'enseignement suivantes :

- Introduction aux micro produits,
- Techniques de fabrication 1 & 2,
- Les principes de fonctionnement et de solutions techniques et miniprojet, intervention d'un ingénieur MEMS,
- Etude en détail du micro résonateur électromécanique,
- Notions de méthodologies de développement de micro systèmes.

L'évaluation s'est faite sur la présentation orale du miniprojet ainsi que sur un examen final écrit.

5.2 Détail des séquences d'enseignement

5.2.1 L'introduction aux micro technologies

Avant de commencer à enseigner le coeur des méthodes de développement des micro produits, c'est-à-dire les procédés de fabrication et les principes de fonctionnement, il convient de proposer aux étudiants une introduction à ce domaine des technologies émergentes. En effet, le vocabulaire "micro" et "miniature", comme nous l'avons déjà explicité au chapitre I, veut dire un peu tout et n'importe quoi. Afin de se rendre compte des connaissances initiales des étudiants sur le domaine nous avons organisé un court débat sur les micro technologies dans le cinéma de science-fiction pour essayer de faire la part des choses entre fiction et possibilités technologiques.

Nous avons décidé de donner aux élèves des savoirs sur les bases fondamentales de la physique des semiconducteurs afin de leur fournir des moyens d'analyse sur la suite des technologies présentées. Une approche double, par l'historique des techniques sur silicium et par des modèles tels que l'énergie de Fermi, pose des bases solides pour comprendre les méthodes de fabrication adaptées des technologies VLSI qui sont la base des méthodes de fabrication des MEMS. Ce cours sert aussi à construire un vocabulaire commun et de les asseoir sur une réalité technique. En effet, les termes de wafer, VLSI, *back-end*, etc. sont totalement nouveaux pour la grande majorité des étudiants.

L'introduction s'articulait autour des points suivants :

- Historique de la miniaturisation des produits vers les MEMS,
- Exemples d'applications industrielles et dans le domaine de la recherche,
- Quelques notions d'électronique fondamentale,
- Le silicium, présentation et méthode d'obtention des wafers,
- introduction aux méthodes de fabrication : dépôts, photolithographie, gravure.

Les savoirs généraux quant aux produits permettent aux étudiants, à l'issue de cette séance, de faire la différence entre un produit miniaturisé et un MEMS. En effet, les exemples d'application proposés ainsi que le débat introductif présentent un certain nombre de critères tels que le mouvement, la présence d'électronique mais surtout l'aspect intégration monolithique sur silicium. Cela nous a permis de mettre en valeur ces notions d'intégration électronique et mécanique ainsi que les nombreux do-

maines d'application tels que la biologie, les télécommunications ou encore l'informatique.

Une visite de l'entreprise SOITEC à Crolles dans les environs de Grenoble a été organisée par l'école. Nous avons à cette occasion présenté la technologie des wafers SOI, les méthodes de fabrication et les avantages. Enfin, une liste de lectures que nous avons estimées pertinentes leur a été fournie (par exemple les deux articles de Richard Feynmann [[Fey60](#), [Fey93](#)]) afin de leur donner d'autres moyens d'analyse pour la suite du cours.

5.2.2 Séquence de description des techniques de fabrication

Cette séquence comprend deux séances qui sont fondamentales dans le sens où c'est la première fois que ces étudiants sont confrontés à ce type de technologies de fabrication. Les savoirs associés aux méthodes de fabrication sont fondamentaux, nous l'avons montré dans la première partie de cette thèse. L'un des objectifs est aussi de bien faire appréhender les contraintes sur la géométrie et dans les principes de solution qu'apporte le choix restreint de ces procédés de fabrication.

Les étudiants ont désormais les prérequis nécessaires pour comprendre les enchainements des étapes additives, sélectives et soustractives que sont dépôts/lithographie/gravure. En revanche, il est très difficile d'effectuer l'adaptation depuis les techniques de fabrication mécaniques "macro" desquelles les étudiants sont familiers. Le poids des connaissances dans ce domaine fait que nous avons dû déstabiliser les raisonnements et forcer les étudiants à changer radicalement leur corpus de connaissances et pour qu'ils échappent à ce contexte, pour qu'ils créent leurs propres bases de référence. Afin de progresser du plus connu vers le plus nouveau, nous avons débuté le cours par la miniaturisation des procédés classiques de fabrication (cf chapitre [2](#)), puis, nous avons détaillé chaque étape des procédés issus de la microélectronique adaptés aux MEMS (cf chapitres [2.1.2](#) et [2.2.3](#)).

Cette séance suivait le plan suivant :

- les méthodes de fabrication issues de la miniaturisation des processus de génie mécanique,
- la séquence classique addition/sélection/soustraction,
- la photolithographie,
- la différence entre micro usinage de surface et micro usinage en volume,
- les dépôts de films minces,
- la gravure chimique (*etching*),
- le LIGA,
- le procédé MUMPS et les fonderies multi utilisateurs.

Nous avons fait mettre en application ces connaissances des procédés de fabrication VLSI et MEMS en proposant un exercice sur une poutre suspendue à actionnement électrostatique. Volontairement, nous n'avons pas orienté les étudiants dans le sens d'une fabrication en micro usinage de volume ou de surface (cf chapitre [2.2.3](#)). Le but était de faire assimiler le principe de lithographie qui semble être, d'expérience, le plus difficile. En

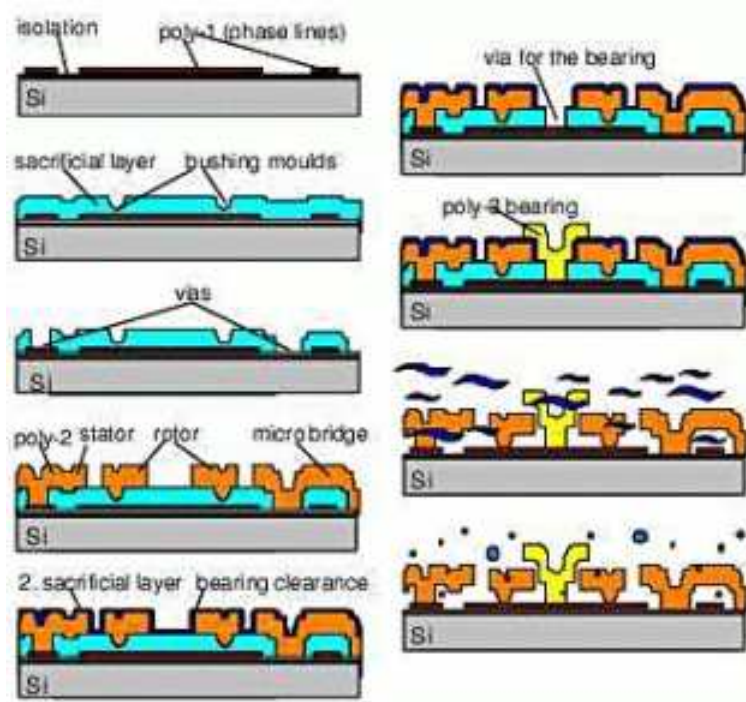


FIG. 5.1 – Exercice de lecture de séquence de fabrication

effet, nous avons pris conscience de ce fait lors de l'évaluation des élèves pour la première version de ce cours l'année précédente. Si les savoirs sur les applications et les généralités étaient bien assimilés, la mise en application des techniques de fabrication pour produire une séquence de fabrication n'avait pas répondu à nos attentes par rapport aux acquis supposés. Nous avons décidé d'insister sur cet aspect et chaque mise en application des connaissances comportait donc un retour sur les méthodes de fabrication.

Lors de la correction, nous avons insisté sur la différence entre micro usinage en volume et micro usinage de surface sur les technologies de fabrication spécifiques pour MEMS, ainsi que sur la nécessité de concevoir les masques et les enchaînements de couches de matériaux simultanément.

L'objectif principal de ce cours n'était pas de rendre les étudiants capable de produire complètement un cahier de lot de MEMS, nous avons vu que cela requièrait des connaissances bien trop étendues et précises pour être enseignées selon les moyens horaires dont nous disposions. En revanche, nous voulions qu'ils soient capables de lire un document présentant une séquence de fabrication. Aussi, en guise d'exercice, nous leur avons proposé une représentation d'une séquence complète de fabrication basée sur la technologie MUMPS, en figure 5.1. Le but de l'exercice était de renommer chaque étape de la séquence et de produire un croquis en trois dimensions du produit. Il était, enfin, demandé aux étudiants d'imaginer son fonctionnement.

5.2.3 Principes de fonctionnement, miniprojet et intervention industrielle

Dans le cadre de cette séquence d'enseignement, nous proposons un miniprojet où les étudiants conçoivent un micro composant à partir d'un cahier des charges simple en choisissant un principe de fonctionnement et une méthode de fabrication. L'objectif est de dépasser le travail sur les savoirs techniques et scientifiques et de se placer à un niveau méthodologique. Nous avons présenté ces principes dans le chapitre 1 de cette thèse, les différents modes d'actionnement sont :

- électromécanique (en utilisant les forces électrostatiques ou l'effet piézoélectrique),
- électrothermique (en utilisant la dilatation différentielle d'une structure de type bilame),
- magnétique.

Les sujets des miniprojets étaient basés sur les capacités variables et les micro *switchs*. Notre choix s'est fixé sur ces produits pour leur similitude de fonctionnement et pour leur réalité industrielle marquée.

Les séances étaient organisées comme suit :

- Cours sur les principes de fonctionnement,
- Découverte des miniprojets et travail en groupe sur la physique de l'actionnement,
- Validation du principe,
- Présentation de l'intervenant sur les produits et le travail en entreprise,
- Présentation des projets par les groupes,
- Proposition de réalisations industrielles et universitaires.

Le miniprojet était un moyen de mobiliser les connaissances des élèves sur les procédés de fabrication à travers des exemples concrets. Il s'agissait aussi de les faire réfléchir sur les principes physiques de fonctionnement et de découvrir par eux-même les contraintes d'une géométrie plane, d'une structure par couche et de l'importance de la couche sacrificielle pour le mouvement. En présentant rapidement les modes d'actionnement à travers quelques réalisations nous avons pu, dans un premier temps, laisser les élèves chercher des principes de solutions par groupes sans trop les guider. Avant la fin de la séance, nous avons validé leurs principes de solution dans les grandes lignes, afin que lors de la séance suivante ils puissent présenter une séquence de fabrication complète.

Durant cette séquence, un ingénieur concepteur de MEMS de STMicroelectronicsTM est venu présenter son travail aux étudiants et assister aux présentations des miniprojets. Sa présentation a permis de donner aux élèves un aperçu du travail de recherche et développement dans le domaine des MEMS dans une grande entreprise mais aussi de mobiliser leurs connaissances en comprenant le vocabulaire employé et en analysant les produits présentés. De plus, la présence de cet intervenant extérieur industriel apportait un "poids" de légitimité supplémentaire et un formalisme plus important à l'exercice de présentation du projet. L'apport de cette intervention est donc double : une légitimité industrielle sur le contenu, un témoignage sur le travail et les produits industriels. Nous avons choisi de placer cette intervention sur cette partie du cours plutôt que lors d'une séance d'enseignement plus transmissif afin d'axer son apport à la fois sur le travail des élèves et sur le contenu du cours.

