



HAL
open science

CONCEPTION, MODELISATION ET FABRICATION D'UN MICRO-ACTIONNEUR BISTABLE, HORS PLAN ET MAGNETIQUE

Hervé Rostaing

► **To cite this version:**

Hervé Rostaing. CONCEPTION, MODELISATION ET FABRICATION D'UN MICRO-ACTIONNEUR BISTABLE, HORS PLAN ET MAGNETIQUE. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. Français. NNT: . tel-00408339

HAL Id: tel-00408339

<https://theses.hal.science/tel-00408339>

Submitted on 30 Jul 2009

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

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

REMERCIEMENTS

Puisqu'il faut bien commencer par un nom, ce sera Orphérome. Merci à tout deux pour avoir si bien guidé ma thèse. Mais aussi et surtout de ne pas avoir été de simples directeurs de thèse, mais aussi des fins gastronomes, traducteurs, skieurs et pilotes. On dit souvent qu'une thèse est un bon sujet et un bon directeur : moi j'ai eu la chance d'avoir les trois.

J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler et picoler avec les autres microns : Jiri, Nico, JMC, Hynek et les autres... Les M.I.A.M du midi resteront longtemps gravés dans mes papilles. Je remercie tous les gens avec qui j'ai pu avoir des discussions de couloir au LEG, et tout particulièrement l'administration qui fait preuve d'une rare efficacité et convivialité. Comment oublier également Bruno et l'équipe des 'mécano' pour leur aide précieuse en psychomécanique.

J'ai malheureusement fini par quitter tout ce beau monde pour aller me perdre dans les recoins des salles blanches du bâtiment 40 du CEA-LETI. Tout ceci n'aurait pas été possible sans Pierre Gaud qui m'a ouvert les portes du CEA et Christel qui m'a fait découvrir le monde des microsystèmes magnétiques du point de vue techno. Là aussi, j'ai trouvé une équipe de labo formidable où les relations ne s'arrêtent pas au café de 10h15, même si aujourd'hui ces personnes sont éclatées dans différents laboratoires. Merci à tous ces hommes et femmes voilés (en salle blanche, tous égaux !) qui m'ont généreusement offert un peu de leur savoir techno et ainsi permis de faire progresser mon empilement. Je pense notamment à Kiki, reine de la litho, qui a toujours du temps pour aider les petits thesards noyés dans leur résine.

Je tiens également à remercier Messieurs Bachelard et Comboire. A travers ces deux entraînements collectifs hebdomadaire, je voudrais graver le nom d'Alain Persico dans le marbre (de la coupe des balcons) pour sa motivation et sa joie communicative. A David, qui n'est jamais loin derrière dans les montées (mais derrière, c'est derrière...) et aux autres qui ont partagé mes foulées.

Enfin, je n'oublierais pas Olivier, mon colloc', avec lequel je ne me suis jamais engueulé en trois ans de gueuletons mémorables ; Sandrine pour son soutien affectif et ma grand-mère pour les robinets ouverts et les cierges allumés le jour de la soutenance...

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	7
INTRODUCTION	9
CHAPITRE I. Etat de l'art des micro-actionneurs	13
Qu'est-ce qu'un MEMS ?.....	15
I. A Cahier des charges et recherche du type d'actionnement.....	15
I.A.1. Cahier des charges	15
I.A.2. Actionnement électrostatique	17
I.A.3. Actionnement thermique	23
I.A.4. Actionnement piézoélectrique	26
I.A.5. Alliages à mémoire de forme.....	28
I.A.6. Actionnement magnétique.....	30
CHAPITRE II. Conception, Modélisation et optimisation du Micro-Actionneur Magnétique (MIAM).....	51
II.A. Conception	53
II.A.1. Cahier des charges / Recherche d'une structure	53
II.A.2. Principe magnétique choisi.....	54
II.A.3. Bistabilité.....	55
II.A.4. Centrage.....	58
II.A.5. Actionnement.....	60
II.B. Etude et optimisation du MIAM	64
II.B.1. Etude mécanique.....	64
II.B.2. Etude de la consommation en courant.....	67
II.B.3. Validation du principe par une maquette.....	73
II.B.4. Comment améliorer le principe	75
II.C. Modélisation.....	80
II.C.1. Forces et couples.....	80
II.C.2. Accélération des calculs	87
II.C.3. Aspect mécanique.....	89
II.C.4. Logiciels et programmes.....	92
II.C.5. Conclusion.....	93

CHAPITRE III. Etude thermique	97
III.A. Introduction	98
III.A.1. Géométrie des conducteurs.....	99
III.B. Etude expérimentale :	101
III.B.1. Motifs de tests.....	101
III.B.2. Dispositif de test	102
III.B.3. Caractérisation des motifs.....	103
III.B.4. Test des motifs.....	109
III.C. Modélisation thermique.....	113
CHAPITRE IV. Fabrication du μ-actionneur avec des procédés μ-technologiques ..	121
IV.A. Rappel des procédés de micro-technologie basiques	123
IV.A.1. Masques	123
IV.A.2. Photolithographie	123
IV.A.3. Gravure	125
IV.A.4. Dépôts sous vide	126
IV.A.5. Dépôt électrolytique.....	127
IV.A.6. CMP et planarisation mécanique	129
IV.B. Empilement technologique.....	131
IV.B.1. Présentation générale de l'empilement.....	131
IV.B.2. Empilement, étape par étape	132
IV.C. Briques de base.....	143
IV.C.1. Dépôt électrolytique de CoPt	143
IV.C.2. Caissons résine	145
IV.C.3. Planarisation mécanique du CoPt.....	146
IV.C.4. CMP du SiO ₂ sur CoPt.....	147
IV.C.5. CMP du cuivre	149
IV.C.6. Caractérisation magnétique	149
IV.C.7. Fusion des billes flip-chip	151
IV.C.8. Libération de l'aimant mobile	153
IV.D. Avancée des travaux :	156
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	159
BIBLIOGRAPHIE	163
ANNEXES	171
Annexe I : Systèmes d'unités magnétiques.....	173
Annexe II : Modélisation.....	174

INTRODUCTION

Cette thèse a été menée conjointement au LEG et au LETI-CEA. Depuis plusieurs années l'équipe μ Systemes Magnétiques au LEG travaille en collaboration étroite avec le LCMS au LETI: nous associons ainsi nos expertises et compétences complémentaires dans les domaines de la conception de μ -systemes électro-magnétiques, des outils de modélisation et de simulation dédiés, des technologies d'élaboration de matériaux et de μ -fabrication en salle blanche, ainsi que de caractérisation et de tests.

Les μ -systemes intégrés sur silicium sont appelés Micro ElectroMechanical Systems ou MEMS ; ils conquièrent de plus en plus d'applications dans notre monde de tous les jours. Ces technologies intégrées sur silicium sont basées sur celles de la micro-électronique. Dans la plupart des cas, il s'agit de capteurs, et les mouvements sont limités à quelques micromètres. On retrouve ces puces de quelques mm^2 dans les capteurs accélérométriques pour airbags, les capteurs de pressions, les boussoles des montres, les matrices actives de vidéoprojecteurs et bientôt dans les téléphones portables (switchs RF) ou pour des micro-relais de puissance.

Récemment les demandes de switchs optiques, RF ou électriques à grand gap, avec un temps d'actionnement rapide n'ont pas pu être satisfaites avec les technologies habituelles. Cette thèse a donc pour objectif de réaliser un micro-actionneur ayant une partie mobile se déplaçant de près de 100 μm . Ce grand déplacement est nécessaire pour des applications telles que des switch RF pour un meilleur découplage du guide d'onde, des micro-relais de puissance car la tension de claquage est alors plus importante, ou pour des matrices de micro-commutateurs optiques qui nécessitent un grand déplacement pour faire commuter un miroir devant une fibre optique. Dans notre cas cette partie mobile doit de préférence être bistable, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de consommation d'énergie pour maintenir la partie mobile dans un état stable (ouvert / fermé). La puce doit de plus utiliser une petite surface ($<10 \text{ mm}^2$) afin de maximiser le nombre de puces par plaque et donc de minimiser le prix des puces. Les deux derniers points critiques sont plus difficiles à prévoir : le temps de commutation doit être inférieur à la milliseconde et l'énergie de commutation à chaque mouvement doit être minimale.

A partir de ce besoin nous allons étudier les différents types d'actionnement disponibles dans les MEMS. Ainsi nous allons comparer l'actionnement électrostatique, thermique, piézoélectrique, à mémoire de forme et magnétique à notre cahier des charges. Comme nous allons le voir dans ces chapitres, l'actionnement magnétique aux petites dimensions permet des grandes densités de force et d'énergie et peut ainsi apporter des solutions intéressantes pour certains micro-actionneurs.

Partant de cette spécificité magnétique du contexte Grenoblois nous avons entrepris le développement d'un actionneur magnétique que nous allons concevoir de manière intuitive dans un premier temps en nous basant sur le savoir faire acquis dans l'équipe μ -Systèmes Magnétiques. Nous étudierons alors les diverses méthodes analytiques ou non permettant de calculer le champ magnétique ainsi que les forces et les couples entre des aimants et des conducteurs de courant, afin de déterminer lesquelles correspondent le mieux à notre besoin. Fort des ces algorithmes (analytiques), nous créerons un outil modélisant la globalité du micro-actionneur : c'est-à-dire que nous connaîtrons son comportement magnétostatique et dynamique et pourrons en déduire un premier dimensionnement, ainsi que ses principales caractéristiques (temps de commutation, énergie de commutation, mouvement exact durant le déplacement). Ensuite viendra la phase très importante de l'optimisation afin de réduire au minimum l'énergie de commutation par impulsion tout en respectant des contraintes de micro-fabrication. Cette optimisation nous poussera à nous interroger sur le comportement thermique des conducteurs suralimentés, et nous étudierons alors le problème des densités de courant extrêmes en micro-systèmes.

Cette étude thermique sera conduite simultanément sur le plan expérimental et théorique. Nous caractériserons un dispositif permettant d'évacuer la chaleur sans modifier la densité de courant dans le conducteur. L'étude expérimentale nous aidera aussi à préciser les constantes thermiques utilisées dans l'étude théorique.

La dernière phase est bien entendu la réalisation de notre micro-actionneur. Dans un premier temps nous testerons le modèle sur un actionneur de taille centimétrique. Puis, nous débuterons la réalisation du prototype dans les salles blanches du CEA-LETI. La première phase consiste à rédiger un 'flow-chart' (suites des étapes technologiques du prototypage) puis à dessiner les masques. Vient ensuite la phase de développement des briques de base où nous chercherons à valider certaines étapes technologiques critiques telles que l'électrodéposition des aimants en CoPt et leur libération, la planarisation des aimants et des conducteurs en cuivre, l'électrodéposition des billes flip-chip... Enfin, nous fabriquerons le premier substrat et nous verrons les difficultés qui n'ont pas été révélées par l'étude des briques de bases.

CHAPITRE I. ETAT DE L'ART

DES MICRO-ACTIONNEURS

Résumé :

Les micro-actionneurs connaissent un engouement croissant depuis quelques années. Dans le cadre des commutateurs optiques et des micro-relais électriques de puissance ou RF, nous cherchons à concevoir et prototyper un micro-actionneur :

- Bistable
- Avec un grand déplacement (jusqu'à 150 μm)
- Peu encombrant (Surface < 10 mm^2)
- Rapide (< 1ms)

Tout en souhaitant réaliser un micro-actionneur magnétique, nous avons cherché à définir les principales caractéristiques des autres modes d'actionnement afin de savoir s'il n'existe pas déjà de solutions évidentes.

➤ Electrostatique :
déjà très étudié, simple, consomme très peu d'énergie, tensions élevées, peu utilisé pour de grands déplacements, interaction uniquement attractive, bistabilité non triviale.

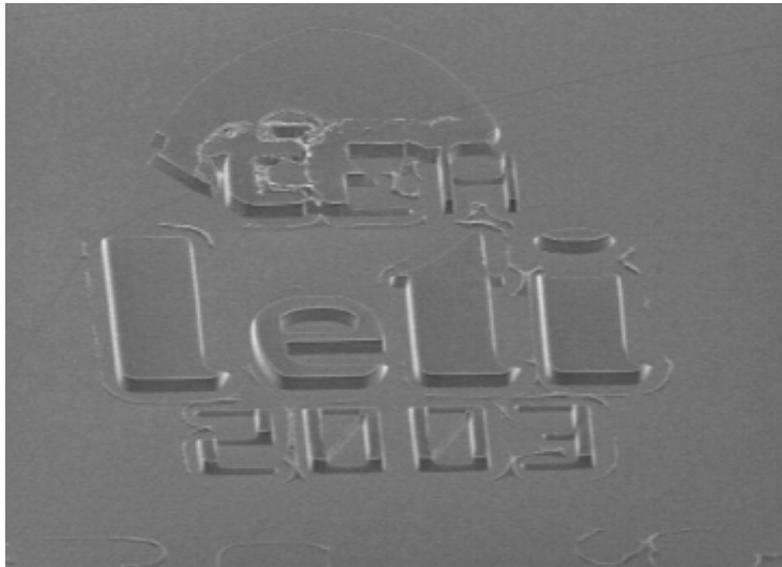
➤ Thermique :
déjà très étudié, simple, utilisation d'une poutre comme support, bistabilité non triviale, consomme de l'énergie.

➤ Piézoélectrique :
consomme peu d'énergie, rapide, actionnement dans les deux sens, bistabilité non triviale, grands déplacements très difficiles.

➤ Alliages à mémoire de forme :
Systèmes de taille millimétrique, actionnement bidirectionnel, bistabilité non triviale, grands déplacement en bout de poutre ou angulaire.

➤ Magnétique :
encore assez peu étudié, forces attractives et répulsives pour des interactions entre aimants et/ou courant, bistabilité possible, bonnes propriétés de réduction d'échelle, adapté aux grands déplacements, consomme de l'énergie, technologie peu développée.

CHAPITRE I. ETAT DE L'ART DES MICRO-ACTIONNEURS



Richard Feynman, 1959

« There's plenty of room at the bottom »

*Ca va faire 45 ans que l'on creuse et
personne n'entrevoit le fond du puits...*

QU'EST-CE QU'UN MEMS ?

"MEMS" est un acronyme anglais pour 'Micro Electro-Mechanical Systems' qui peut se traduire par "micro-systèmes électro-mécaniques".