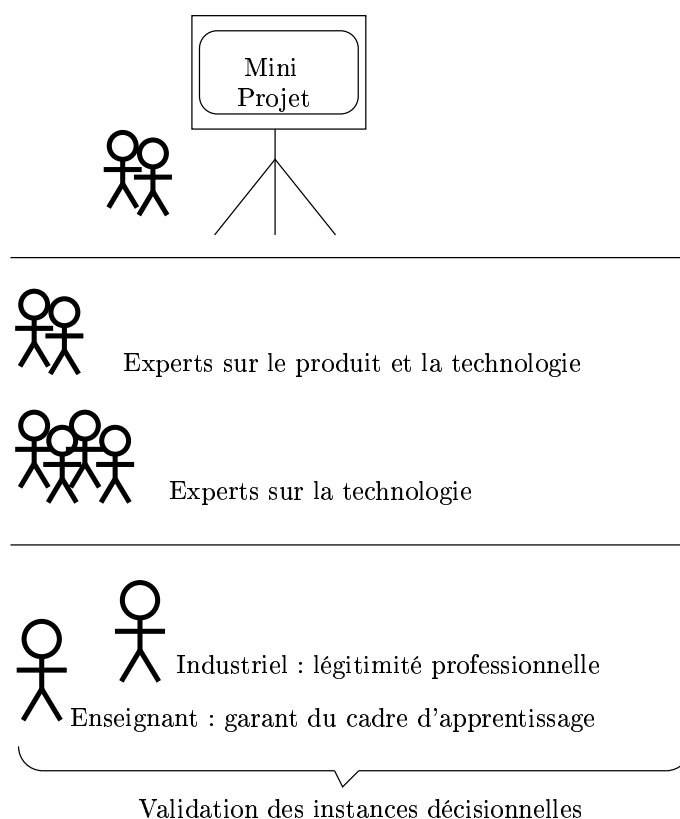


FIG. 5.2 – Organisation du mini projet

Pour ce miniprojet, les élèves étaient répartis en quatre groupes, deux groupes par sujet. Lors de la validation du principe de fonctionnement, nous avons pris le soin de guider les étudiants sur des solutions différentes afin de provoquer des débats lors de la présentation. En effet, si lors de cette présentation l'enseignant et l'intervenant industriel représentent les instances décisionnelles d'une entreprise, les autres groupes représentent les experts du domaine. Le deuxième groupe travaillant sur le même sujet s'est construit des connaissances sur le produit et tous les groupes ont commencé la construction d'un corpus de connaissances relatives aux technologies de fabrication.

La figure 5.2 présente cette structuration. On y voit une transposition des organisations industrielles dans le cadre d'une pratique de l'enseignement. Chaque participant a un rôle transposé, celui d'un acteur de l'entreprise.

Chaque groupe a présenté sa conception en commençant par le principe de fonctionnement puis en détaillant la séquence de fabrication. Les élèves travaillant sur le même sujet puis les autres élèves ont ensuite demandé des précisions, tant sur le mode de fonctionnement que sur la méthode de fabrication. Cette organisation nous permet de faire une évaluation à deux niveaux : d'abord au niveau des acquis des étudiants puis au niveau de notre méthode pédagogique par rapport aux questions posées par les autres groupes à celui qui présente.

Nous avons, pour finir, proposé en guise de correction un panel de réalisations industrielles

et universitaires sur ces applications.

5.2.4 Etude approfondie du résonateur électromécanique

Cette séquence d'enseignement a pour but de donner aux étudiants des méthodes quantitatives d'étude des microsystemes. En effet, jusqu'à présent les connaissances apportées étaient qualitatives ou de l'ordre de la culture du domaine. L'exemple du résonateur électromécanique est pertinent car il continue dans l'optique de maîtrise de connaissances sur les principes d'actionnement et sur les méthodes de fabrication et amène de nouveaux savoirs.

Ces nouveaux savoirs sont de l'ordre des connaissances scientifiques et des méthodes. L'analyse du micro résonateur nécessite les calculs de différentes formes de forces électrostatiques selon si l'on travaille sur la variation d'entrefer ou de surfaces en regard. Il permet aussi de comprendre et de calculer les rigidités des structures en méandre à travers des formules de résistance des matériaux vues dans d'autres cours. Par la suite, on peut calculer la fréquence propre du système en fonction de sa géométrie en considérant le système comme un oscillateur harmonique. La formulation mathématique est proposée au chapitre 1.

Cette séance est une séance de travaux dirigés. Le sujet de départ est un besoin réel et une application industrielle. Le fonctionnement du dispositif est très intéressant pour les étudiants dans la mesure où il fait réellement intervenir un couplage électrique et mécanique qui le fait fonctionner. Les forces électrostatiques sont créées par la partie électronique du dispositif, mais, celles-ci étant uniquement attractives, le fonctionnement de l'ensemble nécessite des forces purement mécaniques de rappel des ressorts. Le mouvement est bien issu d'une intégration électromécanique.

En fin de séance, il est demandé aux étudiants de proposer rapidement une séquence de fabrication pour le dispositif, afin de mobiliser à nouveau les connaissances des autres séances.

5.2.5 Les éléments de réflexion et de mise en perspective

L'objectif de cette dernière séance est de recentrer le cours sur les applications et les besoins en fournissant aux étudiants des pistes de réflexions. On y aborde le thème de la conception assistée par ordinateur, le *packaging*, le test des microsystemes, etc. Le choix didactique sur les perspectives est directement issu de la réalité industrielle et de notre expérience de recherche : par exemple, dans le domaine des modes de représentation, ou de certaines avancées technologiques sur le CMP et les modes de gestion de l'énergie. Le développement d'un micro produit est une activité complexe et longue. Cela va plus loin qu'une simple mise en application de principes physiques par l'intermédiaire de technologies de fabrication. Ces étudiants sont destinés à devenir des ingénieurs, leur travail sera axé sur de la production. Dans ce cadre, il est important de donner des informations sur tous les aspects du développement des produits.

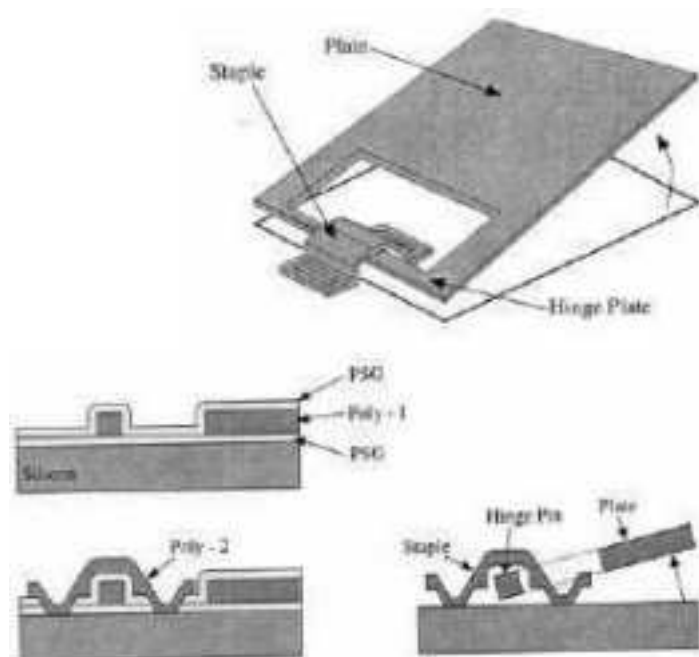


FIG. 5.3 – Réalisation d'une charnière

Avec ce double objectif de compléter les connaissances d'ingénierie et d'apporter des pistes de réflexion, la séance proposait les points suivants :

- Le polissage chimico-mécanique, recherche et développement,
- Les outils informatiques de développement,
- Le *packaging* avec l'exemple du capteur de pression,
- Le test des produits,
- Les problèmes énergétiques,
- Le micro assemblage et les "micro usines".

Pour finir, il a été demandé aux étudiants d'imaginer une séquence de fabrication pour réaliser une charnière en utilisant le procédé MUMPS. Ce choix de l'exercice s'inscrit dans une démarche d'ouverture. En effet, le cahier des charges était volontairement très vague car l'objectif était de proposer un produit dont la cinématique dépassait la "simple" déformation de poutre. Un travail un peu plus approfondi sur la(les) couche(s) sacrificielle(s) est nécessaire pour réaliser cette fonction. Les étudiants ré-investissent leurs connaissances et vont plus loin dans une réflexion sur le produit. Cela permet aussi de voir si les notions fondamentales de couches et de masques sont bien acquises avant de procéder à l'évaluation. Le "produit" final est présenté en figure 5.3.

5.3 Bilan du cours

Certains partis pris ont été faits durant la création de cette formation, et notamment au niveau pédagogique. En effet, nous avons privilégié un mélange systématique des activités élèves et des apports d'enseignement transmissif : que ce soit dans les activités de découvertes synthétisées par l'enseignant, ou bien une mise en application des étudiants suivant un apport formel d'apport de connaissances. Par ailleurs, nous avons dépassé le

stade de l'enseignement pur en proposant une évaluation par un intervenant extérieur. Ces choix pédagogiques sont basés sur une volonté de relier le cours à la réalité industrielle.

Comme nous l'avons dit, les ingénieurs issus de l'ENSHMG sont formés pour la production, le principal problème d'un cours sur les micro systèmes dans une structure telle que l'ENSHMG est donc relatif aux moyens mis à notre disposition. En effet, on ne peut que proposer aux élèves des cours magistraux et des travaux dirigés mais pas de travaux pratiques et encore moins de réalisations physiques. Pour pallier à ce problème de validation par la pratique, nous avons fait intervenir un ingénieur de conception et proposé le miniprojet par groupe, cette activité a bien rempli son office et a reçu un bon accueil chez les étudiants. L'intervenant industriel a joué le rôle de l'expert validant les résultats. Dans l'avenir, il conviendrait de pouvoir réaliser, sans doute à l'aide des fonderies multi utilisateurs, de véritables projets menant à des réalisations puis des tests en laboratoire, à l'aide de microscopes MEB. Il n'est pas envisageable de créer une salle blanche ou un laboratoire dans l'école mais des partenariats avec d'autres écoles plus spécialisées en microélectronique ou avec des laboratoires de recherche travaillant dans le domaines de micro technologies pourraient être réalisés.

Le cours est basé sur les produits et les applications, avec un souci de toujours partir d'un besoin client, afin de promouvoir une approche orienté besoin/client plutôt que poussée par les avancées technologiques. Ce choix didactique a été dicté par notre vue du domaine après nos travaux de thèse ainsi que sur une analyse de savoirs et de leurs types : technologiques, scientifiques, méthodologiques, savoirs liés aux pratiques industrielles d'ingénierie, etc. Même si nous n'avons pu proposer un enseignement que parcellaire des méthodes de développement (pour des raisons de moyens limités, sur les parties fabrication et test de structure...), nous pensons avoir donné une idée du processus dans sa globalité.

Il serait alors intéressant de mettre en perspective la vision des étudiants quant à la conception des systèmes mécaniques après ce cours. En effet, le nombre très limité de procédés de fabrication de MEMS contraint énormément la géométrie et la nature des produits, ce qui est une différence marquante par rapport aux autres enseignements de type bureau d'étude de systèmes mécaniques "macro".

5.4 Encadrement d'un stage de fin d'études

Un élève de troisième année de l'ENSHMG a effectué son stage de fin d'étude à l'Université de Singapour dans le domaine des micro technologies. Son projet de fin d'étude a été néanmoins réalisé dans l'enceinte de l'école et nous avons participé à la création du sujet, l'encadrement de l'élève et son évaluation. Nous avons choisi l'étude complète, depuis l'analyse bibliographique jusqu'à une proposition de conception et de séquence de fabrication, d'une tête de lecture/écriture de disque dur informatique. [Tos02]

L'étudiant a réalisé des calculs analytiques sur tableur ainsi que des simulations à l'aide du logiciel SUGAR de l'Université de Berkeley, CA, USA. Des captures d'écran réalisées

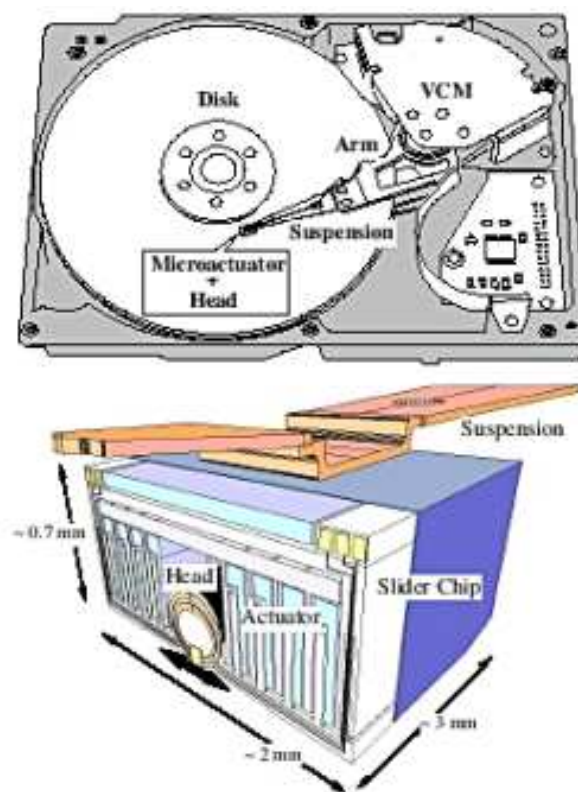


FIG. 5.4 – Positionnement de la tête et de l'actionneur
(Source [Tos02])

lors de cette étude sont incluses dans le chapitre 3.3. Puis nous nous sommes heurtés à des problèmes de représentation et de manque de connaissances précises lorsque nous en étions à procéder à la réalisation d'une simulation de "cahier de lot". En effet, ne disposant pas de logiciels adaptés, nous avons utilisé un modeler 3D de CAO classique (SolidWorksTM), afin de représenter la géométrie finale.

Conclusions et Perspectives

Bilan sur la démarche et conclusions

Au terme de ces travaux, nous présentons un bilan sur les apports de notre démarche et des résultats atteints. Nous rappellerons les questions de recherche qui ont été les nôtres, puis nous ferons une synthèse des contributions de ces travaux de thèse. Elles se décomposent en trois parties, respectivement dans le domaine de la caractérisation des micro produits, dans le domaine de la modélisation des processus de conception et dans le domaine de la formalisation des connaissances avec pour but l'enseignement. Nous aborderons ensuite les perspectives ouvertes par ce travail de recherche.

Ce travail de recherche se situe dans un cadre de technologies émergentes, innovantes. Les produits MEMS sont promis à un avenir brillant que ce soit en terme économique ou en terme d'apports scientifiques et de réalisations technologiques. Nous avons détaillé les très nombreux domaines d'application dans lesquels ces produits apportent des solutions et des améliorations.

L'émergence des micro produits nous a amené à nous questionner sur leur nature et à chercher à appréhender leurs caractéristiques fondamentales. Cette réflexion sur la nature des produits permet de poser la question de l'influence de leurs caractéristiques sur les processus de conception et plus largement de développement de ces produits.

Les questions de cette recherche étaient bien :

- *Q1* : Comment caractériser de manière fondamentale les micro produits ?
- *Q2* : Pour développer ces micro produits, les méthodes de conception sont-elles différentes ?

La démarche que nous avons suivie passe par la constitution d'un corpus de connaissances sur le produit et sur ses méthodes de fabrication. L'approche bibliographique et l'étude des procédés de fabrication spécifiques effectuées dans le cadre d'un stage universitaire présentent une première approche dans ce sens. Elle permet aussi de construire une légitimité pour l'immersion industrielle et pour effectuer la translation entre les connaissances techniques et scientifiques et les connaissances d'ingénierie. Ainsi, la position que nous avons occupée durant notre immersion industrielle, en tant que stagiaire / ingénieur de conception de MEMS, nous a donné la possibilité de poser un regard sur l'état des connaissances scientifiques et d'ingénierie dans une grande entreprise telle que STMicroelectronicsTM. Nous avons pu nous rendre compte de la nature d'un processus de conception de MEMS et mettre en application nos connaissances pour en affiner l'analyse.

Au cours de notre recherche, nous avons évolué en terme d'objet d'étude en passant des micro produits aux micro systèmes électromécaniques MEMS. Les dimensions des produits qui nous intéressent ici varient bien entre les quelques millimètres et la centaine de nanomètres. En revanche, les contraintes d'intégration des technologies de fabrication VLSI font que le concept d'assemblage prend un tout autre sens et conditionne le processus de conception.

Une caractérisation des micro produits

A travers l'analyse des micro produits dans leur différents domaines d'application et des méthodes de fabrication nous avons fait état de certaines caractéristiques fondamentales. Il s'agissait d'identifier et de structurer à la fois ce qui distinguait les micro produits, et d'analyser l'influence de ces spécificités sur la conception.

Notre apport se situe dans cette classification argumentée des micro produits de types micro systèmes électromécaniques (qui englobent les micro composants) dans le domaine des produits miniaturisés. Le recensement de ces spécificités nous a amené à une caractérisation en neuf points :

- Des dimensions micrométriques,
- Une fabrication par les technologies issues de l'industrie VLSI,
- Une géométrie plane,
- Des formes simples,
- Du mouvement entre différentes parties,
- Des aspects multiphysiques peu découplables,
- Un assemblage avant fabrication,
- Des principes de solutions conditionnés par les dimensions,
- Un *packaging* complexe et fonctionnel.

Certaines de ces caractéristiques sont directement issues du processus de miniaturisation des systèmes : la taille bien-sûr, mais aussi le fait que certains principes de solutions ne sont pas envisageables à des échelles autres que celles des produits étudiés. Nous avons mis en évidence que la présence de mouvement entre certaines parties du produit était une condition *sine qua non* pour appartenir à la catégorie des MEMS. Cette caractéristique est à l'origine de changements et d'adaptation des méthodes de fabrication de l'industrie VLSI. Les autres caractéristiques viennent de cette contrainte forte, faisant partie intégrante du cahier des charges d'un micro système électromécanique, qu'est la compatibilité des méthodes de fabrication issues de l'industrie du silicium.

L'analyse des procédés de fabrication des micro produits s'est faite en suivant deux raisonnements. Dans un cas, nous avons étudié les procédés classiques du génie mécanique dans le courant de miniaturisation et d'amélioration de la précision. Si on observe un recouvrement en terme de performance dimensionnelle, les limitations principales viennent de l'intégration entre les parties électroniques et mécaniques. Dans l'autre cas, nous sommes partis des technologies de l'industrie du silicium, avec les procédés de dépôts de couches minces, de lithographie et de gravure chimique qui permettent la production des micro processeurs avec les rendements importants que l'on connaît. Ces technologies apportent cette compatibilité nécessaire à une intégration réussie de l'électronique et de la mécanique, mais ouvrent aussi la voie vers les avantages économiques de la production de masse. Il est néanmoins nécessaire de les adapter afin de répondre aux besoins des applications et principalement le mouvement qui est une des caractéristiques fondamentales de ces produits. La technique de la couche sacrificielle est l'exemple parfait de l'adaptation des technologies de fabrication VLSI.

L'utilisation de ces technologies apportent des contraintes d'importance sur le processus de conception du produit MEMS. Dans un premier temps, ce sont des technologies émer-

gentes et donc non stabilisées, cela amène des incertitudes durant tout le développement du produit. Dans un deuxième temps, ce corpus est restreint en terme de variété de géométries possibles et le produit est limité à des structures planaires et à des formes simples. D'autres caractéristiques ont des retombées fortes sur le processus de conception. Par exemple, le couplage multiphysique, d'abord entre électronique et mécanique bien sûr mais aussi avec la physique propre de l'application (nous avons cité l'optique, la radio-fréquence, la biologie...), apporte une complexification importante au niveau modélisation et représentation. Par ailleurs, la complexité du *packaging* fait que sa conception ne peut plus être réalisée indépendamment.

Ces connaissances ont été formalisées et structurées dans le cadre d'un enseignement. Un cours d'initiation aux micro technologies a été mis en place dans le cadre de la formation des étudiants de l'école d'ingénieurs ENSHMG. Cette analyse en vue d'une retransmission des savoirs et des compétences associées nous a conduit à définir une typologie de la connaissance dans ce domaine et à produire un état de cette connaissance.

Au terme de cette recherche nous sommes en mesure d'affirmer qu'un micro produit n'est pas une simple homothétie d'un produit classique. D'une part, le courant de miniaturisation rencontre l'intégration des technologies VLSI et contraint fortement la nature du produit. D'autre part, la caractérisation mise en place amène de nombreuses différences fondamentales aussi bien dans la géométrie du produit que dans les principes de solutions envisageables.

Une caractérisation d'un processus de conception de microsystèmes électromécaniques

Notre approche par le terrain et l'immersion industrielle présente une suite logique dans notre recherche. Une fois notre corpus de connaissances suffisant pour maîtriser un certain nombre d'aspects techniques et scientifiques, il nous a autorisé une légitimité par rapport au terrain ainsi qu'une capacité à appréhender les actions et les pratiques industrielles réelles. Cette approche socio-technique nous a permis de participer et d'observer un processus de conception et ainsi de la caractériser de l'intérieur aussi bien que de l'extérieur.

Notre approche sur le terrain apporte un éclairage sur plusieurs points essentiels dans la description du processus de conception : les acteurs et leurs interactions, les documents représentatifs de différents états du produit, et les connaissances qui émergent durant le processus.

- Les acteurs du processus de conception ont été identifiés, nous proposons une représentation de l'équipe de conception ainsi qu'une conjecture sur l'évolution possible de celle-ci. Cette composition de l'équipe de conception va dans le sens d'une co-conception par trois acteurs principaux : des experts mécanique, électronique et de développement du *packaging*. Ces experts participent à la création du MEMS en relation avec des réseaux de spécialistes et le client. Un manager de projet s'assure du bon fonctionnement du processus de conception.

- Les documents que nous avons observés, manipulés ou créés durant notre étude de terrain nous renseignent sur l'enchaînement des étapes de la conception du produit. Ils sont en effet des marqueurs temporels de la maturité de celui-ci.
- L'étude des connaissances mises en jeu dans le processus de conception a plusieurs rôles. La nature même des connaissances et son aspect non stabilisé, particulièrement au niveau de la fabrication, apportent une compréhension de certaines articulations dans le flux de conception. A travers les mécanismes de création et de transmission nous avons enrichi notre vision de l'équipe de conception.

A partir de ces observations et analyses, nous avons proposé une modélisation du processus de développement de produit. Cette modélisation suit une approche *top-down* avec des étapes de conceptualisation (avec clarification du cahier des charges prévisionnel), d'*embodiment*, de conception détaillée (ou optimisation), de réalisation physique (en deux étapes : production des masques de lithographie puis passage en filière de fabrication) et enfin de test et caractérisation du produit. Une fois ces tests effectués, un choix de retour en optimisation, en re-design est à faire. Cette étape de caractérisation apporte aussi un gain en terme de connaissances technologiques. Ce processus de conception présente des articulations et des irréversibilités dues aux trois aspects qui ont guidé notre analyse. Il est représentatif d'une réalité industrielle telle que nous l'avons observée.

Le fait de modéliser le processus de conception et d'en observer la pratique industrielle nous a permis de diagnostiquer certaines phases qui nous semblaient non optimales, notamment durant la phase *embodiment*. Nous proposons certaines voies pour l'amélioration de cette phase critique du développement du produit. Dans un premier temps, l'étude des documents et de leur utilisation comme objets de médiation et de négociation durant cette phase particulière nous amène à qualifier les représentations existantes de trop fermées. De plus, l'apparition de représentations graphiques dans la phase d'*embodiment* est nécessaire car cette étape est une articulation majeure dans le processus. Néanmoins, aucune des représentations existantes issues de la mécanique ou de l'électronique n'est pertinente. Dans un deuxième temps, nous préconisons l'utilisation d'un outil de capitalisation des connaissances et des détenteurs de ces connaissances. Notre observation du travail des acteurs durant cette phase de création en concomitance de la géométrie, de la séquence de fabrication et du choix des matériaux nous a permis de mettre en évidence des gains de temps possibles avec une meilleure connaissance du réseau d'acteurs en relation avec les différents projets associés aux produits.