Il y a plusieurs familles de MEMS : les MOEMS (pour l'Optique), les RF-MEMS (switchs Radio Fréquences), les BIO-MEMS (pour la biologie avec les 'lab-on-chip') et les MAGMAS Micro-Actionneurs et Générateurs MAGnétiques, ou MAGnetic Micro-Actuators & Systems), chacune pouvant comporter des actionneurs ou des capteurs. C'est une très grande famille mais qui se partage pour le moment un très faible nombre de produits industriels ou grand public. Parmi eux, il faut noter : les têtes d'imprimantes, les capteurs d'air bag, les matrices actives de μ -miroirs dans les vidéo-projecteurs, les boussoles et altimètres intégrés dans les montres sportives, les têtes de disques durs...

Ce secteur reste très proche de la recherche car il y a encore beaucoup de progrès à faire afin de découvrir et de stabiliser de nouveaux procédés, de développer de nouveaux matériaux ou encore de créer de nouveaux logiciels de simulation.

Dans cette thèse nous allons chercher à fabriquer un micro-actionneur, c'est-à-dire un système de taille micrométrique ou sub-millimétrique, comportant une partie mobile commandée. Le premier problème à résoudre est de déterminer le mode d'actionnement de cette partie mobile : électrostatique, piézoélectrique, thermique, alliages à mémoire de forme et magnétique sont autant de choix possibles parmi d'autres. Notre culture locale nous incite à faire le choix de l'actionnement magnétique ; afin de valider ce choix et de nous assurer que nous ne passons pas à côté d'une solution idéale, nous allons nous baser sur un cahier des charges et le comparer à la littérature.

I. A CAHIER DES CHARGES ET RECHERCHE DU TYPE D'ACTIONNEMENT

Nous allons tout d'abord définir les caractéristiques du micro-actionneur que nous cherchons à réaliser. A partir de ce cahier des charges succinct, nous allons pouvoir comparer notre besoin aux possibilités offertes par les divers types d'actionnement connus et maîtrisés dans le domaine des micro-systèmes. Ainsi nous pourrions juger de leur pertinence, et éventuellement valider le choix préalable d'un actionnement basé sur les interactions magnétiques.

I.A.1. Cahier des charges

Ces dernières années, nous avons été confrontés à des demandes de micro-actionneurs pour des applications optiques et électriques.

L'application optique consiste à réaliser un commutateur de réseaux de fibres optiques (cette étude nous avait été sous-traitée par la société MemsCAP, qui, pour des raisons stratégiques et financières, n'a ensuite pas souhaité la mener à terme). Un commutateur optique permet de rediriger un faisceau lumineux d'une fibre optique d'entrée à une fibre optique de sortie (Figure I.1).

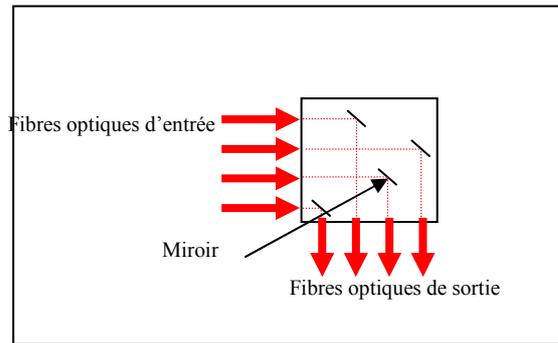


Figure I.1

Principe d'un commutateur optique 4*4 : 4 fibres optiques en entrée et 4 fibres optiques en sortie.

Le mouvement hors du plan d'un miroir sélectionné permet de commuter l'information contenue dans une fibre vers la fibre destinataire. Pour que la lumière du faisceau soit redirigée correctement et que le passage du faisceau ne soit pas gêné par un bout de miroir qui dépasse, il faut que le miroir se déplace d'une valeur au moins égale au diamètre du faisceau, du cœur de fibre, ou de la fibre optique elle-même, soit entre 50 et 200 μm . Pour des raisons de focalisation, le faisceau lumineux ne doit se propager que de quelques millimètres dans l'air: les micro-actionneurs doivent donc utiliser une surface minimale (moins de 1 mm^2 pour la surface active, moins de 10 mm^2 pour une puce complète) pour que le commutateur puisse rediriger un nombre de fibres optiques important (généralement de 2 x 2 à 16 x 16 selon les modèles). De plus, les micro-actionneurs doivent être bistables, c'est-à-dire qu'aucun apport énergétique ne doit être nécessaire pour maintenir la partie mobile dans l'une ou l'autre des positions stables. Cela permet de ne pas consommer inutilement de l'énergie et de garder la configuration du commutateur même lorsque ce dernier n'est pas alimenté, dans le cas d'une panne électrique par exemple. Enfin, la vitesse de 'rafraîchissement' doit être de l'ordre de la milliseconde.

En ce qui concerne les applications électriques, nous ne pouvons détailler aujourd'hui le cahier des charges auquel nous sommes soumis. Nous retiendrons cependant la nécessité de déplacement supérieur à 100 μm , la bistabilité et une commutation ne devant pas dépasser la milliseconde ici aussi. Dans le cas électrique, un déplacement vertical permet également d'avoir une grande surface de contact. Le tout doit rester viable avec les microtechnologies collectives et ne pas aboutir à des surfaces actives de puces trop supérieures au millimètre carré (10 mm^2 pour le système complet) autant pour des raisons financières que pour faciliter la mise en parallèle ou en série de plusieurs micro-relais. La réalisation des systèmes montés en parallèle ou en matrice, impose d'optimiser la taille de l'actionneur par rapport à celle de l'objet à actionner (miroir, contact...). Le dernier point important que nous chercherons à minimiser est l'énergie nécessaire à la commutation, pour des raisons de consommation et d'autonomie éventuelle.

Notons enfin que les chiffres et contraintes cités ci-dessus sont également pertinents pour certains relais radio-fréquence utilisés en télécommunications et radar.

Notre équipe est spécialisée dans le magnétisme et nous tendrons donc par notre savoir faire à proposer des actionneurs magnétiques. Cependant, assurons-nous que d'autres types d'actionneurs n'offrent pas de solutions plus simples ou plus efficaces à notre besoin. En effet, le magnétisme met en œuvre des technologies et des matériaux qui sont encore aujourd'hui assez lourds et délicats à mettre en œuvre. Il est donc préférable d'utiliser le magnétisme dans des cas où il est susceptible d'apporter un véritable plus par rapport à des technologies existantes, plus simples et à l'efficacité déjà prouvée.

Dans les paragraphes suivants, nous nous attacherons donc à décrire les différents principes d'actionnements les plus développés aujourd'hui dans les microsystèmes, leurs avantages et leurs inconvénients. Leur adéquation à notre cahier des charges pourra ainsi être discutée.

Afin de répondre à notre cahier des charges, nous serons particulièrement sensibles aux critères suivants :

- La bistabilité
- Un déplacement d'au moins 100 μm
- La taille de l'actionneur par rapport à l'objet actionné
- Un temps de commutation inférieur à 1 ms
- L'énergie de commutation
- Le mode d'alimentation de l'actionneur
- Les problèmes de réalisation technologique

I.A.2. Actionnement électrostatique

Le principe de base est de créer une force entre deux surfaces conductrices par l'application d'une tension électrique. C'est le type d'actionneur le plus utilisé dans les MEMS car il est le plus simple et le mieux connu. Nous allons voir ses points forts et ses points faibles.

I.A.2.1 Structure basique

Le plus important des points forts est incontestablement le savoir et le savoir faire acquis dans ce domaine depuis des dizaines d'années et la forte compatibilité avec la technologie sur silicium, ce type d'actionnement étant le premier à avoir découlé historiquement de la microélectronique.

Le principe de base peut être modélisé par un condensateur plan. Soit deux plaques d'une surface S en vis-à-vis, séparées de e microns (Figure I.2) : la force résultante F due à une tension V entre ces deux plaques est proportionnelle au carré de la tension V et de la distance e et est linéaire avec la surface S . (Équ. I.1).

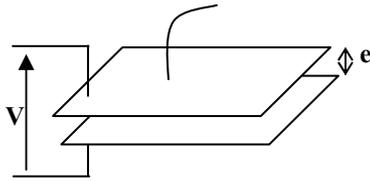


Figure I.2
Modèle d'une capacité plane.

$$F = S \cdot \epsilon_o \cdot \frac{V^2}{2 \cdot e^2}$$

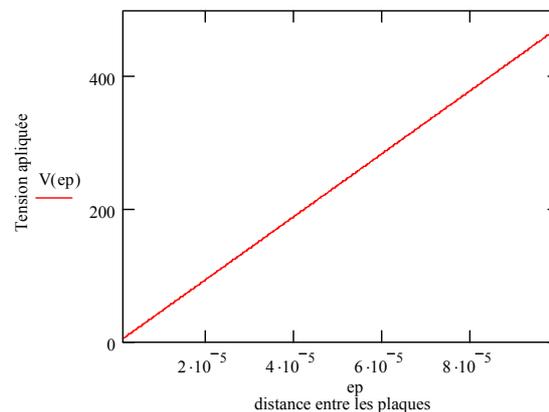
$$\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$$

Équ. I.1

Les actionneurs électrostatiques actuels sont basés sur de nombreux micro-actionneurs en parallèles qui travaillent à la réalisation d'une même tâche comme tirer un objet, d'autres utilisent des principes de "zipping" afin d'obtenir un grand déplacement avec des faibles tensions (voir les exemples ci-dessous).

L'autre gros point fort de l'électrostatique est la très faible consommation électrique au repos : il n'y a que des tensions à maintenir, et pratiquement pas de courant : la consommation électrique est quasi-nulle, aux fuites de courant près. L'actionnement nécessite bien entendu de la puissance pour 'charger' la capacité et ainsi générer le mouvement, mais les tensions étant généralement élevées, le courant est donc souvent très faible.

Les courants sont très faibles et c'est là un point positif, cependant les tensions nécessaires sont élevées et l'alimentation peut poser un problème. Si l'on veut obtenir une certaine force F , il faut appliquer une tension proportionnelle à la distance comme le montre le Graph. I.1 pour 1 μN par exemple. On remarque que les tensions nécessaires sont de plusieurs dizaines de volts : par exemple un actionnement sur 50 μm par cette technique demanderait une tension de 240 Volts.



Graph. I.1

Tension en fonction de la distance entre plaques pour une surface de 100 x 100 μm^2 et une force de 1 μN .

On remarque dans l'Equ. I.1 que $F \propto V^2$: la force électrostatique est uniquement attractive et le retour de la partie mobile doit être assuré par un 'ressort' (poutre en flexion) ou un autre actionneur similaire placé en vis-à-vis. D'autre part, à partir d'une certaine tension dite "de claquage", le champ

électrique peut faire apparaître des arcs électriques qui détériorent le système, et posent un problème dans la conception de l'alimentation. La loi de Paschen montre que cette tension de claquage est fonction de la distance inter-plaque et de la pression de l'air ambiant (Figure I.3 [PAS89]). Il faut remarquer qu'en-deçà d'une certaine distance (en dessous de 100 μm environ à l'atmosphère), cette tension de claquage tend à remonter et permet donc d'obtenir des forces supérieures pour des "petits" entrefers, typiquement de la taille des micro-actionneurs électrostatiques 'classiques'; cependant dans notre cas nous voulons travailler à des distances égales ou supérieures à 100 μm .

Enfin, des phénomènes de collage physico-chimique ('stiction') de la partie mobile peuvent aussi apparaître lorsque les deux plaques arrivent en contact.

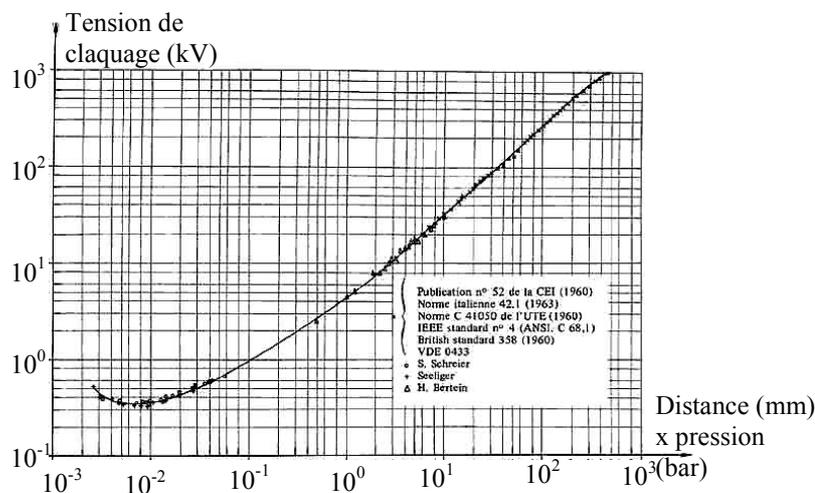


Figure I.3

Claquage électrostatique en fonction de la distance et de la pression, dans l'air (loi de Paschen)

Ainsi, s'ils sont utilisés dans cette configuration de base, les actionneurs électrostatiques posent des problèmes d'alimentation si l'on cherche des déplacements supérieurs à quelques micromètres. De nombreux laboratoires ont ainsi développé des structures plus évoluées qui permettent d'y remédier.

I.A.2.2 Quelques principes d'améliorations

➤ Actionneurs à peignes interdigités (Comb-Drive) :

Un actionneur électrostatique seul demande beaucoup de tension pour des forces modestes. Alors pourquoi ne pas créer des armées d'actionneurs? Pour une même tension, on multiplie la force développée! Le 'Comb-Drive' ressemble donc à une paire de peignes qui s'interpénètrent ("interdigités") comme sur la Figure I.4, ce qui permet de multiplier les surfaces en regard (15 actionneurs sur 150 μm de long dans cet exemple). Le 'Comb-Drive' fonctionne sur le principe d'une variation de surface et non d'entrefers comme dans la configuration de base. Grâce à la symétrie de la configuration, les forces électrostatiques globales tendent à faire s'interpénétrer les peignes,

augmentant ainsi la distance potentielle de travail. Le calcul simplifié de la force (Equ. I.2) montre que pour $g = 2 \mu\text{m}$, $h = 2 \mu\text{m}$ (hauteur de la structure, Figure I.5) et $V = 30 \text{ V}$, on obtient une force F de $0,008 \mu\text{N}$ pour un peigne. Il faut ainsi 125 peignes pour obtenir une force de $1 \mu\text{N}$.