Il convient cependant de présenter certaines limites sur ce travail. En effet, il est difficile de caractériser un processus de développement de produit avec des outils concernant des pratiques industrielles stabilisées. Le contexte de recherche et développement dans lequel nous avons évolué lors de notre étude de terrain, mais qui apparaît aussi dans l'étude bibliographique, permet de poser certaines bases de raisonnement mais attire notre attention sur cette hypothèse qui contraint fortement le processus de conception. Par exemple, de nouveaux acteurs peuvent faire leur apparition comme des responsables marketing ou des ingénieurs systèmes. Par ailleurs, l'utilisation des objets de connaissance posent le problème du rapport de l'acteur à la connaissance et à la confiance que chacun met dans

un objet de connaissance. Dans notre approche, nous avons limité cette relation en créant un lien formel entre la connaissance et son détenteur mais nous pouvons nous poser la question de la validité d'une telle modélisation. Enfin, devant les temps importants de développement des micro produits, nous n'avons pu être témoin et participant que sur une petite portion du processus de conception.

Ainsi, pour répondre à notre question de recherche, nous pouvons affirmer que, à l'heure actuelle, le processus de conception d'un MEMS est mixte par rapport à ceux que l'on connaît en mécanique et en électronique. Le processus en lui-même n'est pas fondamentalement différent, c'est la manière de le supporter qui va devoir prendre en compte ces spécificités.

Perspectives et ouvertures

En réponse à ce diagnostic effectué sur certaines étapes du processus de conception, nous avons proposé le cahier des charges d'un outil d'aide à la capitalisation et réutilisation des connaissances, orienté détenteurs de ces connaissances. Cet outil est prévu pour être utilisé à la fois dans un cadre d'aide à la conception dans la phase de génération de la géométrie, phase d'*embodiment*, et dans un cadre d'amélioration du partage naturel des connaissances dans les projets. L'implémentation informatique de cet outil n'a pas été effectuée dans son intégralité. Quelques routines ainsi que la base de données ont cependant été mises en place. Pour une validation du modèle et du fonctionnement, après le développement complet du système, il sera nécessaire de procéder à une mise en usage par les acteurs bien sûr.

Dans le domaine de l'amélioration de cette étape d'*embodiment*, il convient de poursuivre dans la recherche de moyens de représentation afin de faciliter le travail de communication entre le concepteur MEMS et ses interlocuteurs. C'est un travail à l'interface entre de nombreux domaines et la contrainte principale vient sans doute du fait que nous ne savons pas quel est l'état de connaissance d'un concepteur MEMS. En effet, selon s'il est électronicien ou s'il est mécanicien, il aura un rapport différent aux représentations et à la façon de s'en servir. Il s'agit ici d'une question fondamentale pour la conception de MEMS et il va falloir poursuivre plus largement les investigations sur le rapport mécanique / électronique.

Enuite, un des points qu'il nous apparaît important de souligner est l'importance de promouvoir l'approche client dans le domaine des micro technologies. Nous avons précisé que pour nous, il y avait très peu d'innovation sur le produit. Cette innovation est indéniable au niveau des technologies ou des performances mais très peu de nouvelles applications sont apparues. En effet, les recherches, les méthodes de conception et l'enseignement sont basés sur une approche orientée par le processus de fabrication. Trouver de nouvelles applications passera par étudier l'évolution des besoins des clients en parallèle avec l'évolution des possibilités technologiques. Un micro marteau n'est rien qu'un petit marteau. Un nano marteau est un marteau encore plus petit, mais c'est toujours un marteau. Le développement des micro technologies en arrive à un instant charnière. La question fondamentale est de déterminer les conditions de passage d'une activité *technology-pushed* à une activité *client-oriented* (ou tout au moins allant dans ce

sens).

Enfin, le caractère émergent des micro produits fait que le contexte actuel est un contexte de recherche et développement. Les enjeux économiques et les quelques exemples réussi de passages en production et de mise sur le marché (on peut citer les accéléromètres déclencheurs d'airbags de véhicules personnels et les micro miroirs constituant les dispositifs de projection optique) permettent cependant de prédire un passage certain vers une industrialisation, et ce à plus ou moins court terme. On pourra passer d'un cadre de technologies émergentes à celui d'un cadre d'innovation. Ce terrain de recherche est déjà riche à l'heure actuelle pour nos approches pluridisciplinaires, l'intérêt grandira encore si on est témoin de ce passage vers une industrialisation réussie. De nombreux travaux sur l'innovation, la conception et les méthodes d'ingénierie sont basées sur des études de phénomènes *a posteriori*. Nous disposons ici d'un terrain d'étude que l'on peut observer dans une période riche de son évolution. Cette question des conditions de passage d'un développement R & D à une industrialisation d'un micro produit rejoint les questions posées par toute industrialisation d'une innovation.

Pour finir, nous ne pouvons pas nous empêcher de nous questionner quant aux nanotechnologies. Ces produits relèvent-ils encore de l'ingénierie autre que biologique ? Les mécaniciens que nous sommes ont-ils leur place dans les études de développement de ces produits ?

Annexe A

Construction de connaissances scientifiques et d'ingénierie chez STMicroelectronics

Le but de cette étude de terrain industrielle était triple :

- observer et participer à un processus de conception de MEMS,
- faire un état des lieux des connaissances et des méthodes de conception,
- assister et participer à la création de connaissances nouvelles relatives aux produits et aux technologies.

Les connaissances créées et mises en oeuvre dans l'activité de conception sont de deux types : scientifiques et technologiques d'une part, relatives aux méthodes d'ingénierie d'autre part.

Objectif technique du stage : Etudier les possibilités d'implémentation de l'AlN dans une géométrie de *switch*

Notre travail technique, en tant que stagiaire / ingénieur de conception de MEMS, était d'étudier l'implémentation d'un matériau piézoélectrique dans la géométrie du *switch* à actionnement thermique du CEA/Leti [RBB⁺03] (cf figure A.1). En effet, certains travaux étaient en cours sur les matériaux piézoélectriques tels que le PZT, le

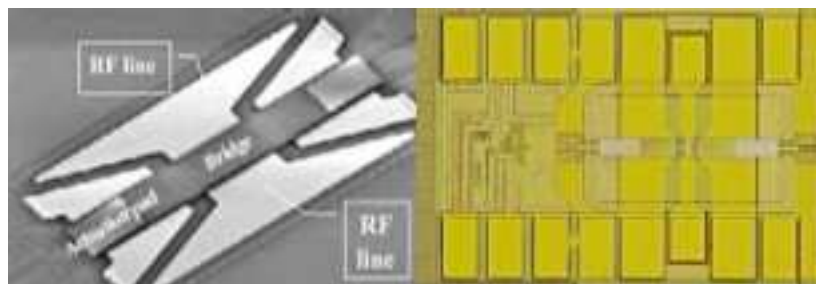


FIG. A.1 – Deux vues du *switch* à actionnement thermique du Leti

ZnO ou l'AlN. Dans le cadre d'une thèse sur les résonateurs quelques designs de *switch* comportant de l'AlN ont été réalisés, ils étaient en étape de test et de caractérisation lors de notre arrivée. Les résultats obtenus par ces expériences sur l'actionnement, bien qu'uniquement qualitatifs, ne correspondaient pas avec les simulations sur le logiciel COVENTORTM effectuées par un autre concepteur sur ce design.

Nous devons étudier différents moyens de modéliser, calculer et simuler l'actionnement piézoélectrique. Puis, nous devons étudier les paramètres de conception qui ont une influence importante sur le design.

Rappel du cahier des charges fourni au début du stage

Caractéristiques fonctionnelles	Contraintes de fabrication
robustesse	matériau du contact
rapidité de fonctionnement	reproductibilité
actionnement basse tension 10V ou moins de 3V	matériau de l'actionnement piézoélectrique
option de remonté du switch (en coupant l'énergie ou en apportant)	compatibilité avec les processus Above IC, budget thermique
comportement fiable en température	
optimisation géométrique	
faible consommation	
force appliquée sur le contact	

Chronologie et méthode

Avec pour objectif, dans un premier temps, de comprendre la physique de la piézoélectricité, nous avons procédé à une étude bibliographique centrée sur ce type de matériau et sa modélisation mathématique. Notre étude bibliographique s'est poursuivie sur les modèles de structures multimorphes afin de pouvoir proposer un modèle analytique de l'actionnement de type bilame du *switch*.

Nous avons ensuite testé les différents moyens à notre disposition pour la simulation des effets piézoélectriques, afin de valider le bon fonctionnement de ceux-ci et de mettre en avant des notions de confiance en l'outil. Les tests réalisés sont de complexité croissante (simple vérification des coefficients piézoélectriques puis de l'effet bilame et enfin de l'effet encastrement.) et aboutissent sur une bonne compréhension du mode de fonctionnement du *switch*. Nous avons confronté ces résultats avec un modèle analytique d'actionnement bilame que nous avons adapté de la bibliographie.

Enfin, nous avons mené une campagne statistique d'essais paramétrés de type plans d'expérience, afin de mettre en évidence les effets relatifs de différents paramètres géométriques sur les performances finales simulées (en terme de contraintes aux encastres et de flèche maximale).

Les connaissances scientifiques et techniques

Les coefficients piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux qui présente un champ de contrainte couplé à la différence de potentiel qui leur est appliquée. L'effet piézoélectrique va dans le sens d'une apparition de contraintes suivant le champs électrique, l'effet piézoélectrique inverse génère une différence de potentiel lors que des contraintes sont appliquées au matériau. Grâce aux relations entre les contraintes et la déformation, on peut qualifier ces effets en terme de déformation produites par un champ électrique.

les coefficients piézoélectrique de l'AlN sont issus de la thèse de Marc-Alexandre Dubois [Dub99]. Il donne des valeurs pour les coefficients e_{ij} , ces coefficients sont de dimensions $C.M^{-2}$ et ne permettent pas de connaitre les déformations en fonction du champ électrique, il faut calculer les coefficients d_{ij} à l'aide des formules classiques de contraintes et déplacement.

$$D_i = e_{ik}.S_k + \varepsilon_{ij}^S.E_j \quad (A.1)$$

$$T_k = c_{kl}^E.S_l - e_{ik}.E_i \quad (A.2)$$

Où D_i est la densité de charge, E_i est le champ électrique (selon trois composantes), S_k est la déformation et T_k représente les contraintes dans le matériau. La matrice e_{ik} est la matrice des effets piézoélectriques, c_{kl}^E la matrice de raideur à champ électrique constant et ε_{ij}^S la matrice de permittivité diélectrique, ici à déformation constante.

$$D_i = d_{ik}.T_k + \varepsilon_{ij}^T.E_j \quad (A.3)$$

$$S_k = s_{kl}^E.T_l - d_{ik}.E_i \quad (A.4)$$

Avec s_{kl}^E la matrice d'élasticité pour un champ d'électricité constant.

D'où :

$$d_{ik} = e_{ij}.s_{jk}^E \quad (A.5)$$

$$d_{ik}.c_{kl}^E = e_{il} \quad (A.6)$$

et, enfin :

- $d_{15} = e_{31}(s_{11} + s_{12}) + e_{33}.s_{13} = -4.07.10^{-12} C.N^{-1}$
- $d_{31} = -2.65.10^{-12} C.N^{-1}$
- $d_{33} = 5.53.10^{-12} C.N^{-1}$

Ces coefficients sont de dimension équivalente à $m.V^{-1}$ donc donnent directement le déplacement (relatif) en fonction du champ électrique E (en $V.m^{-1}$) appliqué aux bornes du matériau. En utilisant ces coefficients, on peut simuler directement l'effet bilame qui

est à la base du fonctionnement du switch. Le corpus des connaissances associées à la piézoélectricité a été augmenté, pas avec les valeurs en elles-même, mais par la connaissance des formulations mathématiques et d'une compréhension du phénomène physique.

Le principe de fonctionnement d'un action bilame piézoélectrique

Nous avons implémenté successivement les coefficients piézoélectrique dans des simulations de complexité croissante :

- une brique AlN

La partie analytique est simpliste puisqu'il s'agit uniquement de multiplier champ électrique et coefficients piézoélectriques mais cela permet de connaître l'utilisation réelle des coefficients.

On travaille dans le cas d'un champ électrique de 10 V et une épaisseur d'AlN de $1.5\mu m$. L'augmentation d'épaisseur est de $5.53 \cdot 10^{-5} \mu m$ (utilisation du coefficient d_{33}) et la striction de $17.67 \cdot 10^{-5} \mu m$ dans les autres directions (utilisation du coefficient d_{31}).

- un bilame encastré à une extrémité

Les équations proviennent d'une analyse de la bibliographie et particulièrement des travaux de Dufour [DS99], Smits [SDC91], deVoe [DP97] et Weinberg [Wei99b]. Ils sont testés dans le cas "poutre" (cas qui est un petit peu limite dans le cas où la poutre fait $10 \mu m$ de côté pour des épaisseurs de l'ordre du micron). Dans ces cas, on a pris soin de prendre les points de "mesure" de la flèche au centre de la plaque, afin de s'affranchir de l'effet de tuilage. Les démonstrations ont été refaites et la formule finale donne une équation du type $w''(x) = A.U$. A est un coefficient dépendant des épaisseurs, des modules d'Young des couches et du coefficient piézoélectrique d_{31} et U est la tension aux bornes de la couche d'AlN. Donc, l'équation de la déformée est purement polynomiale (ce qui n'est sûrement pas le cas réel mais qui semble bien s'en approcher.)

- un bilame encastré à chaque extrémité

Le mode théorique de fonctionnement de ce modèle est un double flambement. Le premier intervient en raison des tensions internes de compression dans la poutre due à la fabrication (une simulation Ansys a donné environ 3000 Mpa pour un bombé de $1.5 \mu m$). Le deuxième flambement intervient lors de l'actionnement. On peut y voir un "combat" entre le premier phénomène et le deuxième qui peuvent être modélisés comme des moments de sens opposé, sachant que la poutre ne peut rester droite.

Le but était d'arriver à une simulation globale du *switch*, pour obtenir la valeur de la flèche en fonction de la tension d'entrée. Même si les résultats ne sont pas convaincant par rapport à ceux obtenus en caractérisation, cette série de simulation nous a permis de comprendre la principe d'actionnement bilame avec le matériau piézoélectrique.

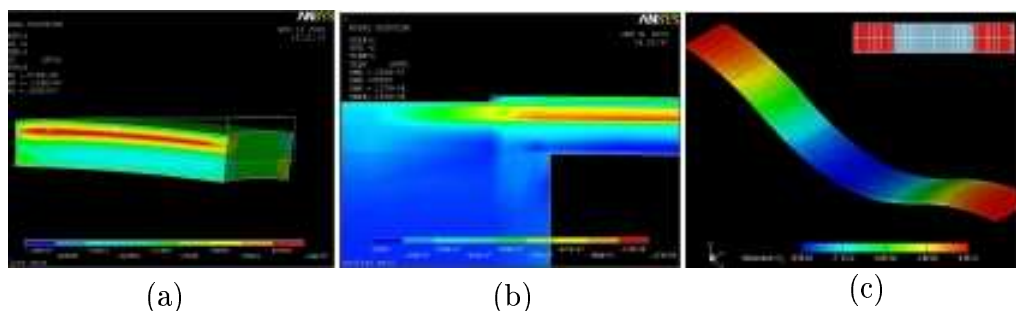


FIG. A.2 – Modélisation ANSYS (a et b) et COVENTOR (c) de bilames piézoélectriques

Les connaissances d'ingénierie

Validation des différents outils informatiques (comparaison analytique / Coventor / Ansys) :

Le but de cette partie du stage était de qualifier les différentes façons de traiter les simulations des composants piézoélectriques. Afin de pouvoir faire confiance aux résultats donnés par les logiciels, et pouvoir les utiliser dans des vérifications de conception par la suite, il était important de travailler à la fois sur la théorie et sur deux types d'outils : spécifique aux MEMS et générique.

La démarche choisie était de commencer par vérifier si tout marchait dans le cas très simple d'une brique d'AlN en suspension dans l'air et à laquelle on applique une tension. Cela revient à effectuer une multiplication entre le champ électrique et les coefficients piézoélectriques. Dans les logiciels COVENTORTM et ANSYSTM, on a encasté un des cotés de cette géométrie afin de pouvoir obtenir des informations à la fois en déplacement et en contraintes. Une fois que l'on sait que les coefficients correspondent à ceux utilisés dans nos modèles analytiques, on passe à une géométrie plus complexe qui est celle du bilame SiN/AlN car l'effet désiré de courbure est obtenu par dilatation comparée (de la même façon que dans le cas d'un actionnement thermique, ou d'un thermostat dans un chauffage). La fin est une comparaison avec un modèle encasté-encasté.

Il apparaît que d'un point de vue éléments piézoélectriques il n'est pas nécessaire de faire apparaître les électrodes pendant la simulation FEM mais que l'on peut appliquer la différence de potentiel sur des surfaces spécifiques mais directement sur le matériau piézoélectrique (ici de l'AlN mais cela importe peu).

Dans le cas de la brique d'AlN soumise à un champs électrique, on obtient une bonne corrélation entre les trois méthodes avec un pourcentage d'erreur de l'ordre de moins de 1 %. En revanche dans le cas des bilames, les pourcentage d'erreur sont beaucoup plus élevés et on peut d'ors et déjà se poser des questions sur la confiance que l'on peut accorder aux résultats autre que des tendances... Par ailleurs, pour la simulation non linéaire de flambement, les éléments Ansys prenant en compte les phénomènes piézoélectrique ne sont pas utilisables dans le cas du flambement. De la même façon le paramètre clé en étude de flambement est une force (en forme de rampe) mais on n'a pas

de possibilité de jouer sur les moments ou les déplacements relatifs afin de s'affranchir des éléments spécialisés piézoélectriques.

Ces études nous ont apporté des connaissances sur la façon d'utiliser les outils, leur niveau de maturité et surtout le crédit que peuvent apporter les acteurs aux résultats obtenus. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 4.1, les concepteurs préfèrent généralement avoir des outils rapides qui leur donnent des tendances de variation plutôt qu'une simulation précise mais peu réactive. Nous avons vu ici que les résultats ne sont pas forcément plus précis avec les analyses par éléments finis de tout façon.

Plans d'expérience pour extraction de paramètres de conception

Le but de cette partie était d'utiliser le fichier informatique du modèle du *switch* afin de lancer des campagnes d'essais selon la théorie des plans d'expérience (et notamment de criblage). Cette méthode permet d'extraire les paramètres influents à la fois sur les contraintes aux encastresments et sur la flèche au centre (il faudrait sans doute aussi voir au niveau des forces de contact, mais les éléments utilisés alors ne prenaient pas en compte le contact.)

Voici la liste de paramètres géométriques et de matériaux que nous avons testés :

- toutes les épaisseurs (SiN, AlN, les deux électrodes de Pt et de Mo) ;
- les longueurs de poutre globale, des électrodes ;
- le coefficient piézoélectrique du matériau (du ZnO au PZT) ;
- la position des électrodes par rapport aux encastresments.

Au niveau des résultats, on se rend compte que l'épaisseur des électrodes joue très peu (notamment le Molybdène dont l'effet est totalement négligeable). La longueur de poutre et les coefficients piézoélectriques ont une grosse influence dans le sens que l'on attendait. Un phénomène plus intéressant est que l'épaisseur d'AlN joue dans le sens de variations telles que plus d'AlN amène moins de déformations, ce qui n'est pas évident au premier abord. Le placement des électrodes par rapport à l'encastrement ne fait pas beaucoup de différence sur la flèche mais est évidemment fondamentale au niveau des contraintes à cet endroit.

Pour la suite nous avons décidé de nous diriger vers un modèle à deux dimensions et de ne pas modéliser l'électrode inférieure de Mo. Cet apport est de niveau méthodologique, il ajoute des informations dans la procédure de simulation par éléments finis de ce projet. Nous avons utilisé ces résultats par la suite, et dans les deux logiciels.

Un plan d'expérience plus fin en surface de réponse a été ensuite conduit, afin de voir comment évoluait la flèche selon les épaisseurs d'AlN et de SiN. L'objectif était de constater la nature de la réponse, ainsi que s'il existe un extremum indicateur d'une optimisation de la géométrie. On peut voir que la réponse en épaisseur d'AlN n'est pas linéaire ni polynomiale, mais qu'elle comporte une partie où toute modification d'épaisseur entraîne une forte modification de la flèche, la réponse va vers une asymptote passée une certaine valeur.

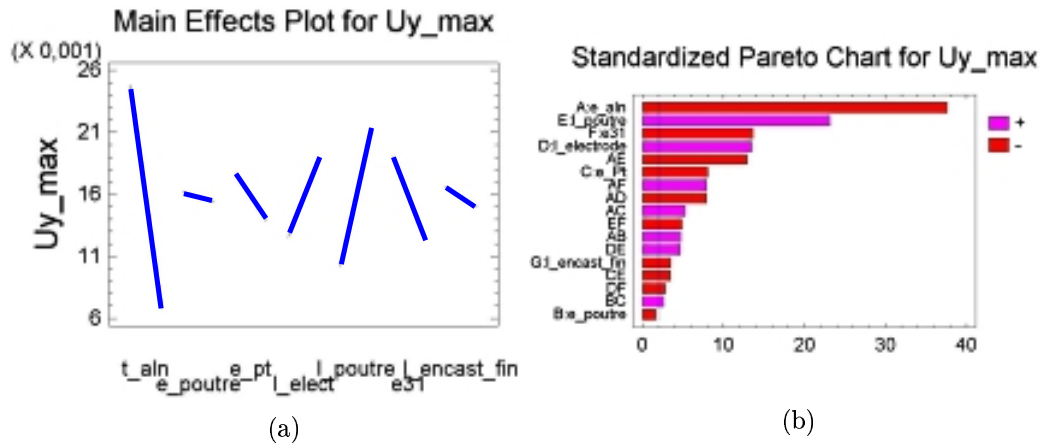


FIG. A.3 – plan d'expérience de criblage
 (a) effets principaux de différents paramètres, (b) effets standardisés de ces paramètres

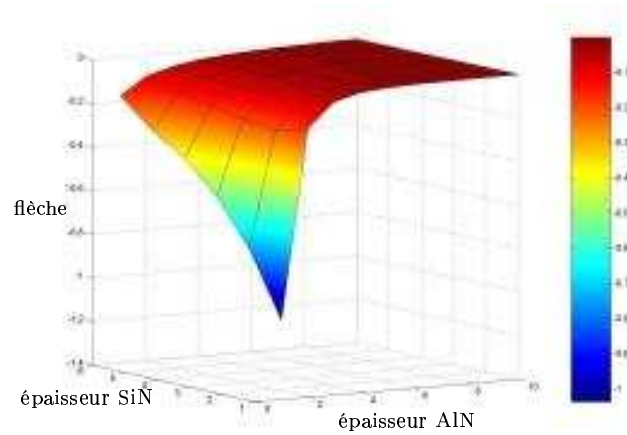


FIG. A.4 – plan d'expérience, surface de réponse
 Déplacement du centre de la poutre en fonction des épaisseurs de nitrure de silicium SiN
 et de nitrure d'aluminium AlN

Résultats et conclusions

Les résultats de notre travail sont plus de l'ordre d'une meilleure connaissance des phénomènes physiques que d'une réalité au niveau du produit. Cependant, l'emploi d'un bilame piézoélectrique semble être une alternative satisfaisante, si tant est que l'on puisse bénéficier d'un matériau un peu moins contraignant à mettre en oeuvre au niveau fabrication, pour des coefficients plus élevés. Le phénomène est encore mal connu (double flambement), et très dépendant de la technologie, notamment au niveau des tensions dans les matériaux du sandwich de la poutre.