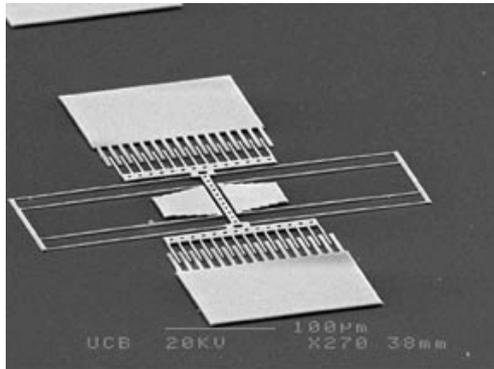


Figure I.4
[BERK] Actionneur "Comb-Drive"
à peignes interdigités.

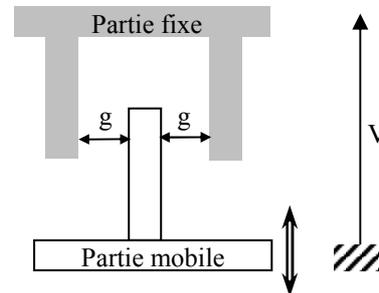


Figure I.5
Schéma de principe des peignes interdigités

$$F_y = N \cdot \epsilon_o \cdot \frac{h}{g} \cdot V^2$$

$$\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$$

Équ. I.2

Les 'Comb-Drive' comme les 'Scratch-Drive' (ci-après) permettent de mettre en parallèle un grand nombre d'actionneurs sur une petite surface. Avec ce type d'actionneur les déplacements ne sont plus limités par les claquages électrostatiques mais il faudra prendre garde à dimensionner correctement les longues poutres de flexion nécessaires au retour du dispositif au repos.

➤ Le Scratch Drive Actuator: SDA

Ce sont des sortes de 'jambes' (Figure I.6 (a)) qui se plient et provoquent un déplacement lorsqu'une faible tension est appliquée entre elles et le substrat avec lequel elles sont en vis-à-vis (Figure I.6 (b)). Les points forts de ce système sont une distance faible entre électrodes et donc une force élevée avec des tensions modérées, ainsi que l'utilisation des frottements pour avancer.

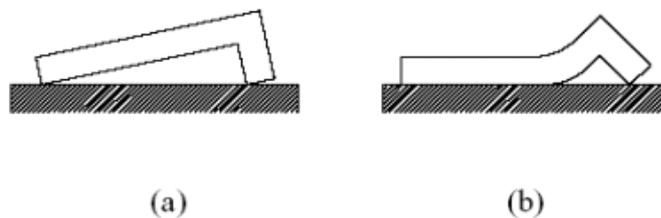


Figure I.6
Principe du SDA. (a) sans tension, (b) sous tension.

La mise en parallèle et en série de nombreux SDA permet d'obtenir des forces d'actionnement plus importantes comme le montrent la Figure I.7 et la Figure I.8 (LIMMS-LMA). Enfin, ce système permet d'obtenir un mouvement théoriquement illimité grâce à l'accumulation de pas élémentaires: le système est «libre» et peut ainsi par exemple tirer une structure sur une grande distance (Figure I.7) ou faire tourner un moteur en rotation continue (Figure I.8).

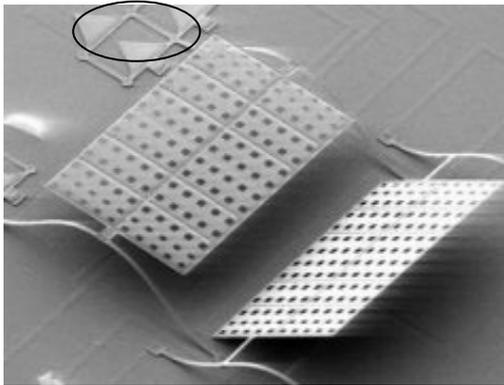


Figure I.7

Les actionneurs triangulaires (entourés) font flamber une poutre, ce qui permet de monter une plaque à 100 μm au dessus du substrat.

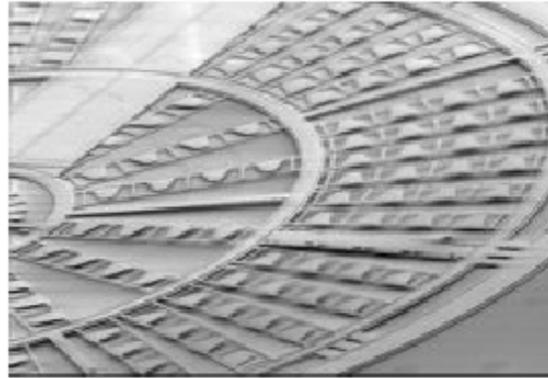


Figure I.8

Ici les mêmes actionneurs permettent de faire tourner en continu un moteur bidirectionnel (LIMMS-LMA).

Le laboratoire Fujita Labs [FUJ00] au Japon a fabriqué un scanner 2D (Figure I.9) qui permet le déplacement d'une micro-lentille (1) de +/- 50 μm grâce à un système de plusieurs actionneurs scratch-drive (2). Chacun ne pouvant bouger que dans une direction, il en faut 4 séries pour pouvoir faire un actionnement 2D réversible (flèches noires).

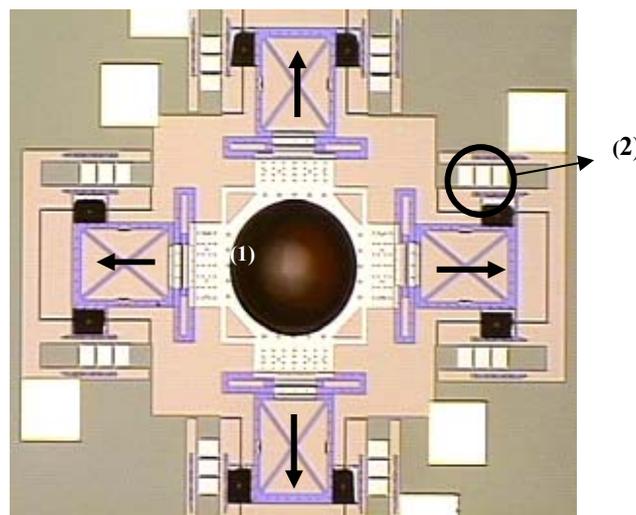
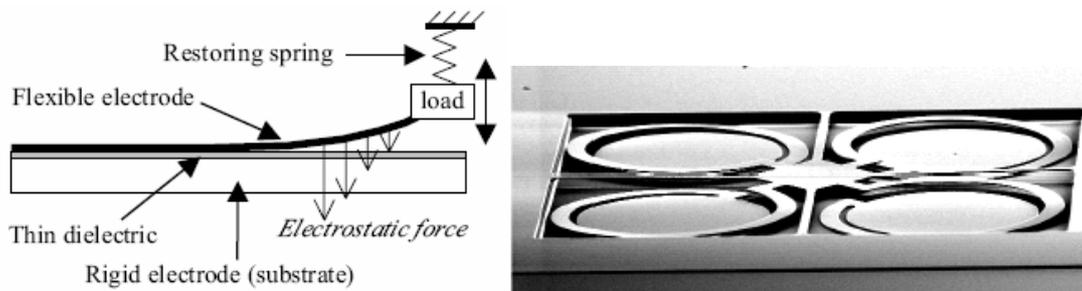


Figure I.9

Micro-lentille actionnée dans 4 directions par des SDA.

➤ L'actionneur à "zipping": [DIV03]

Comme dans le cas des SDA, le but de l'actionneur à "zipping" est d'avoir de grandes forces avec un grand déplacement global, tout en utilisant des tensions qui restent modérées. Le principe est basé (Figure I.10 (a)) sur une poutre flexible (*flexible electrode*) qui se colle progressivement au substrat (*rigid electrode*) ; la poutre est retenue par un ressort de rappel en bout de poutre (*restoring spring*) qui rend linéaire le déplacement en fonction de la tension. Le quadruple actionneur "zipping" présenté Figure I.10 (b) se déplace de 6 μm avec des tensions de l'ordre de 150 V et des forces de 200 μN . Ce système ingénieux est tout récent, et il reste tout de même assez loin de nos besoins en termes de déplacement et de tension.



(a) Principe du zipping

Figure I.10

(b) Quadruple actionneur zipping

I.A.2.3 Compatibilité avec notre cahier des charges

Le point fort de l'électrostatique est sans doute l'utilisation de courants faibles et une bonne compatibilité avec les technologies utilisées en micro-électronique, ainsi que le savoir faire accumulé dans ce domaine depuis de nombreuses années. De plus, la vitesse de commutation semble être un atout important de l'actionnement électrostatique lorsqu'il est utilisé en actionnement direct.

Mais le problème des fortes tensions est encore suffisamment important pour que nous ne puissions le négliger: un actionnement entre deux surfaces distantes de 100 μm reste encore aujourd'hui délicat surtout si l'on souhaite un actionnement perpendiculaire au plan du silicium, et de surcroît bistable.

A notre avis, il est tout à fait possible d'imaginer des structures interdigitées, à zipping, ou à SDA qui fourniraient des grands déplacements ($> 100 \mu\text{m}$) sous faible tension ($< 30 \text{ V}$). Mais la place nécessaire pour loger les actionneurs risque d'être importante.

Les forces électrostatiques sont uniquement attractives, ainsi le retour en position devra se faire soit par un élément de rappel (poutre, ressort) ou par un actionneur identique positionné symétriquement.

Enfin, le problème de la bistabilité n'est pas évident à résoudre. La solution réside probablement dans le flambage d'une poutre, ou mieux, dans l'hybridation avec un aimant permanent par exemple.

I.A.3. Actionnement thermique

La première intuition que nous pouvons avoir sur la chaleur est que c'est un phénomène lent (le temps qu'il faut pour chauffer une poêle ou une friteuse, pour chauffer une maison froide...). Lent, oui, mais parce que dans notre vie quotidienne nous avons besoin de chauffer des gros volumes. Or dans le monde des microsystèmes, le rapport entre le volume de matière à chauffer et les surfaces d'échange thermique devient très favorable, donc le chauffage et le refroidissement peuvent être très rapides (demandez donc à la musaraigne pourquoi elle passe son temps à manger pour se réchauffer !).

Les principales lignes de recherche concernant l'actionnement thermique exploitent l'effet de dilatation différentielle, aussi appelé effet bilame. Le principe est simple (Figure I.11): il suffit de coller ensemble deux lamelles de matériaux qui n'ont pas le même coefficient de dilatation (par exemple Al et Si). Lorsque vous chauffez l'ensemble, l'une des deux lamelles va se dilater plus que l'autre, et l'ensemble va donc se courber dans une direction autour d'une fibre neutre. Lors du refroidissement, on observe le même phénomène, mais dans l'autre sens.

I.A.3.1 Structure Basique

Ce procédé est simple et est déjà très utilisé quotidiennement (thermostat, relais électriques de clignotants...). Il est tout à fait possible de construire une poutre ou une structure similaire se déplaçant d'une centaine de micromètres à son extrémité. Le chauffage est directement obtenu par effet Joule en faisant circuler un courant électrique dans une des lamelles, résistive.

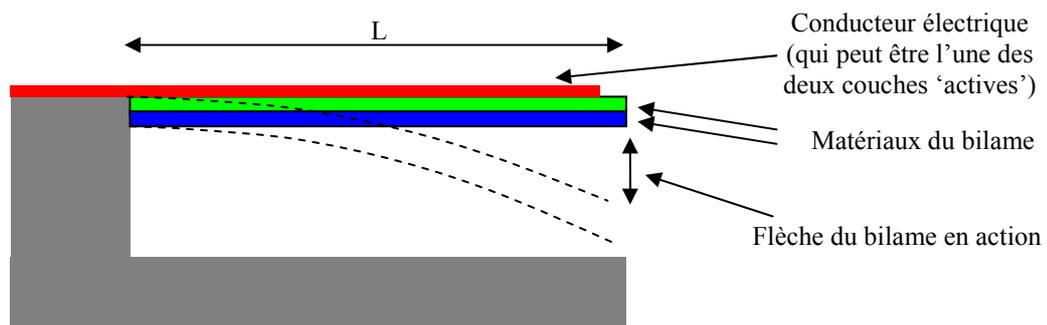


Figure I.11
Schéma de principe de l'effet bilame.

Lorsque le bilame est chauffé, il se déforme par flexion dans un sens, le retour à la position initiale étant dû au refroidissement de la poutre par conduction ou convection. Certains systèmes permettent un double actionnement (voir exemple plus loin) mais leur fabrication est plus délicate.

Ces systèmes sont donc d'autant plus performants que les volumes de matériaux dont on utilise les propriétés thermiques sont faibles. Mais les épaisseurs des couches et les coefficients de dilatation

usuels font qu'en général, l'élément qui se déforme doit être long par rapport au déplacement souhaité en bout de poutre : pour se déplacer d'une centaine de microns, la taille d'un bilame Al sur Si devrait approcher le millimètre. La masse thermique qu'il faut alors chauffer et refroidir en est augmentée, ce qui ralentit le temps de commutation et augmente l'énergie de commutation nécessaire.

La bistabilité semble aussi être un problème délicat, comme pour l'électrostatique. Une des positions est naturellement instable si le courant est coupé. Un compromis permettant de maintenir une position peut être trouvé en utilisant une force de maintien électrostatique (voir exemple). Cela n'assure cependant pas la bistabilité car la position n'est pas maintenue sans alimentation. On pourrait cependant envisager l'emploi d'un système complexe tel qu'une poutre en flambage.

Enfin, la bidirectionnalité implique un refroidissement contrôlé, donc probablement par l'adjonction d'un système à effet Peltier par exemple. Il s'agit alors d'un montage qui se complexifie.

I.A.3.2 Quelques exemples

Voici un exemple assez récent d'actionnement thermique (Figure I.12, [CHE02]). Ce MEMS est basé sur un double effet bilame. Pour chauffer, il suffit de faire passer du courant dans une des couches du bilame qui a été fabriquée avec un matériau conducteur. Mais il est difficile de refroidir naturellement un microsystème en dessous de la température ambiante et il n'est donc pas évident de faire un bilame se déplaçant rapidement dans deux directions. La solution est montrée Figure I.12 : il utilise le passage d'un courant soit dans le conducteurs (1) soit dans le (2) pour faire respectivement monter ou descendre l'actionneur. Dans cet exemple, l'actionneur mesure 240 μm de long par 10 μm de large et 1,2 μm d'épaisseur, et peut se déplacer de $\pm 7 \mu\text{m}$ (14 μm de course totale) sous 5 Volts. À une fréquence de travail proche de 40 kHz ($t = 25 \mu\text{s}$) on obtient un déplacement de 2 μm mais il s'agit là de la résonance et non pas d'un déplacement quasi-statique contrôlé. Enfin, l'endurance du système dépasse les 10^9 cycles (soit environ 3 jours en continu à 40 kHz).

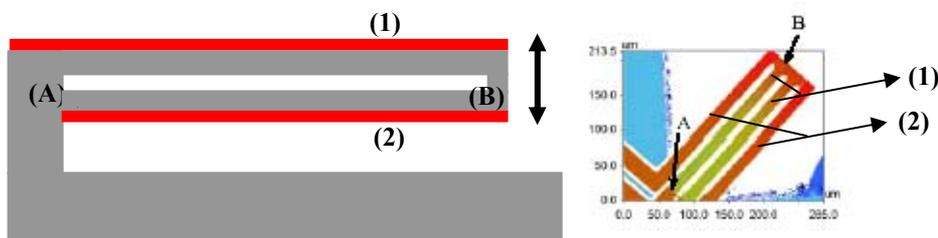


Figure I.12

Schéma simplifié du dispositif bilame à double couche.

En chauffant le conducteur (1), le bras monte et en chauffant le conducteur (2), il descend.

Au LETI (CEA Grenoble), un micro-relais électrique MIRA a été réalisé selon ce principe [BIL03]. Grâce à un échauffement localisé près de la membrane (flèches sur la Figure I.13) la structure fléchit et met en contact les deux lignes de signal RF. Le déplacement est de 10 μm et est

réalisé en 250 μs avec 50 mW de chauffage soit 12,5 μJ . Malheureusement, ce relais n'est pas bistable et nécessite donc une tension pour assurer un blocage électrostatique (15 V) en position fermée. La Figure I.14 montre une vue globale de la puce.

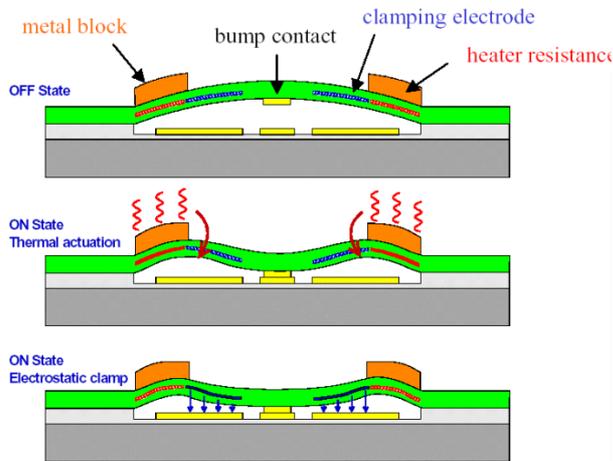


Figure I.13
Schéma du micro-relais thermique MIRA

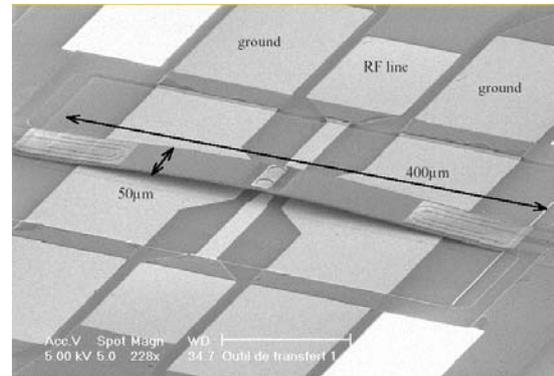


Figure I.14
Photo de la puce du MIRA

A Besançon, le Laboratoire d'Automatique de Besançon [LAB03] a conçu un micro robot à six pattes (cf. Figure I.15) capable de se mouvoir à 100 $\mu\text{m/s}$, de gravir une pente de 12° en verre poli et de porter une charge de 5,3 g alors qu'il ne pèse que 50 mg. Le principe d'actionnement des pattes est thermique (bilame avec une force de blocage de 8 mN, énergie consommée par déplacement de patte : 680 mJ). Ses dimensions sont d'à peine 3,5 mm de long, 6 mm de large et 0,5 mm de haut ! Les prochaines étapes sont l'intégration de la connectique, la commande, la source d'énergie, un système de communication et de micro-préhension....



Figure I.15
Micro-robot à six pattes développé à Besançon, l'un des cinq au monde et peut-être le plus petit [LAB03].

I.A.3.3 Compatibilité avec notre cahier des charges

Les applications existantes montrent que ces systèmes sont assez rapides (250 μs pour 10 μm) mais que les déplacements utilisés dans des configurations simples sont en général limités à une dizaine de μm . Il est parfaitement envisageable de réaliser des déplacements d'une centaine de micromètre, mais cela risque de se payer par une taille d'actionneur très supérieure. En plus de l'encombrement, la masse de matériaux à chauffer va par conséquent augmenter sensiblement, ce qui dégradera à la fois la consommation et le temps de réponse.

Le maintien en position est compliqué car à moins de consommer de l'énergie pour chauffer le bilame il faut avoir recours à un principe différent, comme le flambage, ou le maintien électrostatique ou magnétique. La bistabilité n'est donc pas naturellement acquise.

Par contre, les tensions de commande de ces systèmes sont faibles (on chauffe avec un courant) et peuvent être facilement adaptées aux alimentations, a priori sans problème particulier.

I.A.4. Actionnement piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques (quartz, PZT) ont pour caractéristique de s'allonger ou rétrécir lorsqu'ils subissent une tension à leurs bornes (selon le matériau, l'effet s'inverse lorsque la tension s'inverse). Les forces développées lors de la déformation sont importantes. Malheureusement ces déformations sont relativement faibles (jusqu'à 0,1 ou 0,2 % environ). Pour pouvoir fabriquer un micro-actionneur se déplaçant de 100 μm , l'actionnement direct est donc à proscrire pour des questions d'encombrement: on pourrait utiliser l'effet piézoélectrique en flexion, en effet bilame [LEE04].

I.A.4.1 Exemple d'une pompe

Ce dispositif est une micro-pompe à actionnement piézoélectrique [LOY] comme le montrent les figures 16 et 17. L'actionnement du matériau piézo par rapport au substrat silicium permet le mécanisme de pompage. La vitesse de pompage peut être ajustée par la fréquence et l'amplitude du signal servant à exciter le piézo. Le dispositif est proposé monté en boîtier avec son électronique de commande. Ce système est compatible avec de nombreux liquides et les applications se situent dans le domaine médical pour le dosage précis de médicaments. Le dispositif mesure 7 x 7 mm^2 et peut pomper à une vitesse de 1 ml/min pour les liquides et 3 ml/min pour les gaz.

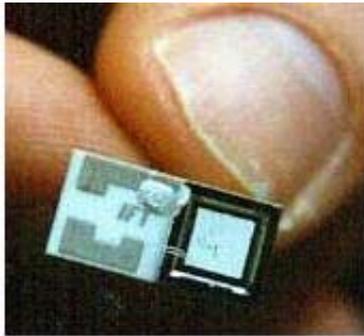


Figure I.16
Photo du dispositif monté

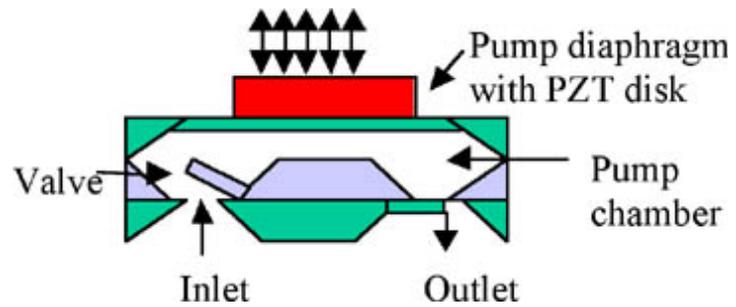


Figure I.17
Schéma du dispositif en coupe

I.A.4.2 Exemple d'un relais électrique [LEE04]

La compagnie LG va bientôt fabriquer en série des micro-switches RF pour des téléphones portables, basés sur la flexion d'une poutre actionnée par un bilame piézoélectrique. Il est caractérisé par un fonctionnement sous faible tension (3,5 V) et une bonne isolation en fréquence. Le déplacement de la poutre est de $3 \mu\text{m}$ pour des temps de commutation excellents : $20 \mu\text{s}$ pour la fermeture, $4 \mu\text{s}$ pour le retour en position.

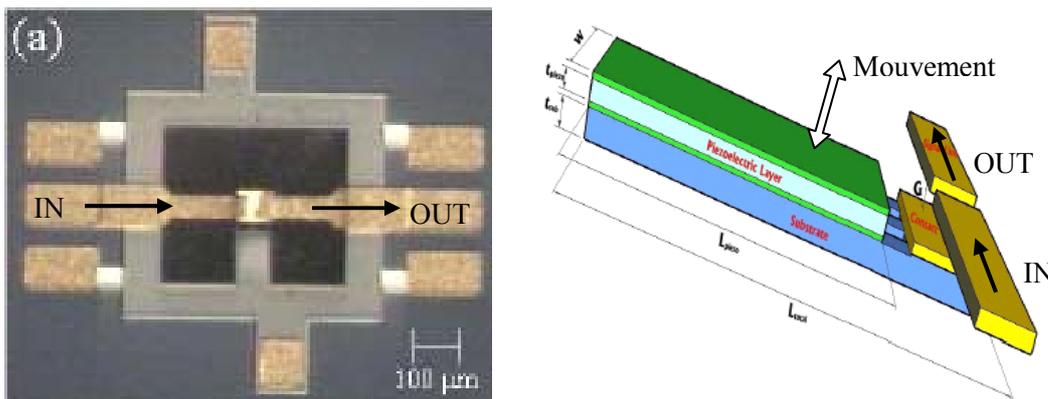


Figure I.18
A gauche : photo du micro-relais
A droite : schéma de fonctionnement

I.A.4.3 Compatibilité avec notre cahier des charges

L'actionnement piézoélectrique n'est pas encore optimisé à ce jour pour créer de grands déplacements. Malgré tout, ses points forts sont de grandes forces développées, et une alimentation qui peut être abaissée à des tensions compatibles avec les circuits électroniques courants. Il permet de plus d'avoir un effet réversible : pour passer d'un mode de compression à un mode de traction, il suffit d'inverser la tension. Ce type d'actionnement n'est cependant pas naturellement bistable.

I.A.5. Alliages à mémoire de forme

Les alliages à mémoire de forme (AMF, ou SMA en anglais pour Shape Memory Alloy) sont de plus en plus utilisés dans les micro-actionneur car les techniques de fabrication et d'intégration sont maintenant acquises et les possibilités de ces matériaux en termes de mouvement sont impressionnantes. Ces matériaux ont 'une mémoire' car lorsqu'ils ont subi une déformation plastique importante ils peuvent retrouver leur forme d'origine uniquement en les chauffant. Le principe métallurgique est assez complexe et ne sera pas expliqué ici, il est basé sur un réarrangement des atomes lors du passage d'une phase martensitique à une phase austénitique grâce au chauffage de l'alliage. La phase de chauffage est simple, par effet Joule par exemple puisque ces alliages sont conducteurs (TiNi, NiMnGa...).

I.A.5.1 Exemple d'une micro-pince [TAK00]

Ce micro-actionneur d'environ 700 x 600 μm est une pince qui se referme quand on la chauffe grâce à un courant. Elle est utilisée comme moyen de préhension autour de nerfs d'insectes afin de mesurer leur activité (Figure 19 a).

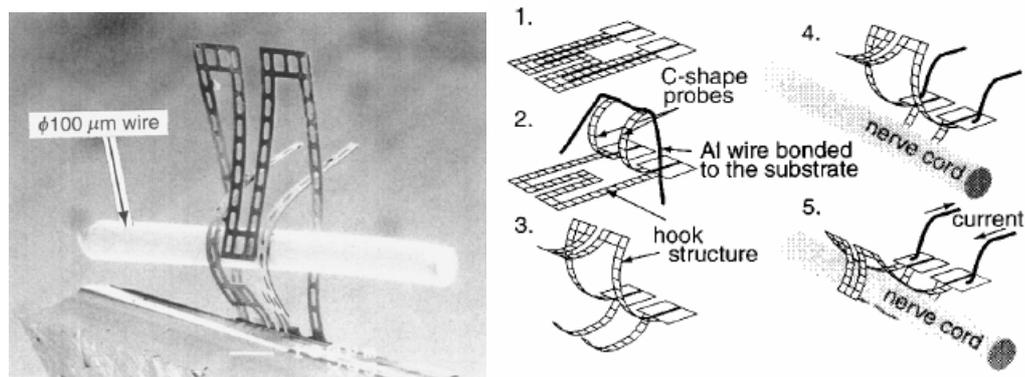


Figure 19 a et b

Un fil emprisonné dans la pince à mémoire de forme. Fabrication et mise en forme de la pince.

Le matériau (Ti-Ni à 48% Ni) est déposé sur un substrat par pulvérisation. Le substrat est ensuite enlevé sous la poutre en alliage à mémoire de forme (Figure 19 b). À chaud (lorsque le matériau est dans sa phase martensitique), deux des bras sont déformés avec un fil (2). Cette forme est celle que va ensuite vouloir reprendre la pince lorsqu'elle va être chauffée à plus de 54°C. A température ambiante, la pince est de nouveau déformée selon le schéma (3). Des fils électriques servant à chauffer la pince puis à mesurer une tension sont connectés sur les plots de la partie fixe (4). Enfin, il suffit d'envoyer du courant dans ces fils pour chauffer la pince et la refermer. Malheureusement, la réouverture n'est possible que mécaniquement (un seul sens d'actionnement).

La puissance d'actionnement est supérieure à 1 W, ce qui est très élevé, et ce pendant des temps de l'ordre de 100 ms (Figure I.20), bien trop longs pour nos applications. Bien évidemment une réduction de taille entraînerait une réduction du temps de chauffe ainsi que de la puissance.

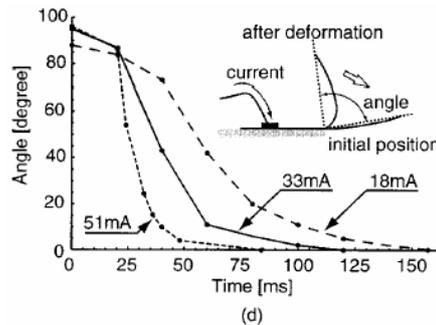


Figure I.20

Déformation angulaire en fonction du temps pour un courant donné.