Il semble difficile d'utiliser les éléments ANSYSTM pour faire des analyses en mode non linéaire, et le flambement est fortement non linéaire. De plus, nous n'avons pas réussi à valider les résultats obtenus avec CONVENTORTM par rapport à l'expérimentation. D'une part, il semble que des phénomènes encore inconnus modifient le comportement du *switch* et d'autre part, des phénomènes d'apparence aléatoire nous incitent à penser qu'une analyse statistique apporterait de bonnes précisions à l'étude.

Les apports de ce stage quant à notre question de recherche sont essentiels. L'observation et la participation active au processus de conception sont les bases de la méthode socio-technique d'ethnographie. De plus, nous avons pu contruire de nouvelles connaissances dans les domaines technique et méthodologique ; en observer la genèse et la transmission. Tout cela a enrichi notre modélisation du processus global de conception.

Le travail effectué durant ce stage a fait l'objet d'une publication dans le cadre de la *Conference IEEE on Thin Films* à Singapour en mai 2003. Cette publication est présentée ci-après.

Annexe B

Construction de connaissances technologiques en micro fabrication

Construction de connaissances technologiques sur le micro usinage par enlèvement de copeaux

Au cours du stage au laboratoire LMA de Berkeley, nous avons été amenés à construire des expériences avec de forets et des fraises de dimension micrométrique. Le but de ces expériences était d'étudier les phénomènes de bavure dans le cas d'un matériau cristallin relativement peu ductile et donc la taille des grains était de l'ordre de celles des outils. Nous cherchions à observer les influences au niveau des changements d'orientation cristallographique (i.e. aux joints de grains) sur la bavure. Une étude bibliographique a révélé que personne ne s'est intéressé aux phénomènes de coupe à la frontière entre les grains et nous avons trouvé peu d'informations précises concernant des expériences similaires ou des conditions de coupe. [RKP01]

L'échantillon que nous avons utilisé est un disque de cuivre d'environ 2,5 mm d'épaisseur, dont une des faces a été usinée avec un outil à pointe diamant puis passée dans un bain d'hydroxyde d'ammoniaque et H_2O_2 pour faire apparaître les grains par gravure chimique (*etching*). Cette face sera la face de sortie du foret ou de la fraise.

Expériences d'usinage :

Trois séries d'expériences ont réalisées sur une machine-outil à commande numérique, équipée d'une tête spéciale haute précision.

– Première série d'expériences :

- Perçage de 8 trous débouchants de diamètre 250 μm pour une profondeur de 375 μm .
- Conditions de coupe 8000 et 7000 tours/min et 5 et 7 mm/min.

Les bavures, observables à l'oeil nu, montrent deux ou trois bavures en *cap* (pour

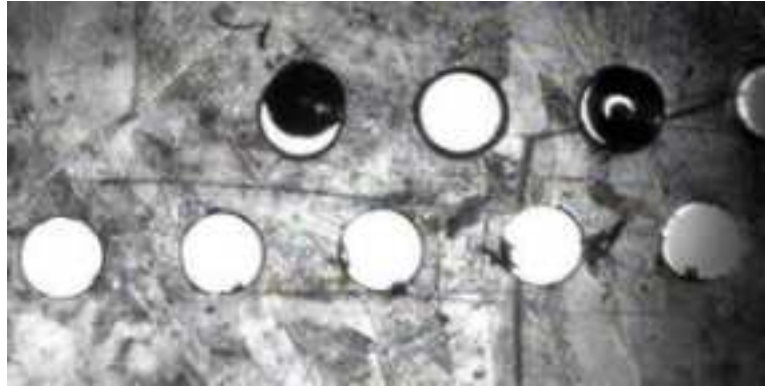


FIG. B.1 – rangées de perçage de diamètre $250\ \mu m$

"chapeau"). Le microscope optique montre des bavures normales sur tous les trous et effectivement une répartition des trous, dans, et à la frontière des grains, comme le montre la figure B.1. Les photos prises au MEB sont moins concluantes : on observe effectivement des bavures dans les joints de grains et on peut suivre la frontière et les différentes orientations jusque dans la bavure elle-même (bavure de l'ordre de $10\ \mu m$, soit 4%). Mais, il ne semble pas y avoir de différence notable dans la forme ou la taille de celle-ci selon si le trou est dans un grain ou bien à la frontière. Une des explications semble être que le cuivre est trop ductile pour que la différence d'orientation dans les cristaux agisse sur le mécanisme de déformation plastique, responsable de formation de la bavure.

– Deuxième série d'expériences :

Nous avons conduit une nouvelle série de perçages, avec d'autres conditions de coupe et sur une autre épaisseur. Certains des trous ne débouchent pas. Chaque essai avec le foret de $130\ \mu m$ s'est soldé par un échec par bris du foret. Soit le cuivre est trop ductile pour le foret et la matière "colle" et le casse, soit les conditions de coupe sont inadaptées... Les trous de $250\ \mu m$ montrent toujours les mêmes phénomènes de joints de grains qui se fondent dans la bavure. De façon inattendue, les trous non-débouchants, pour cause de non-planéité de surface, présentent l'intérêt de montrer les différentes étapes de création de la bavure lors de processus de déformation plastique à la surface. La formation du chapeau, puis son arrachement, se voient nettement, avec transformation de la matière par échauffement au niveau de la partie centrale du foret, lorsqu'il n'y a pas coupe mais refoulement. Cela nous a permis de comparer ces résultats avec des simulations par éléments finis et avec la théorie au niveau macroscopique.

Des photos MEB de la surface d'entrée montrent que le bris du petit foret de $130\ \mu m$ est dû au défaut de concentricité de la broche. En effet, le foret frappe la surface dans une figure en "corrolle" avant de se ficher dans la matière à cause du mouvement d'avance de la machine. On ne disposait pas de broche ayant un meilleur alignement donc les expériences suivantes consistèrent en un avant-trou de taille supérieure au défaut d'alignement pour guider le foret.

– Troisième série d'expérience :

Nous avons, cette fois, conduit une série d'expérience en fraisage selon les conditions suivantes :

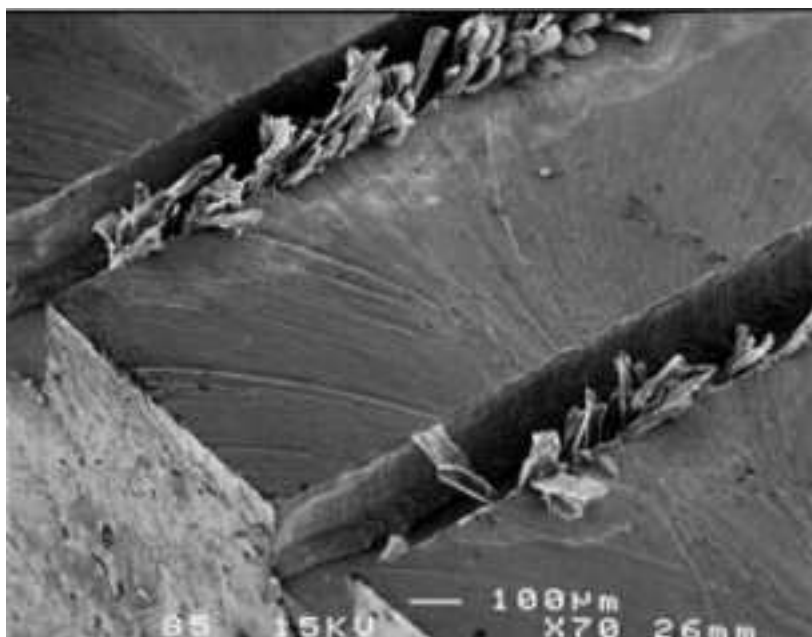


FIG. B.2 – deux rainures usinées en forme avec une micro fraise
Le diamètre de la fraise est de 0.01 pouces, soit environ $254\ \mu\text{m}$

- Micro fraisage dans le même échantillon de cuivre à gros grains. On usine une marche pour obtenir des bords de sortie de fraise le long d'une arête avec la surface sur laquelle on voit les grains.
- Les conditions de coupe avec une fraise de 0,01 pouce sont : 8000 tours/min (le maximum de la machine) et 30 mm/min en avance. La surface est préparée avec une fraise de $1/8^{\text{ème}}$ de pouce dans le but de générer une arête "propre", selon les règles LMA/CODEF pour éviter la bavure, et ensuite effectuer le micro usinage.
- Un autre échantillon est usiné. Plusieurs tranchées sont réalisées, la surface de sortie de la fraise est la surface où l'on peut voir les grains.

La marche usinée est d'environ $20\ \mu\text{m}$ et la bavure générée dépasse les $100\ \mu\text{m}$. En revanche, les usinages de tranchées débouchant sur la surface où les grains sont visibles donnent de bonnes informations sur l'influence de la profondeur de passe dans un matériaux ductile (cf figure B.2). Lorsque celle-ci est trop faible, on génère une bavure importante dans le coté entrée-matière ; dans le cas d'une profondeur trop importante, il y a agglomération de copeaux sur l'autre coté de la rainure. Il est aussi intéressant de voir que dans le cas d'une profondeur raisonnable on obtient une bavure en concordance avec les prévisions CODEF. Les résultats macroscopiques concordent avec ceux obtenus en micro.

Bilan des expériences d'usinage :

Ces expériences nous ont permis de nous familiariser avec certaines technologies de fabrication à l'échelle microscopique. Ces procédés appartiennent à la catégorie des procédés miniaturisés à partir de la fabrication "macro". Il n'y a pas d'intégration avec les technologies VLSI. Nous avons pu nous construire un corpus de connaissances technologiques

sur les procédés mais aussi sur leurs limites.

Etude d'un procédé de fabrication particulier : le CMP

La technologie CMP a été présentée dans le chapitre 2.2.3, au laboratoire LMA différents axes de recherche sont en relation avec ce procédé : une compréhension et modélisation mathématique et chimique du processus en lui-même tout d'abord, un travail sur l'amélioration des performances ensuite.

On cherche un meilleur contrôle du processus. Parmi les nombreux éléments qui l'influencent le polissage, le *pad* est celui qui produit les effets les plus importants. En effet, le *pad* subit une détérioration durant le processus qui modifie sa géométrie et ses caractéristiques mécaniques. La topologie du *pad* est très hétérogène, les pores qui constituent sa surface servent de réservoirs pour le *slurry*. Ces pores sont séparés par des structures en polyuréthane, elles-même contenant des micro aspérités. Ces aspérités sont continuellement détériorées durant le polissage et la surface de contact, principalement responsable du taux d'enlèvement de matière, est modifiée. Cela entraîne une diminution de la rapidité du processus global et de l'uniformité de la surface obtenue.

De manière générale le *pad* est fabriqué en mousse de polyuréthane et sa surface acquiert la topologie définitive après une étape de conditionnement. De manière à contrôler au mieux le procédé, le projet "SMART Pad" propose de changer le mode de fabrication afin de réaliser le *pad* avec une bonne répétabilité.