I.A.5.2 Exemple d'un micro-scanner [KOH04]

Ce micro-scanner est très innovant car il allie astucieusement les propriétés de mémoire de forme et les propriétés magnétiques du Ni_2MnGa . Ce principe est appelé l'AMF magnétique (ou MSM pour Magnetic Shape Memory). Ainsi, lorsque l'actionneur est au repos (Figure I.21, (a)), la poutre ($5 \times 0,5 \times 0,01$ mm) est magnétique et dans sa phase martensitique, et elle vient donc se coller sur l'aimant afin de fermer le circuit magnétique composé de l'aimant, d'un corps en fer et de la poutre. La force magnétique est donc supérieure à la force de rappel de la poutre. Lorsqu'un courant circule dans la poutre (b), celle-ci est chauffée et atteint presque simultanément sa température de Curie et sa phase austénitique. La poutre n'est donc non seulement plus aimantée mais elle est aussi rappelée en position initiale par la force due à la mémoire de forme.

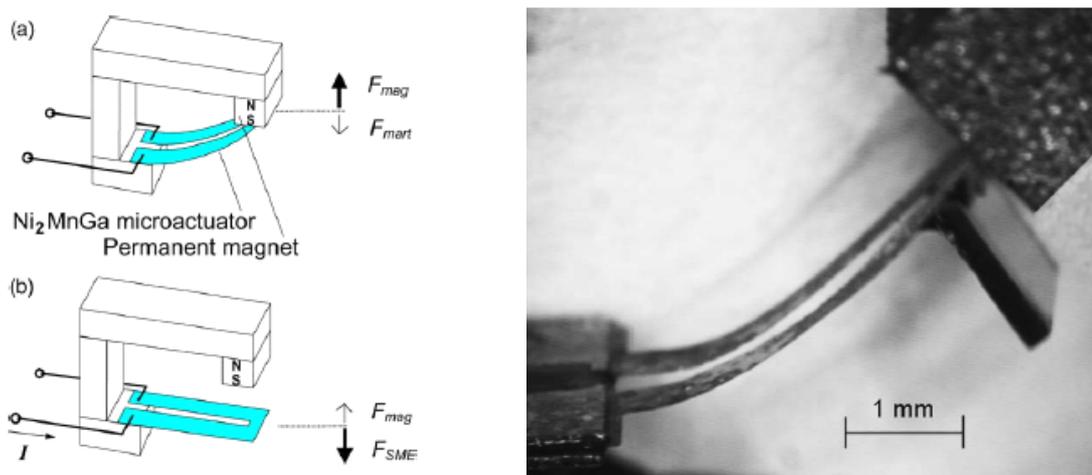


Figure I.21

Principe et photo du micro-scanner.

La Figure I.22 montre que le déplacement du bord de poutre est très grand (120° et 1,4 mm) et qu'il existe un phénomène d'hystérésis.

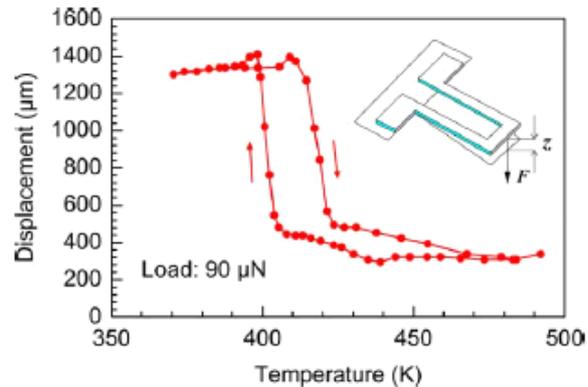


Figure I.22
Principe et photo du micro-scanner.

I.A.5.3 Compatibilité avec notre cahier des charges

Les actionneurs SMA existants sont encore relativement encombrants (> qq mm) et leur actionnement étant basé sur un principe thermique, ils sont donc plutôt lents (>> 10 ms) pour de telles dimensions. De plus la bistabilité n'est pas facile à mettre en œuvre. Mais ces micro-actionneurs sont, à mon avis, promis à un grand avenir dans de nombreux domaines comme la micro-préhension lorsque les tailles seront réduites et leur intégration sur silicium sera maîtrisée.

I.A.6. Actionnement magnétique

Parmi les nombreux types d'actionnement magnétiques possible, nous avons un certain parti pris pour des types d'interactions spécifiques, que nous allons exposer maintenant.

La partie émergée de l'iceberg des générateurs de champ magnétique sont les aimants. Tout le monde a déjà joué avec un aimant sur son frigo ou avec de la limaille de fer. L'aimant est donc le générateur de champ magnétique le plus connu. Mais un conducteur électrique est aussi un puissant générateur de champ lorsqu'il est convenablement alimenté. Les applications dans le monde macroscopique ne se comptent plus, l'industrie produira 670 000 tonnes d'aimants divers en 2005 (dont 620 000 de Ferrite et 40 000 de NdFeB, [LUO04]). Tout cela pour réaliser des moteurs et alternateurs de toutes sortes, des haut-parleurs, des fermetures de portes de frigo, des disjoncteurs magnéto-thermiques, des disques durs ou des sources pour imageurs IRM... L'utilité des éléments magnétiques n'est donc plus à prouver dans le domaine macroscopique. Et le domaine nanométrique avance à pas de géant grâce à l'arrivée prochaine des M-RAM (Magnetic Random Access Memory). Entre ces deux échelles, qu'en est-il des micro-actionneurs magnétiques?

Nous verrons que les lois de la physique sont encourageantes à petite échelle en fonction des différents types d'interactions magnétiques. Mais le magnétisme est plus complexe à mettre en œuvre

que l'électrostatique ou le thermique car il fait appel à de nombreux matériaux tels que les aimants, les matériaux doux ou les matériaux conducteurs des bobines. De ces compromis découleront les premiers avantages et inconvénients du magnétisme pour notre application.

I.A.6.1 Les effets de la réduction d'échelle : premiers avantages et inconvénients

Avant même de réfléchir à des procédés de fabrication en micro-technologies, il est intéressant d'étudier comment se comportent les lois de la physique dans le cas du magnétisme lors d'une réduction d'échelle. Les calculs suivants sont décrits en détail dans [CUG02] et [DEL04].

Interaction entre aimant et conducteur:

Voici la réflexion qui a conduit à ces résultats avec l'exemple de l'interaction aimant-conducteur (Figure I.23).

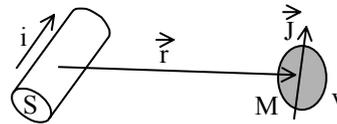


Figure I.23
Interaction entre volumes élémentaires de conducteur et d'aimant.

La loi de Biot et Savart nous donne le champ magnétique à une distance r d'un conducteur de surface S et de longueur dl dans lequel circule une densité de courant δ .

$$\vec{H}(M) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\delta \cdot S \cdot d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

Equ I.3

Loi de Biot et Savart

Réduisons alors les dimensions de ce système électromagnétique d'un facteur $k > 1$ (en incluant la distance aimant-conducteur) et en gardant constante l'ensemble des propriétés physiques. Les variables deviennent alors :

$$\vec{r}' = \frac{\vec{r}}{k} \quad v' = \frac{v}{k^3}$$

et le champ magnétique H' devient alors:

$$\vec{H}'(M') = \frac{\vec{H}(M)}{k}$$

Si nous considérons l'aimant de volume v et d'aimantation J placé (au point M) dans le champ magnétique H créé par le conducteur, la force magnétique du conducteur sur l'aimant est obtenue par dérivation de leur énergie magnétique d'interaction :

$$W_i = -\vec{J} \cdot \vec{v} \cdot \vec{H}$$

$$\vec{F} = -\text{grad} W_i$$

L'énergie est divisée par un facteur k^4 et la force par un facteur k^3 :

$$\vec{F}' = \frac{\vec{F}}{k^3}$$

La masse ou le volume de l'aimant étant également divisés par k^3 , la force massique ou volumique reste donc inchangée :

$$\frac{\vec{F}'}{m'} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Ainsi, une réduction d'échelle n'est pas défavorable aux interactions entre les aimants et les conducteurs. Bien entendu en considérant l'action réciproque d'un aimant sur un conducteur (force de Laplace) on obtient des résultats identiques. **Tous les actionneurs magnétiques classiques à aimant sans fer (haut parleur par exemple) qui sont efficaces à notre échelle le restent donc lorsqu'on réduit leurs dimensions.**

Cette constatation semble à première vue neutre. Neutre, sauf si... le miracle des microtechnologies nous permet d'augmenter considérablement les densités de courant (multiplication des densités pouvant aller jusqu'à un facteur 10000 !) sans que le conducteur ne se détériore : nous verrons dans le chapitre III sur l'étude thermique que c'est bien le cas, principalement parce qu'un petit conducteur peut dissiper sa chaleur par conduction dans un substrat en silicium massif, et que de plus le rapport surface (dissipant la chaleur) sur volume (générant la chaleur) augmente aux petites dimensions.

Interaction entre deux aimants:

Afin de déterminer l'évolution de la force massique entre deux aimants lors d'une réduction d'échelle, commençons par étudier l'évolution du champ généré par un aimant. Un aimant ponctuel de volume v et de polarisation \vec{J}_1 crée un potentiel scalaire V en un point M :

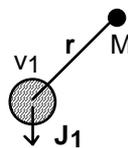


Figure I.24
Champ magnétique d'un aimant en un point M.

$$V(M) = \frac{v}{4\pi\mu_0} \frac{\vec{J}_1 \cdot \vec{r}}{r^3}$$

Equ. I.4
Loi de Biot et Savart

Suite à une homothétie de rapport $k > 1$, la distance r et le volume v sont modifiés :

$$\vec{r}' = \frac{\vec{r}}{k} \qquad v' = \frac{v}{k^3}$$

Le nouveau potentiel scalaire V_1' est donc proportionnel au rapport de l'homothétie :

$$V'(M') = \frac{V(M)}{k}$$

Le champ magnétique est obtenu en prenant le gradient du potentiel scalaire. Le gradient étant une dérivée par rapport aux distances, on peut en déduire que le champ magnétique H' à une distance r/k après homothétie est égal au champ initial H à une distance r :

$$\vec{H}'(M') = \vec{H}(M)$$

Suite à une réduction d'échelle la distribution du champ magnétique autour d'un aimant n'est donc pas modifiée. Si l'on observe les images des cartes de champ avant et après réduction, nous obtenons les mêmes cartographies au facteur d'échelle près.

Plaçons maintenant un dipôle d'aimantation \vec{J}_2 dans le champ créé par un aimant. La force magnétique \vec{F}_{12} est obtenue en dérivant l'énergie d'interaction W_i :

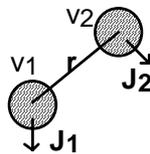


Figure I.25
Interactions entre deux dipôles

$$W_i = -\vec{J}_2 \cdot v_2 \cdot \vec{H}_1$$

$$\vec{F}_{12} = -\overrightarrow{\text{grad}} W_i$$

Equ. I.5
Calcul de l'énergie et de la force

On en déduit que l'énergie d'interaction est divisée par k^3 et que la force est divisée k^2 :

$$\vec{F}'_{12} = \frac{\vec{F}_{12}}{k^2}$$

Mais si l'on s'intéresse aux forces massiques, on voit alors que ce rapport est proportionnel à k ! :

$$m' = \frac{m}{k^3} \Rightarrow \frac{\vec{F}'_{12}}{m'} = k \cdot \frac{\vec{F}_{12}}{m}$$

La réduction d'échelle entraîne donc une augmentation des forces massiques d'interaction entre aimants, inversement proportionnelle au coefficient d'homothétie.

Interaction entre aimant et matériaux doux:

Soit un matériaux magnétique doux placé dans un champ créé par un aimant. Suite à une homothétie du système ce matériau doux voit toujours le même champ. Comme son aimantation dépend du champ qui lui est appliqué, elle reste donc inchangée. On se trouve alors avec deux matériaux magnétiques en interaction et dont les aimantations sont les mêmes avant et après réduction. Nous nous retrouvons donc avec une loi d'évolution identique au cas Aimant/Aimant, c'est-à-dire que lors d'une réduction d'échelle le comportement d'un système Aimant/Fer aura le même comportement qu'un système Aimant/Aimant, à savoir une augmentation relative des interactions massiques.

Autres interaction magnétiques:

Une approche équivalente a été menée dans [CUG02] pour les autres types d'interactions magnétiques (induction...). Les effets d'une réduction d'échelle sur les forces massiques ou volumiques sont résumés dans le tableau I.1 suivant, qui tient compte de l'avantage supplémentaire que l'on peut augmenter les densités de courant d'un facteur k_i qui croît avec la réduction des dimensions (voir plus haut et également Chapitre III) :

Réduction d'échelle $1/k$	aimant 	courant 	fer 	induction 
aimant 	$\times k$ 	$\times k_i$ 	$\times k$ 	$/k$ \times vitesse 
courant 	$\times k_i$ 	$\times k_{i1} \times k_{i2} / k$ 	$\times k_i / k$ 	$\times k_i / k^2$ \times vitesse 

Tableau I.1

Effets d'une réduction d'échelle de facteur $k > 1$ sur les interactions magnétiques, en tenant compte de l'augmentation k_i des densités de courant admissibles.

Comme on vient de l'expliquer, les interactions massiques ou volumiques entre aimants sont d'autant plus fortes que l'on réduit les dimensions. Les aimants doivent donc tenir une place

privilegiée dans les futurs MAGMAS (MAGnetic Micro-Actuators and Systems) ou actionneurs magnétiques. Ils sont très intéressants car ils peuvent créer des interactions attractives ou répulsives entre eux, et sont un réservoir d'énergie permanente garantissant la bistabilité par exemple.

De plus, un conducteur sera tout aussi efficace sur un aimant si on réduit les dimensions du système, et ce type d'actionneur marche déjà très bien à l'échelle macroscopique dans les moteurs électriques et les haut-parleurs par exemple. Comme on verra plus loin on peut augmenter considérablement les densités de courant dans les conducteurs microniques, et par conséquent les interactions entre aimant et courant peuvent devenir très puissantes.

Dans ce paysage, la grande déception provient des interactions entre courant et fer ou courant et courant. A moins d'augmenter très fortement la densité de courant, il vaut mieux éviter ce genre d'interaction. Si l'on a besoin de fer, il est donc conseillé de l'utiliser en couplage avec un aimant, pour en canaliser le flux par exemple. Le fer a toutefois l'avantage d'avoir une saturation élevée ($> 2,2$ T) et d'être très facilement intégrable en μ -système (sous la forme de FeNi par exemple, avec une aimantation à saturation plus faible toutefois).

Donc, si nous avons besoin d'utiliser du courant pour actionner une partie mobile, c'est ce courant (avec les propriétés de l'aimant) qui va déterminer en partie la grandeur des forces. Mais lorsque le courant augmente, la température du conducteur augmente à cause de la résistivité du matériau (souvent du cuivre) et la résistivité augmente avec la température, il y a donc un emballement thermique... En conséquence, il y a un risque de détérioration des conducteurs ou des éléments avoisinants à cause de la température. Ainsi une étude thermique du système s'impose, et elle est menée au chapitre III.

Mise en œuvre de la modélisation

Le second problème est la modélisation et la simulation du micro-actionneur dans son ensemble. En effet, le magnétisme fait appel à des équations complexes et difficiles à résoudre analytiquement. Comme dans tout problème physique, les principales difficultés sont la résolution d'intégrales triples, produits vectoriels... Et les calculs deviennent rapidement très longs si la programmation a été mal optimisée. De plus, à ce jour, il n'y a pas de logiciel commercialisé pour résoudre efficacement et rapidement des problèmes de magnétisme couplés à de la mécanique (déplacement d'une partie mobile). Le calcul analytique reste possible pour des interactions entre des aimants ou des courants mais l'adjonction de fer (non linéaire) au système rend le calcul lourd et compliqué. Il faut alors faire appel à des solutions numériques type 'Elément Finis', ce qui augmente encore les temps de simulation. Avec les puissances de calcul actuelles, les temps restent acceptables pour une simulation unique mais sont incompatibles avec des processus d'optimisation itératifs ou des simulations de mouvements, lorsque l'on doit analyser le comportement d'une série de géométries différentes.

I.A.6.2 Exemples

Les premiers micro-actionneurs magnétiques sont apparus au début des années 1990 notamment dans le domaine des micro-relais ([HOS94]). Aujourd'hui, les rares applications sont des commutateurs optiques, des micro-relais électriques, des micro-générateurs et des micro-moteurs magnétiques. Cette partie présente un état de l'art non exhaustif des différents micro-actionneurs magnétiques existants classés par types d'application.

I.A.6.2.1 Les commutateurs optiques

➤ Commutation par basculement d'une poutre : [MAT00]

Cet actionneur se fonde sur une poutre ayant une extrémité libre et l'autre encastree, aussi appelée *cantilever*. Cette poutre est magnétique. La bistabilité est assurée par des aimants qui maintiennent la poutre magnétique en haut ou en bas. L'avantage est de pouvoir obtenir de grands déplacements de la partie libre (poutre souple) et d'avoir un effet ressort, c'est-à-dire un retour en position initiale sans consommation de courant. L'inconvénient est la très grande taille des cantilevers et l'énergie à fournir pour bouger le ressort. Dans le cas présenté la poutre fait 10 mm de long pour 180 μm de large et 50 μm d'épaisseur (Figure I.26). Un miroir est micro-usiné en Si en même temps que la poutre à son extrémité. Une couche de FeNi (5 μm) est déposée sous la poutre, au niveau de l'aimant (*Magnetic film*). L'actionnement de la poutre est réalisé par une bobine de 280 tours de fil et de 80 μm de diamètre, qui attire la partie magnétique de la poutre. Afin que les positions stables (haute et basse) ne demandent aucune consommation de courant, deux aimants sont placés au-dessus et au-dessous (dans le circuit magnétique) de l'actionneur. C'est-à-dire que lorsque la poutre est en bas, elle est maintenue par l'aimant du bas. Pour faire remonter la poutre, il faut annuler le champ magnétique de l'aimant inférieur grâce à la bobine. Et l'aimant supérieur rappelle et maintient alors la poutre bien en place lui évitant de vibrer. Ces aimants, tout comme la bobine, sont des éléments rapportés après la fabrication du système en salle blanche.

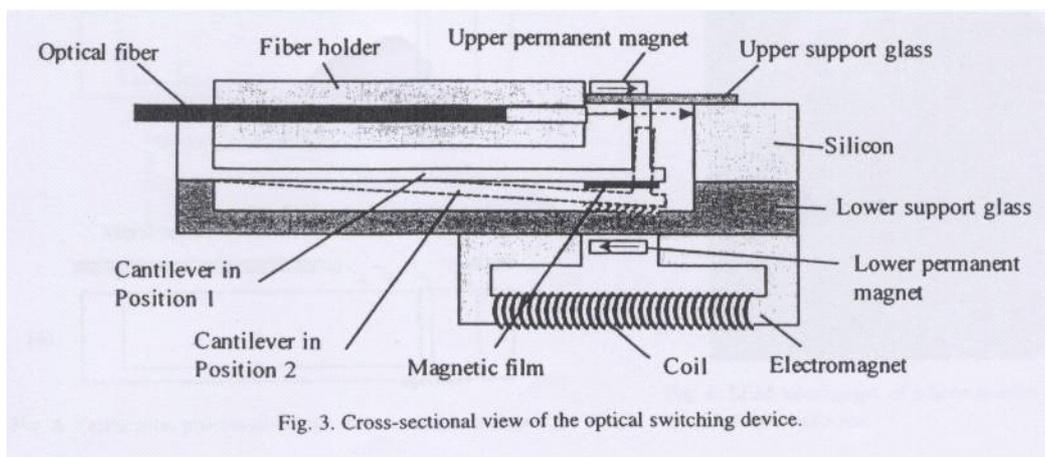


Figure I.26
Schéma du dispositif

Cet actionneur a besoin au minimum de 34 mA (0,3 V et 10 mW) pour commuter, soit un équivalent de 9,5 ampères. Le temps de commutation est alors de 20 ms pour un déplacement voisin de 200 μm .

Cet exemple montre que le problème de bistabilité peut être facilement résolu grâce aux aimants. De plus le courant est faible car le micro-actionneur utilise une bobine. Mais l'énergie de commutation reste importante (200 μJ) et le temps de commutation trop long. Le déplacement est très grand mais ce n'est pas vraiment un micro-actionneur car la poutre fait 10 mm de long! Enfin, le système demande des pièces rapportées (bobine, aimants).

➤ Commutation hybride par torsion d'une poutre actionnée magnétiquement : [YOU01]

Cet actionneur combine les avantages de l'électrostatique et du magnétisme. La partie mobile ($100 \times 100 \times 10 \mu\text{m}^3$) est fabriquée dans le plan du substrat et des plots en FeNi sont déposés par électrolyse sur les côtés (figure I.27). On voit ici un seul des nombreux miroirs de la matrice.

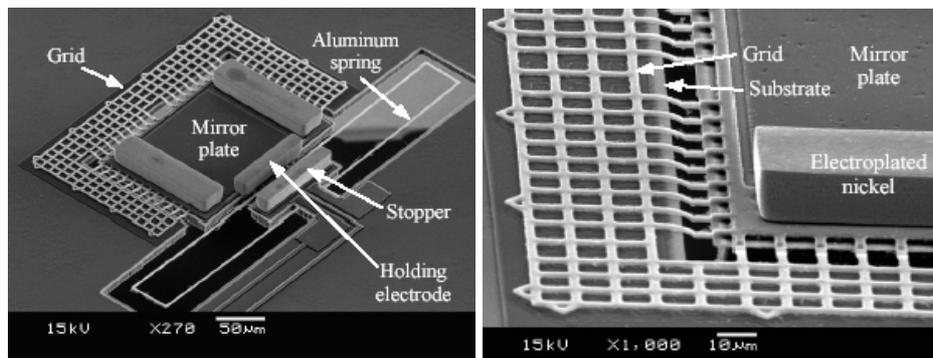


Figure I.27 :

(a) le système complet, (b) gros plan sur la grille de maintien "au sol".

Aluminium spring : ressort de maintien en Al ; *Mirror plate* : miroir

Holding electrode : électrode de maintien en position haute du miroir ; *Grid* : Grille

Lorsqu'un champ magnétique global est appliqué perpendiculairement au substrat à tous les miroirs à la fois pour les redresser, les miroirs qui doivent rester 'couchés' sont retenus contre le substrat par une grille à laquelle on applique 20 V et qui permet de créer une force de maintien. Pour que la partie mobile vienne en position haute, il suffit de supprimer la tension de verrouillage : les plots magnétiques s'alignent alors dans le champ et entraînent le miroir vers le haut, celui-ci se redresse jusqu'à 85° avec un champ de 6000 A/m (Figure I.28 (b)).

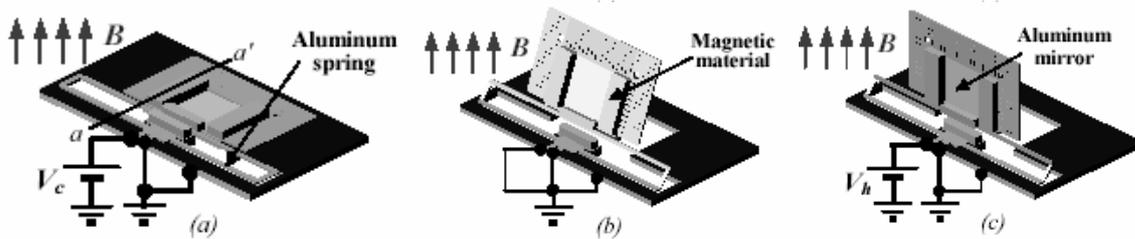


Figure I.28 :

(a): verrouillage bas électrostatique, (b) : actionnement magnétique, (c): verrouillage haut électrostatique

Le miroir est guidé et maintenu par des charnières souples en aluminium visibles Figure I.28 (a). Pour vaincre la torsion de la charnière en aluminium et arriver à 90° il faut appliquer une tension sur les électrodes de maintien (Figure I.28 (c)). On peut alors supprimer le champ magnétique extérieur. Pour réinitialiser un actionneur, il faut arrêter la source de champ magnétique et couper la tension de maintien. Le miroir revient alors en position basse grâce au ressort en aluminium. Les autres miroirs, qui ont été commandés par la même bobine, restent en position haute car ils subissent toujours les forces électrostatiques de blocage.

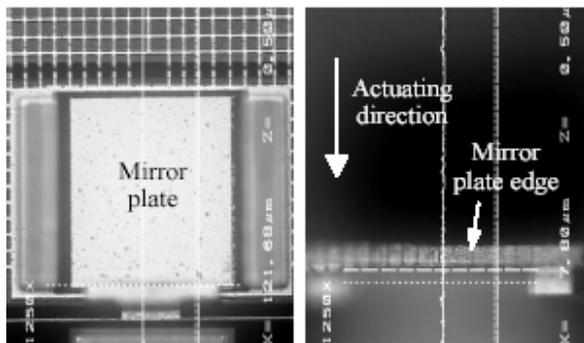


Figure I.29 :

A gauche : miroir en position verrouillée basse
A droite : miroir en position verrouillée haute

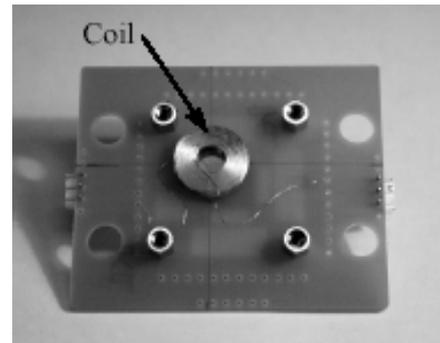


Figure I.30 :

Dispositif complet vu de dessous (62 x 52 mm)
Bobine "globale" $\varnothing 15,2$ mm x H 3 mm

L'assemblage de ce premier prototype élégant est un peu volumineux comme le montre la Figure I.30, principalement à cause de la bobine rapportée qui crée le champ global. Malheureusement l'article n'indique pas le temps de commutation ni la consommation de ce MEMS magnétique hybride. Ce micro-actionneur propose une solution hybride élégante car la partie mobile se déplace efficacement sur une grande distance grâce à un actionnement magnétique, et est maintenue dans ses positions stables grâce à un effet électrostatique peu consommateur d'énergie.

➤ Commutateur par déplacement de la fibre optique : [FIS01]

Une alternative au déplacement de miroirs peut être de déplacer directement la fibre optique émettrice devant la fibre optique réceptrice choisie. On pense immédiatement aux problèmes de précision d'alignement des fibres et aux forces élevées qu'il va falloir développer pour bouger et

fléchir les fibres. C'est pourtant ce qu'ont réalisé des chercheurs de l'université du Wisconsin en 2001. Le principe repose sur la fermeture d'un circuit magnétique comme le montrent les figures I.31 et I.32.

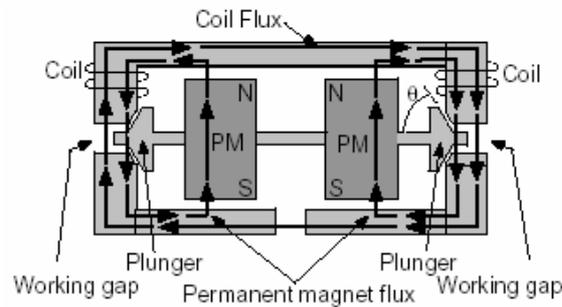


Figure I.31

Schéma du double circuit magnétique bistable à aimants permanents (avec bobines symbolisées)

Les deux aimants permanents (*PM*) créent deux boucles de flux magnétiques en sens opposés (flèches courtes), qui tendent à se refermer dans leurs entrefers respectifs. Le système est ainsi bistable car l'élément mobile (*plunger*) doit être en butée gauche ou droite. Le fait d'alimenter les bobines (*coil*) dans un sens ou dans l'autre va créer une boucle de flux magnétique supplémentaire dans tout le circuit en fer doux (grandes flèches) qui va augmenter le flux d'une boucle d'un aimant et diminuer le flux de l'autre boucle d'aimant. Un déséquilibre des forces va ainsi être créé au niveau des entrefers (*working gap*) et la partie mobile (*plunger*) (qui est reliée à la fibre optique) va commuter, guidée dans son déplacement par des poutres souples (*folded beam spring*) (Figure I.33).