La topologie d'un *pad* est telle que la densité de pores est d'environ 30 à 50 %, ces pores de diamètres variant entre 40 et 60 μm sont séparés par des structures d'épaisseur variant entre 10 et 30 μm . La solution choisie pour la fabrication de ce *pad* est le micro moulage sur gomme de silicone. Un moule original en silicium est réalisé par DRIE ¹ d'un wafer qui servira de premier moule pour ensuite créer le moule qui servira pour le *pad*. Des résultats sur ce procédé sont présentés par Lee [Lee03]

Nous avons participé à l'élaboration de ce projet par une étude bibliographique basée sur les différents types de capteurs à insérer dans le *pad*. Cet apport de connaissances tant au niveau de la culture, que scientifiques dans le domaine de la micro détection, nous a permis nous constituer un bagage.

Conclusion

L'apport de ce stage est une première formalisation des connaissances techniques sur les méthodes de fabrication. Nous avons pu appréhender les différences fondamentales entre les technologies issues de la miniaturisation de procédés de génie mécanique "macro" et les technologies adaptées de l'industrie du silicium. Nous avons aussi commencé à structurer les caractéristiques des micro produits à travers les moyens de production et l'étude sur les moyens de détection. Sans pour autant parler de véritable conception, l'analyse sur les capteurs de pression du projet "SMART Pad" peut être rapprochée

¹DRIE = Deep Reactive Ion Etching

d'une étape de clarification du cahier des charges et de conceptualisation.

Les travaux effectués sur le micro perçage et le micro fraisage ont fait l'objet d'une publication dans le cadre de la *7th International Conference on Deburring and Surface Finishing*. Cette publication est présentée ci-après.

Bibliographie

- [AKHB03] L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, and G. Bissaco. Micro engineering. *Annals of the CIRP* 52, 2, 2003.
- [AL95] L. Alting and J.B. Legarth. Life cycle engineering and design. *Annals of the CIRP* 44, 2, 1995.
- [Ant95] E.K. Antonsson. Structured design methods for mems. Workshop final report, National Science Foundation, Pasadena, CA, USA, november 1995.
- [BA92] G. Boothroyd and L. Alting. Design for assembly and dissassembly. *Annals of the CIRP* 41, 1992.
- [Ba02] J.E Bullema and al. Submicron laser micro machining of metals. In 3rd Euspen International Conference, pages 257–260, Eindhoven, 2002.
- [Bai04] Y. Baizet. *La gestion des connaissances en conception - Application à la simulation numérique chez Renault - DIEC*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Laboratoire 3S Grenoble, 2004.
- [BBW98] H. Baltes, O. Brand, and M. Waelti. Packaging of cmos mems. *Microelectronics reliability*, (40) :1255–1262, 1998.
- [Bea78] K.E. Bean. Anisotropic etching of silicon. *IEEE Trans. Electronic Devices*, 25 :1185–1192, 1978.
- [BG98] D. Brissaud and O. Garro. Conception distribuée, émergence. *Conception de produit mécanique, Méthodes, Modèles, Outils*, Hermès 1998.
- [Bla98] E. Blanco. *L'émergence du produit dans la conception distribuée*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire 3S Grenoble, 1998.
- [Blo99] L. Blondaz. *Prise en compte de la fabricabilité, en conception intégrée de produits mécaniques*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Laboratoire 3S, Grenoble, 1999.
- [Bou93] J.F. Boujut. *Un exemple d'intégration des fonctions dans les systèmes de CAO : la conception de pièces forgées tridimensionnelles*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire 3S Grenoble, 1993.
- [Bou02] J. Bouchard. Rfmems set for blockbuster market. Technical report, WFC, 2002.
- [Buc91] L.L. Bucciarelli. *Delta Design*. MIT Press, 1991.
- [BWK01] G. Boothroyd, P. De Wurtz, and W. Knight. *Product Design for Manufacture and Assembly*. - 2nd edition, Marcel Dekker inc., 2001.
- [Cas02] F. Casset. Dimensionnement et étude de capacités variables et d'interrupteurs mems. Mémoire cnam, Mécanique des structures et des systèmes, 2002.

- [CB96] A. Chakrabarti and T.P. Blight. An approach to functional synthesis of mechanical design concept : Theory, application, and emerging reaserch issues. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 10(5) :313–332, 1996.
- [CBW⁺02] J.V. Clark, D. Bindel, W.Kao, E. Zhu, A. Kuo, N. Zhou, J. Nie, J. Demmel, Z. Bai, S. Govindjee, K.S.J. Pister, M. gu, and A. Agogino. Addressing the needs of complex mems design. In MEMS2002, Las Vegas, NE, USA, january 2002.
- [CCD96] N. Cross, H. Christians, and K. Dorst. *Analysing design activity*. ed John Wiley and sons, 1996.
- [Cha01] B. Charlot. *Modélisation de fautes et conception en vue du test structurel des microsystèmes*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire TIMA, Grenoble, 2001.
- [Che90] A. Chevalier. *Guide du Dessinateur Industriel*. Hachette technique, 1990.
- [Cla01] M. Clautrier. Difficultés de nouvelles approches de conception dans le spatial. In Séminaire GSIP Méthodes et outils pour la conduite de projet, Grenoble, 2001.
- [Cro01] N. Cross. Design/science/research : Developing a discipline. In 5th Asian Design Conference, Seoul, 2001.
- [Dar94] F. Darses. *Gestion des contraintes dans la résolution des problèmes de conception*. Thèse de doctorat, Université Paris VIII, Paris, 1994.
- [dBM01] M.P. de Boer and T.M. Mayer. Tribology of mems. Bulletin, MRS, 2001.
- [DCP⁺01] F. Darses, B. Cahour, O. Poveda, F. André-Thorin, J.B. Delabie, and V. Pecheux. Quelles conditions pour la participation des opérateurs à la conception de leurs dispositifs de fabrication. In actes de la conférence SELF2001, Montréal, Canada, octobre 2001.
- [DM01] M.A. Dubois and P. Muralt. Stress and piezoelectric properties of aln thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering. *Journal of Applied Physics*, 89 :6389–6395, 2001.
- [DP97] D. L. DeVoe and A.P. Pisano. Modeling and optimal design of piezoelectric cantilever microactuators. *Journal of Microelectromechanincal Systems*, 6(3), september 1997.
- [DS99] J. Dufour and E. Sarraute. Analytical modeling of beam behavior under different actuations, profile and stress expressions. *Journal of Modeling and Simualtion of Microsystems*, 1(1), 1999.
- [DTB00] Y-M. Deng, S.B. Tor, and G.A. Britton. A dual-stage functional modelling framework with multi-level design knowledge for conceptual mechanical design. *Journal of Engineering Design*, 11(4) :347–375, 2000.
- [Dub99] M.A. Dubois. *Aluminium nitride and lead zirconate-titanate thin films for ultrasonic applications : integration, properties adn devices*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1999.
- [EE00] R. Eckstein and U. Engel. Behaviour of the grain structure in the micro sheet metal forming. In 8th international conference on metal forming, pages 453–459, Krakow, 2000.

- [EM99] K. Egashira and K. Mizutani. Micro-ultrasonic machining by the application of workpiece vibration. *Annals of the CIRP* 48, 1, 1999.
- [Eri00] R. Erich. Flip chip csp technology overview. Technical report, workshop imaps, Ankmoor Technology, Inc., Boston, MA, USA, 2000.
- [Erm98] J.L. Ermine. Capter et créer le capital savoir. *Annales de l'école des mines*, 1998.
- [Fed00] G.K. Fedder. Top-down design for mems. In Technical proceedings of the 2000 international conference on Modeling and Simulation of Microsystems, 2000.
- [Fey60] R. Feynmann. There's plenty of room at the bottom. *Caltech's Engineering and Science*, february 1960.
- [Fey93] R. Feynmann. Infinitesimal machinery. *Journal of Micro Electro Mechanical Systems*, 2(1) :4–14, march 1993.
- [FKB⁺97] J.M. Funk, J.G. Korvink, J. Bühler, M. Bächtold, and H. Baltes. Solidis : A tool for microactuator simulation in 3-d. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 6(1) :70–82, march 1997.
- [Ga01] M. Geiger and al. Micro forming. *Annals of the CIRP* 50, 2, 2001.
- [GKS⁺98] Y.B. Gianchandani, H. Kim, M. Shinn, B. Ha, B. Lee, K. Najafi, and C. Song. A mems-first fabrication process for integration cmos circuits with polysilicon microstructures. In IEEE MEMS 98 Conference Proceedings, january 1998.
- [GPHB99] D. Gibson, C. Purdy, A. Hare, and F. Beyette. Design automation of mems systems using behavioural modelling. In Proceedings of IEEE Great Lakes Symposium on VLSI, pages 266–269, 1999.
- [Gre03] S. Greenstein. Moore meets malthus in multiples. *IEEE Computers*, july-august 2003.
- [Hat94] A. Hatchuel. Apprentissage collectifs et activité de conception. *Revue française de gestion*, pages 109–119, 1994.
- [HM96] S. Harrison and S. Minneman. A bike in hand : a study 3d objects in design. *Analysing design activity*, pages 415–436, Wiley and sons 1996.
- [HS80] R.W. Hon and C.H. Sequin. *A guide to LSI implementation*. Xerox Palo Alto Research Center technical memo SSL, 1980.
- [HW03] A. Hatchuel and B. Weil. A new approach of innovation design : an introduction to ck theory. In ICED, Stockholm, 2003.
- [JB98] A. Jeantet and J.F. Boujut. Approche socio-technique. *Conception de produit mécanique, Méthodes, Modèles, Outils*, Hermès 1998.
- [Jea98] A. Jeantet. Les objets intermédiaires dans la conception : éléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du travail*, 3 :291–316, 1998.
- [JPS93] H.H. Jo, H.R. Parsaei, and W.G. Sullivan. *Concurrent engineering : contemporary issues and modern design tools*. Chapman et Hall, 1993.
- [JT88] A. Jeantet and H. Tiger. *Des manivelles au clavier*. Edition Syros Alternatives, 1988.
- [Jun03] Zein Juneidi. *Outils CAO pour Microsystèmes*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire TIMA Grenoble, 2003.

- [KF94] A. Kusiak and C. Feng. Design of products for an agile manufacturing environment. *Computer in Engineering, ASME*, 1, 1994.
- [Lau00] P. Laureillard. *Conception intégrée dans l'usage : mise en oeuvre d'un dispositif d'intégration produit-process dans une filière de conception de pièces forgées*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire 3S, Grenoble, 2000.
- [LCB⁺03] M. Laporte, C. Constancias, M. Bruel, E. Ollier, M. Salhi, J. Margail, T. Enot, C Divoux, P. Berruyer, and A. Bontemps. Etude de la structure élémentaire à commutation fluide et actionnement électromécanique d'une matrice de brassage optique. In Journées Nationales d'Optique Guidée, Valence, novembre 2003.
- [LD04] W.F. Lu and Y.M. Deng. Performance-driven microfabrication-oriented design methodology for mems conceptual design. In Proceedings of IDMME, Bath, UK, april 2004.
- [Lea95] P.G. Leaney. Design integration - setting the scene. In IEE Colloquium on Design Integration, pages A1–A6, 1995.
- [Lee03] S. Lee. Pad contact area characterization in chemical mechanical planarization. Compendium of lma, University of California, Berkeley, CA, USA, 2003.
- [Leg01] J. Legardeur. *Méthodes et outils pour l'innovation produit/process : le cas de l'intégration des matériaux composites SMC*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire 3S Grenoble, 2001.
- [Lon03] B. Longueville. *Capitalisation des processus de décision dans les projets d'innovation : Application à l'automobile*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, Châteney-Malabry, 2003.
- [LOZB03] M. Lopez-Ontiveros, P. Zwolinski, and D. Brissaud. Profile of products for the creation of remanufacturable products during the conceptual design phase. In CIRP Life Cycle Engineering Seminar, Copenhagen, 2003.
- [Mas00] T. Masuzawa. State of the art in micro machining. *Annals of the CIRP* 49, 2, 2000.
- [McC85a] E.J. McCluskey. Built-in-self-test structures. *IEEE Design and Test*, pages 30–38, april 1985.
- [McC85b] E.J. McCluskey. Built-in-self-test techniques. *IEEE Design and Test*, pages 21–28, april 1985.
- [Mer98] S. Mer. *Les mondes et les outils de la conception - Pour une approche socio-technique de la conception du produit*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire 3S Grenoble, 1998.
- [MF97] T. Mukherjee and G.K. Fedder. Structured design of mems. In Proceedings of the 34th Design Automation Conference (DAC'97), pages 680–685, Anaheim, CA, USA, june 1997.
- [MGK⁺03] M.S. McCorquodale, F.H. Gebara, K.L. Kraver, E.D. Marsman, R.M. Senger, and R.B. Brown. A top-down microsystems design methodology and associated challenge. In Design Automation and Test Europe, Munich, Allemagne, 2003. Designer's Forum.
- [MHM⁺96] L. Muller, M.H. Hecht, L.M. Miller, H.K. Rockstad, and J.C. Kyle. Packaging and qualification of mems-based space systems. In MEMS, 1996.