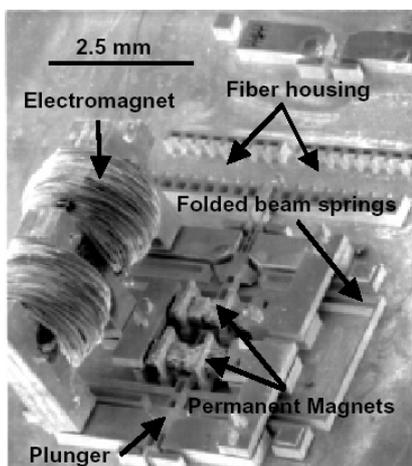


Figure I.32

Photo de l'ensemble du montage (sans les fibres optiques)

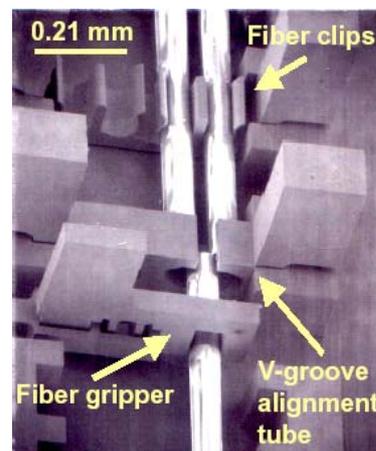


Figure I.33

Zoom sur la "connexion" des fibres (*fiber housing* sur la Figure I.32) : la fibre venant du bas commute entre les deux fibres du haut.

Cependant, comme le présente la Figure I.32, l'actionneur n'est pas entièrement issu des microtechnologies. Ses différents éléments ont été μ -fabriqués puis assemblés séparément. Par exemple, les circuits magnétiques sont réalisés par électroformage de FeNi, et le dispositif de

préhension des fibres optiques par LIGA. Les aimants sont quant à eux découpés unitairement par micro-électroérosion dans du néodyme-fer-bore massif. Chaque bobine mesure environ 2,5 mm de long et comporte 2000 tours : un excellent travail de bobinage, similaire aux moteurs de montres-bracelets.

Le courant optimum pour commuter (déplacement estimé à 100-150 μm) a été mesuré à 7,5 mA (11 mW, 25 μJ) pour un temps de commutation de 2,21 ms et des forces supérieures à 50 mN, ce qui constitue de très bonnes performances se rapprochant de nos besoins. Cependant l'ensemble mesure tout de même environ 6 mm x 6 mm.

Cette application nous montre les limites de la miniaturisation qui permet de construire des actionneurs complexes pour des dimensions millimétriques, avec une forte implication de l'assemblage manuel. Il n'est pas pratique de faire plus petit sans changer de méthode de fabrication, sans faire appel aux microtechnologies 'tout intégré'.

I.A.6.2.2 Les micro-relais électriques

La plupart des relais macroscopiques sont déjà électromagnétiques (système bobine-fer-aimant...). La première idée venant à l'esprit est donc de réduire les relais existants. Plus petits, ils deviennent à priori moins consommateurs de courant et plus rapides. Malheureusement il n'y a aucune ressemblance entre la construction mécanique classique et les procédés de micro-fabrication. Réduire un relais existant par les méthodes classiques, c'est augmenter exponentiellement son coût. Il a donc fallu réinventer la géométrie du relais électrique, et cela fait plus de 10 ans que les laboratoires font des recherches dans ce domaine. Aujourd'hui les applications potentielles sont dans les téléphones portables, les relais de puissance... partout où l'on a peu de place et où l'on a besoin de commuter rapidement (< ms). Nous allons ainsi voir quelques exemples de micro-relais à actionnement électromagnétique.

➤ Micro-relais magnétique rapide et à faible déplacement : [WRI98]

Ce micro-relais planaire est entièrement intégré (figure I.34). Il a une structure basique: un 'U' en matériau magnétique (FeNi) associé à une bobine qui crée un flux magnétique (figure I.35). Lorsque la bobine est alimentée, le flux circule dans le circuit en U et crée un champ dans l'entrefer, où est alors stockée de l'énergie magnétique. La poutre flexible subit une force pour réduire l'énergie dans cet entrefer et donc pour refermer le circuit. En fléchissant, elle vient fermer deux contacts et fermer ainsi le relais (figure I.36). Notons que ce relais n'est pas bistable : si le courant est coupé, la poutre reprend sa position naturelle et le contact s'ouvre.

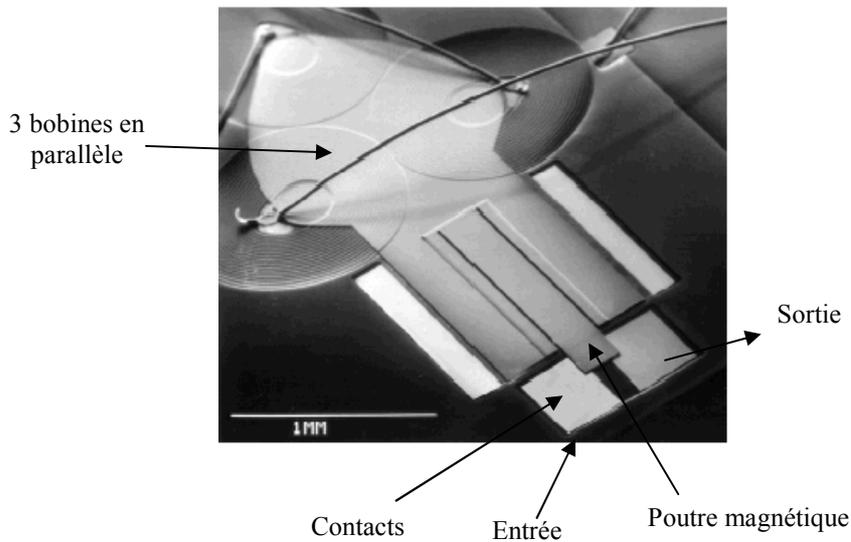
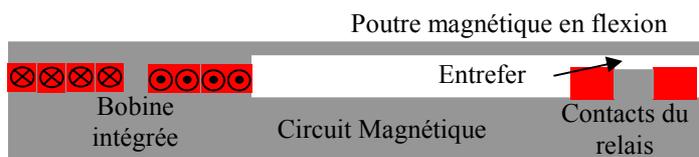
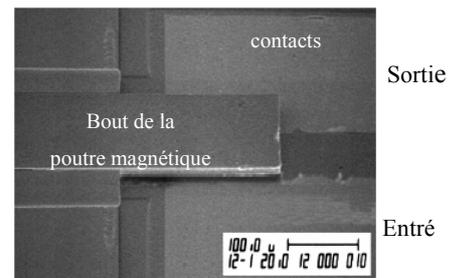


Figure I.34: Micro relais: vue de la puce

Figure I.34
Principe magnétique du circuit en UFigure I.35
Zoom sur la poutre et les contacts

Pour une poutre de $500\ \mu\text{m}$ de long, $200\ \mu\text{m}$ de large et $10\ \mu\text{m}$ d'épais, il faut $80\ \text{mA}$ ($320\ \text{mW}$) pour commuter sur un déplacement de $5\ \mu\text{m}$, et ce courant doit être maintenu pour que la poutre reste fléchie. Les forces en jeu sont de l'ordre de $100\text{-}200\ \mu\text{N}$ et le temps de commutation inférieur à $15\ \mu\text{s}$. Ces forces importantes permettent d'obtenir une faible résistance de contact ($25\ \text{m}\Omega$). L'actionneur a une durée de vie de 10^4 à 10^6 de cycle avec un courant de $500\ \text{mA}$ commuté. La puce est assez petite ($8\ \text{mm}^2$) et le dispositif est entièrement intégré, mais l'entrefer est trop faible pour nos besoins.

➤ Le MagLatch (U.S.A / France, 2002) : [MIC02]

Voici la première réalisation industrielle en matière de micro-relais magnétique. Son fonctionnement est basé sur une poutre rigide (*cantilever* sur la Figure I.36) qui bascule autour d'un ressort de torsion (*torsion flexure*, Figure I.37). Cette poutre (en FeNi) réagit aux champs magnétiques combinés exercés par un aimant permanent et une double bobine planaire.

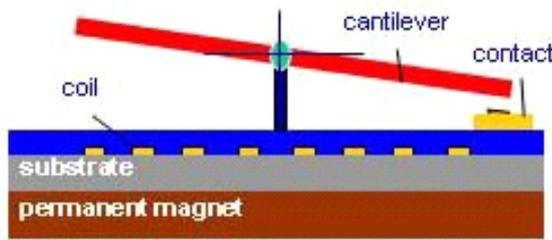


Figure I.36
Schéma en coupe

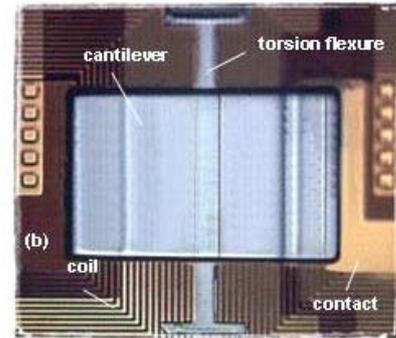


Figure I.37
Photo du dispositif vu du dessus

Une impulsion de courant dans la bobine crée un champ parallèle au substrat qui change le sens de l'aimantation induite dans la poutre: celle-ci subit alors un couple pour s'aligner dans le champ de l'aimant fixe (qui est perpendiculaire au substrat). La poutre bascule alors dans un sens ou dans un autre, et ouvre ou ferme le contact. L'avantage du principe est qu'il est bistable : la poutre reste en position sans apport de courant puisque l'aimant permanent maintient en même temps son champ perpendiculaire au substrat mais aussi la composante longitudinale de l'aimantation dans la poutre. Les performances de ce relais sont très bonnes : commutation en $100 \mu\text{s}$ avec $50 \mu\text{J}$ ($<100 \text{ mA}$, $<5 \text{ V}$) pour un déplacement d'environ 10 à $20 \mu\text{m}$. La taille de la puce est inférieure à $3 \times 3 \text{ mm}^2$. La résistance de contact est de l'ordre de $50 \text{ m}\Omega$ pour les meilleurs résultats ($0,5 \Omega$ garanti ...). Les spécifications ne précisent pas la valeur des forces de contact mais la poutre travaille au maximum de son couple de torsion (champ magnétique extérieur perpendiculaire au champ de l'aimant).

➤ Micro-relais horizontal, bistable à lévitation magnétique : [DIE04] et [DEL01]

Voici le relais magnétique MAMBA totalement intégré qui a été conçu au LEG (Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble) et réalisé au CEA-LETI Grenoble dans le laboratoire LCMI (Laboratoire des Composants Magnétiques Intégrés). Un aimant mobile (Figure I.38) est libre de se déplacer (sans contact mécanique) entre deux groupes de deux aimants fixes. Les 3 aimantations sont colinéaires. L'actionneur est bistable : l'aimant mobile est calé soit à gauche, soit à droite. La commutation est assurée par une impulsion de courant (Figure I.39) dans des conducteurs placés aux extrémités de l'aimant mobile ; il se crée ainsi une force qui fait basculer l'équilibre des forces et permet à l'aimant mobile de changer de position (Figure I.41). En fendant chaque aimant fixe, on crée deux bornes d'un circuit électrique à fermer (Figure I.40). La difficulté majeure pour réussir à fabriquer ce micro relais est le dépôt électrolytique des aimants en CoPt et leur libération. Mais les caractéristiques de ce relais sont prometteuses. Avec une aimantation rémanente relativement faible de $0,3 \text{ T}$, nous observons un temps de commutation de $30 \mu\text{s}$ pour $5 \mu\text{m}$ de déplacement. L'énergie nécessaire à l'actionnement est de $10 \mu\text{J}$ sous $0,2 \text{ V}$ (3 A) pour une géométrie non optimisée. Il est

intéressant de faire fonctionner ce relais avec du courant pulsé, ainsi la puissance moyenne avec une commutation de 1 kHz est de 6,5 mW à comparer avec les 14 à 20 mW des actionneurs non bistables vus plus haut. La puissance instantanée (300 mW, 3 A pendant 30 μ s par commutation) est aussi à comparer avec les 500 mW du MagLatch.

Ce micro-actionneur fonctionne déjà et sa transformation en relais électrique est toujours en cours de développement : on ne connaît donc pas pour le moment les propriétés des contacts électriques ni son comportement en fatigue. Les études complémentaires visent à réduire le temps de commutation à moins de 1 μ s et à réduire le courant instantané nécessaire à moins de 1 A (soit 0,2 μ J par impulsion de courant, 200 mW instantané).

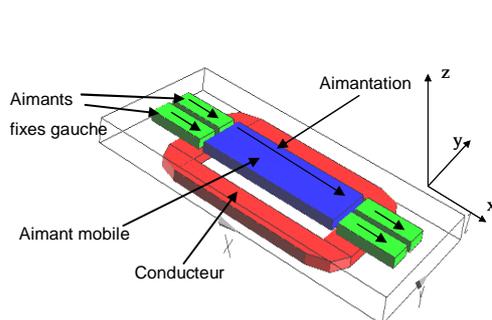


Figure I.38
Schéma du dispositif

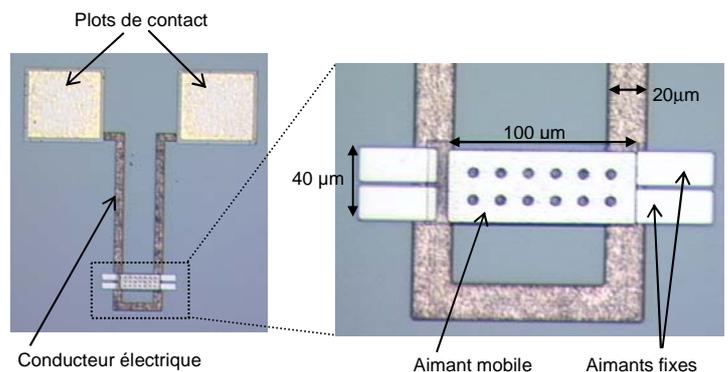


Figure I.39
Photo du dispositif fonctionnel

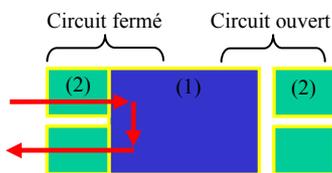
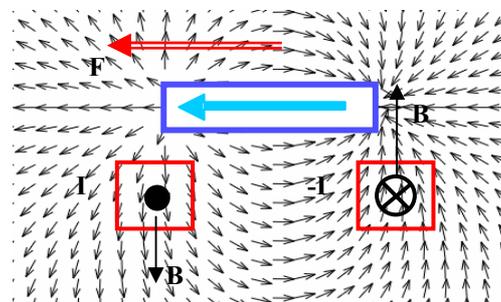


Figure I.40
Principe du relais avec aimants fixes dédoublés.



Les conducteurs noyés dans un champ B et traversés par un courant I et $-I$ subissent une force de Laplace $-F$ et induisent donc une réaction $+F$ sur l'aimant mobile.