- [Mid93] C. Midler. *L'auto qui n'existait pas*. Interédition, 1993.
- [Mid97] C. Midler. Evolution des modèles d'organisation et révolutions économiques de la conception. *Annales des mines*, 1997.
- [Mig99] A. Mignotte. *Compilation sur silicium ou conception conjointe matérielle-logicielle*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Ecole Normale Supérieure de Lyon, Université Claude Bernard Lyon, 1999.
- [MJT98] S. Mer, A. Jeantet, and S. Tichkiewitch. L'analyse de terrain comme source de questionnement des outils d'aide à la conception. In *Primeca*, Lyon, 1998.
- [MLG⁺03] S. Min, D-E Lee, A. De Grave, C.M. De Oliveira Valente, J. Lin, and D.A. Dornfeld. Surface and edge quality variation in precision machining of single crystal and polycrystalline materials. In *7th international conference in deburring and surface finishing*, Berkeley, 2003.
- [MMCM00] D.R. Myers, P.J. McWhorter, C. Converse, and L.A. Makal. Implication of intelligent, integrated microsystems for product design and development. In *IEEE Press, editor, International engineering management conference, "Leading Technology Change : Management Issues and Challenges"*, pages 325–330. IEEE Engineering Management Society, 2000.
- [MT97] R.A. Miller and Y-C. Tai. Electromagnetic mems scanning mirrors. *Optical Engineering*, 36(5), may 1997.
- [MW92] J.C. Moidon and B. Weil. La conception, un exercice de relation sociales. *Gérer et comprendre*, 1992.
- [Möh04] S. Möhringer. A standardising approach to describe and to compare design models for mechatronics. In *International Design Conference*, Dubrovnik, may 2004. DESIGN 2004.
- [Nor93] D.A. Norman. Les artefacts cognitifs. *Raisons pratiques*, 1(4) :15–34, 1993.
- [Pa00] V. Piotter and al. Micro injection moulding of components for microsystems. In *1st Euspen topical conference on fabrication and metrology in nanotechnology*, pages 182–189, Copenhagen, 2000.
- [PB96] G. Pahl and W. Beitz. *Engineering Design : A Systematic Approach*. Springer Verlag, 1996.
- [PBP01] G. Prudhomme, J.F. Boujut, and F. Pourroy. Activités de conception et instrumentation de la dynamique des connaissances locales. *Ingénierie des connaissances, plateforme AFIA*, pages 41–60, Presses Universitaires de Grenoble 2001.
- [Pet82] K.E. Peterson. Silicon as a mechanical material. *IEEE*, 70 :420–457, 1982.
- [Pov01] O. Poveda. *Pilotage technique des projets d'ingénierie simultanée, modélisation des processus, analyse et instrumentation*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire 3S Grenoble, 2001.
- [Pra6a] B. Prasad. *Concurrent Engineering Fundamentals, Volume I : Integrated Product and Process Organization*. New Jersey : PTR Prentice Hall, 1996a.
- [Pra6b] B. Prasad. *Concurrent Engineering Fundamentals, Volume II : Integrated Product Development*. New Jersey : Prentice Hall, 1996b.

- [Pru99] G. Prudhomme. *Le processus de conception de système mécanique et son enseignement - La transposition didactique comme outil d'une analyse épistémologique*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Laboratoire 3S Grenoble, 1999.
- [PS93] H.R. Parsaei and W.G. Sullivan. *Concurrent Engineering : contemporary issues and modern design tools*. Chapman and Hall, 1993.
- [PsLN⁺00] T.N. Porsin-sirirak, S.W. Lee, H. Nassef, J. Grasmeyer, Y.C. Tai, C.M. Cho, and M. Keennon. Mems wing technology for a battery-powered ornithopter. In 13th IEEE Annual Conference on MEMS, pages 709–804, Miyazaki, Japon, january 2000.
- [RBB⁺03] P. Robert, D. Saias C. Billard, S. Boret, N. Sillon, C. Maeder-Pachurka, P.L. Charvet, G. Bouche, P. Ancey, and P. Berruyer. Integrated rf-mems switch based on a combination of thermal and electrostatic actuation. *Transducers*, 2003.
- [Rej01] N. Rejneri. *Montage et démontage de composants mécaniques*. Thèse de doctorat, INPG, Laboratoire 3S Grenoble, 2001.
- [Rib01] Y. Ribaud. La micro turbine : l'exemple du mit. *Mécanique et Industrie*, 2 :411–420, 2001.
- [RKP01] M. Rahman, A.S. Kumar, and J.R.S. Prakash. Micro milling of pure copper. *Journal of Materials Processing Technology*, 116 :39–43, 2001.
- [RLO98] A. Richardson, A. Lechtner, and T. Olbrich. Design for testability strategies for mixed signal and analogue designs - from layout to system. In IEEE international conference on electronics, circuits and systems, pages 425–433, Lisbon, september 1998.
- [RM01] Rebeiz and Muldavin. Rf mems switches and switch circuits. In IEEE, 2001.
- [Rub94] S. Rubin. *Computer Aids for VLSI Design - second edition*. S.Rubin, 1994.
- [Sal03] P.R. Salomon. European mems foundries. In Proceedings of SPIE, pages 327–336, Strasbourg, 2003. CNES.
- [Sch83] D.A. Schön. *The Reflexive Practitioner : How professionnels think in action*. Basic Books, 1983.
- [SDC91] J.G Smits, S.I. Dalke, and T.K. Cooney. The constituent equations of piezo-electric bimorph. *Sensors and Actuators*, A(28), 1991.
- [Sim73] H. Simon. The structure of ill-structured problems. *Artificial Intelligence*, 4 :191–200, 1973.
- [SK00] C.M. Scanlan and N. Karim. System-in-package technology, application and trends. Technical report, Ankmor Technology, Inc., 2000.
- [SMF96] X-Q Sun, T. Masuzawa, and M. Fujino. Micro ultrasonic machining and its applications in mems. *Sensors and Actuators*, A(57) :159–164, 1996.
- [Sta01a] T. Starner. The challenges of wearable computing : part 1. *IEEE Micro*, pages 44–52, juillet-août 2001.
- [Sta01b] T. Starner. The challenges of wearable computing : part 2. *IEEE Micro*, pages 54–66, juillet-août 2001.
- [Suh90] N.P. Suh. *The Principle of Design*. Oxford University Press, 1990.

- [Suh01] N.P. Suh. *Axiomatic Design : Advances and Applications*. Oxford University Press, 2001.
- [Tan90] W.C. Tang. *Electrostatic comb drive for resonant sensor and actuator applications*. Ph.d thesis, Department EECS University of California, Berkeley, USA, 1990.
- [Tic89] S. Tichkiewitch. Calcul de structures en intégration dans un système cao. In *Liaison CAO/Calcul de structures, où en est-on ?*, pages 157–175, Paris, décembre 1989. Forum IPSI, vol.13 (3B).
- [Tic92] S. Tichkiewitch. Modélisation pour la conception et processus d'intégration. In *conférence sur la conception en l'an 2000 et au-delà*, Strasbourg, 1992. CNES.
- [TJ94] E. Trischler and M. Johansson. Ten : A concurrent test engineering environment. *IEEE Design and Test of Computers*, pages 6–16, 1994.
- [TJT93] S. Tichkiewitch, A. Jeantet, and H. Tiger. Ingénierie simultanée dans la conception de produits. In *Université d'été pôle productique Rhone-Alpes, Aussois*, 1993.
- [Tos02] H. Toshiyoshi. Microactuators for hard disk drive head positioning. In *IIS Symposium HT*, 2002.
- [TS96] Y. Takeuchi and T. Sata. Ultraprecision 3d micromachining of glass. *Annals of the CIRP* 45, 1, 1996.
- [Tsu95] S. Tsuchiya. Commensurability, a key concept of business re-engineering. In *3rd international symposium of the management of information and corporate knowledge, institut pour l'intelligence artificielle, Compiègne*, 1995.
- [TUY93] T. Tomiyama, Y. Umeda, and H. Yoshikawa. A cad for functional design. *Annals of the CIRP* 42, 1, 1993.
- [Ull02] D.G. Ullman. *The mechanical design process*. Mc Graw Hill, 2002.
- [UWC90] D.G. Ullman, S. Wood, and D. Craig. The importance of drawing in the mechanical design process. *Computer and Graphics*, 14(2) :263–274, 1990.
- [VCD95] P. Vadcard, M. Le Coq, and R. Duchamp. Méthodologie de conception de produits : fondements conceptuels des méthodes. In *Conférence Primeca 95*, pages 305–309, avril 1995.
- [Vin95] D. Vinck. *Sociologie des sciences*. Armand Colin, 1995.
- [VJ95] D. Vinck and A. Jeantet. Mediating and commissioning objects in the sociotechnical process of product design : a conceptual approach. In *Management and new technologies : design, networks and strategies*, pages 111–129, Bruxelles, CEU, 1995.
- [Wau01] M. Wautelet. Scaling laws in the macro-, micro- and nanoworld. *European Journal of Physics*, 22 :601–611, 2001.
- [Wei99a] B. Weil. *Conception collective, coordination et savoirs. Les rationalisations de la conception automobile*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieures des Mines de Paris, 1999.
- [Wei99b] M.S. Weinberg. Working equations for piezoelectric actuators and sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 8(4), december 1999.

- [Wil01] J.A. Williams. Friction and wear of rotating pivots in mems and other small scale devices. *Wear*, (251) :965–972, 2001.
- [WWB⁺02] W. Wang, Y. Wang, H. Bao, B. Xiong, and M. Bao. Friction and wear properties of mems. *Sensors and Actuators*, A(97-98) :486–491, 2002.
- [ZAP02] N. Zhou, A. Agogino, and K.S.J. Pister. Automated design synthesis for micro-electro-mechanical systems (mems). In *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference*, vol2, pages 267–273, 2002.
- [ZBG⁺99] M.H Zaman, S.F. Bart, J.R. Gilbert, N.R. Swart, and M. Mariappan. An environment for design and modeling of electro-mechanical micro-systems. *Journal of Modeling and Simlation of Microsystems*, 1(1) :65–76, 1999.
- [ZGD⁺04] C. Zinck, A De Grave, E. Defaÿ, M. Aid, N. Rimmer, R. Jakkaraju, and M. Harris. A piezoelectric actuated sin clamp-clamp beam for micro switch application. In *Proceedings of the IEEE conference on Thin films*, Singapore, april 2004.