➤ Actionnement Thermo-magnétique

Certains matériaux acquièrent ou perdent leurs propriétés magnétiques en fonction de la température. Pourquoi ne pas en profiter ? On sait que chauffer un micro-élément peut être rapide. Son refroidissement peut être tout aussi rapide car la chaleur peut se dissiper dans le substrat silicium ou dans les conducteurs de courant qui sont des bons conducteurs thermiques. Une étude a été menée au LEG sur ce sujet [BREZ03]. Son principe est le même que le micro-relais précédent (Figure I.42) :

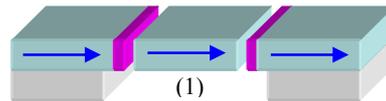


Figure I.42
Actionnement thermique du micro-relais.
Les flèches représentent l'aimantation des aimants permanents.
Les parties sombres sont les butées magnétothermiques.

Si l'aimant mobile (1) est à gauche, il ne bouge pas car l'aimant de gauche l'attire et la partie magnétothermique (en sombre) est magnétique. En faisant chauffer (par effet Joule par exemple) la partie magnétothermique de gauche, le matériau perd ses propriétés magnétiques et ainsi l'aimant mobile est attiré par l'aimant fixe de droite et la couche magnétothermique de droite qui est restée froide (et donc magnétique). Ainsi il y a commutation de la partie mobile.

L'effet opposé a été étudié: le Fer-Rhodium devient magnétique lorsqu'il est chauffé. Les premiers calculs ont montré qu'il est possible de commuter légèrement moins vite et avec un peu moins d'énergie qu'électromagnétiquement.

Il s'agit là encore d'une solution hybride permettant d'obtenir les avantages de plusieurs types d'actionnement. Le couplage du magnétisme et du déclenchement thermique, permet d'utiliser un faible volume de matériau magnéto-thermique par rapport à celui du système complet. L'énergie de commutation ainsi que les temps de commutation sont fortement réduits par rapport à un actionneur thermique plus conventionnel. Ce type d'hybridation permet aussi d'imaginer des actionneurs plus compacts que ceux réalisés sur le principe du bilame.

I.A.6.2.3 Micro-scanner magnétique :

➤ Micro scanner magnétique : [CHO03]

La miniaturisation de scanners optiques (scanner rétinien par exemple) requiert des grands déplacements et des tensions de commande élevées. Deux laboratoires américains ont créé un micro scanner magnétique de taille millimétrique actionné par une bobine et un noyau en fer. Sur la Figure I.43, le miroir micro-usiné en Si est maintenu par un ressort de torsion (poutre en silicium). Le mouvement de bascule du miroir est assuré par la bobine et son noyau en fer qui interagit avec un aimant permanent déposé sous la partie mobile. L'actionnement est donc bidirectionnel et l'extrémité du miroir se déplace de 70 μm (force de l'ordre de 50 μN). L'usage normal du système se fait à la résonance, qui est ici de 90 Hz pour une consommation moyenne de 63 mW.

Les figures I.44 et I.45 montrent la taille du dispositif, hybride et relativement encombrant pour notre application.

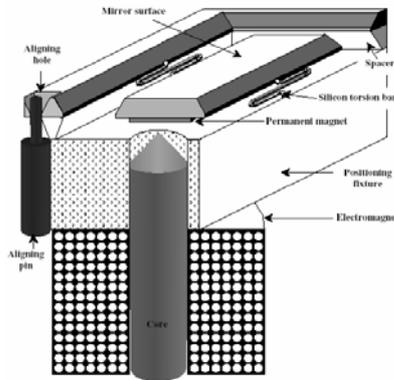


Figure I.43

Schéma de principe du scanner

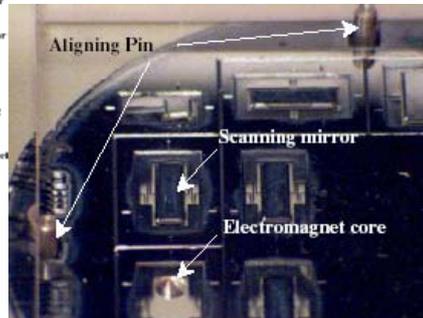


Figure I.44

Plusieurs scanners sur un substrat Silicium

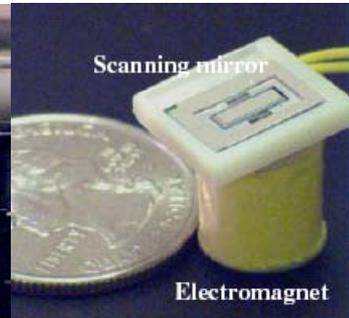


Figure I.45

Photo du micro-scanner

➤ Scanner d'aide à la vision : [YAN04]

Ce scanner 2D (Figure I.46) est développé et produit par la société Microvision pour des applications civiles (aide à la réparation de véhicule Honda) ou militaires (guidage). La qualité de l'image est de type SVGA monochrome.

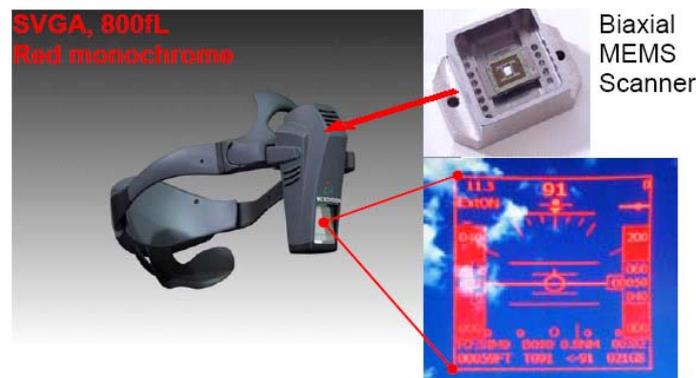


Figure I.46
Photos du Nomad™

Son principe est hybride: il est fondé sur un actionnement électrostatique pour le balayage horizontal et sur un actionnement magnétique pour le balayage vertical. La partie magnétique est composée de deux aimants fixes en NdFeB (Figure I.47) qui créent un champ magnétique constant B_x

entre eux. Des conducteurs placés sur le scanner vertical, sont alimentés en courant afin de créer des forces de Laplace qui font bouger le scanner. La consommation électrique est d'environ 200 mW.

L'un des défauts est que les aimants représentent la majeure partie du volume du système monté.

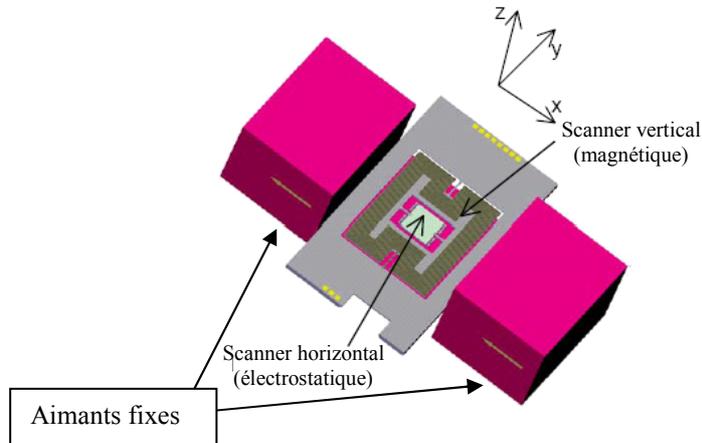


Figure I.47
Schéma de l'actionnement hybride magnétique et électrostatique

I.A.6.3 Compatibilité avec notre cahier des charges

Nous avons fait un petit tour dans le monde des micro-actionneurs magnétiques (MAGMAS). Il n'en existe aujourd'hui qu'un petit nombre et les applications visées sont les relais et les commutateurs optiques.

Tout d'abord nous constatons que notre premier objectif est facilement réalisable : en effet la bistabilité peut être obtenue grâce à des aimants.

Même si un déplacement de plus de 100 μm semble réaliste mais difficile à mettre en oeuvre à ce stade de la conception, on peut quand même remarquer que les déplacements sont en général importants avec des actionneurs magnétiques. Il n'est pas non plus nécessaire qu'il y ait une liaison mécanique entre la partie mobile et la partie qui crée le mouvement (bobine...) car le guidage peut être obtenu directement par le champ magnétique généré. Ceci peut être un atout pour réaliser des grands déplacements sans perdre d'énergie dans la flexion d'une poutre. La consommation d'énergie dépendra essentiellement de la structure et des matériaux choisis et l'on a vu qu'il est réaliste d'espérer une consommation de 10 à 100 μJ par commutation. Il faudra faire une étude d'optimisation afin d'essayer de la diminuer encore.

I.A.6.4 Conclusion et choix d'un principe

Au cours de ce chapitre nous avons vu les différents principes physiques d'actionnement envisageables. Une comparaison entre les différents moyens est résumée dans le Tab I.2. Les signes '+' et '-' indiquent si un type d'actionnement est plus ou moins indiqué qu'un autre pour satisfaire une

des conditions du cahier des charges. Malheureusement aucun des actionnements ne correspond vraiment à notre cahier des charges, mais certains semblent plus propices que d'autres. Ainsi notre micro-actionneur pourrait être réalisé de différentes manières ; les solutions magnétiques développées dans notre équipe peuvent à priori satisfaire nos besoins.

	Bistabilité	Déplacement (gap)	Encombrement	Vitesse	Energie de commutation	Alimentation	Réalisation
Electrostatique	-	-	-	+	++	-	++
Thermique	-	-	-	-	-	+	+
Piezoélectrique	-	-	-	+	++	++	-
AMF	-	++	--	-	-	-	-
Magnétique	++	++	+	+	-	-	-

Tab I.2
Résumé comparatif des différents types d'actionnement

L'actionnement électrostatique a pour principales qualités sa faible énergie de commutation et le peu d'énergie nécessaire au maintien de la partie mobile en position stable (aux fuites de courant près). De plus ces actionneurs sont rapides (dans le cadre d'un actionnement direct) et leur réalisation est maîtrisée et compatible avec la microélectronique. Néanmoins un déplacement de 100 μm nécessiterait d'utiliser des matrices d'actionneurs. Il faudrait aussi doubler le nombre de ces actionneurs pour pouvoir réaliser un actionnement dans les deux sens. La surface de la puce risque alors de devenir trop grande pour notre application. De plus, pour assurer la bistabilité, il faudrait des éléments magnétiques ou mécaniques pour réaliser le blocage. Enfin, les tensions parfois importantes nécessitent des alimentations spéciales.

L'actionnement thermique peut utiliser une alimentation standard (quelques V) mais selon le dispositif choisi, l'énergie de commutation à fournir est non négligeable. La bistabilité n'est pas naturelle et demande l'utilisation d'une poutre en flambage ou d'éléments magnétiques.

L'actionnement piézoélectrique est rapide, peu gourmand en énergie et peut parfois fonctionner avec des tensions faibles (< 5V) mais est peu adaptable facilement à de grands déplacements. Le déplacement a l'avantage d'être réversible lorsque la tension est inversée. La bistabilité est également difficile à mettre en œuvre.

L'actionnement par alliage à mémoire de forme permet de grands déplacements. Malheureusement ces actionneurs sont encore encombrants, plutôt lents et leur commutation nécessite de l'énergie (thermique).

Les micro-actionneurs magnétiques actuellement réalisés ne répondent pas entièrement à notre cahier des charges, car l'utilisation du magnétisme en microsystèmes est encore peu courante et l'énergie de commutation est aussi plus importante que pour l'électrostatique ou le piézoélectrique.

Néanmoins, l'actionnement magnétique semble adapté à la bistabilité grâce aux aimants, et aux grands déplacements rapides.

Cependant la solution n'est pas toute trouvée pour autant car le magnétisme offre un large choix de possibilité : déplacement vertical/horizontal, utilisation de fer, d'aimant ; utilisation de bobines? Il est d'ores et déjà important de prendre en compte quels procédés sont bien maîtrisés en salle blanche (bobine, fer, aimant...) et quels sont les moyens de simulation que nous possédons. De là, il nous sera possible de concevoir un micro-actionneur intégré adéquat, puis de le simuler et de l'optimiser avant d'en débiter la réalisation.

CHAPITRE II. CONCEPTION, MODELISATION ET OPTIMISATION DU MICRO-ACTIONNEUR MAGNETIQUE (*MIAM*).

Résumé :

Nous avons conçu un premier modèle d'actionneur magnétique qui a comme caractéristiques :

- Un aimant mobile sans aucun contact mécanique (de type poutre) dans le but de limiter la taille des puces mais surtout afin de commuter rapidement.
- Un actionnement par impulsions de courant (participe à diminuer l'énergie de commutation).
- Une bistabilité assurée par des interactions aimants-aimants.
- Un déplacement vertical de l'aimant mobile qui permet de garantir un grand entrefer et des bonnes surfaces de contact. Ce qui induit un report de substrat avec des billes 'flip-chip'. L'actionnement se fait donc simultanément au niveau des deux butées, et la taille des billes détermine la distance de commutation (de 30 μm à 120 μm).

Nous avons ensuite étudié différents modèles de calcul analytique afin de calculer les forces, les couples ainsi que le champ magnétique d'aimants ou de conducteurs électriques. Ces modèles s'appliquent à notre micro-actionneur autant qu'à tout système composé d'aimants et de conducteurs. En choisissant parmi ces modèles, nous avons mis en place un programme décrivant les forces sur la partie mobile pendant la commutation. Ce programme utilise la méthode des surfaces qui est fondée sur l'intégrale d'un champ magnétique sur les surfaces d'un aimant. A partir du calcul des forces et des couples, nous avons réalisé un modèle dynamique du micro-actionneur. Ainsi nous avons réussi à dimensionner le micro-actionneur et à en étudier le comportement statique et dynamique. L'étude a montré la stabilité de l'aimant mobile en butée ainsi que pendant la commutation. Ce modèle dynamique a aussi été couplé au logiciel Dipôle 3D et permet également de réaliser des animations réalistes. Mais ce modèle est trop basique et trop lent (simulation dynamique > 2h00) pour pouvoir effectuer facilement une optimisation globale des dimensions du micro-actionneur. L'optimisation a donc été effectuée grâce au logiciel Pro@Design au sein de l'équipe Conception et Dimensionnement Intégré du LEG. Outre un dimensionnement optimisé pour un courant de commutation minimal, l'optimisation a aussi mis en avant la nécessité d'utiliser de fortes densités de courant dans les conducteurs du micro-actionneur.

CHAPITRE II. CONCEPTION, MODELISATION ET OPTIMISATION DU MICRO-ACTIONNEUR MAGNETIQUE (MIAM).



La trame de ce chapitre suit la logique de création d'un objet : sa conception, sa modélisation puis son optimisation. Ces parties ne sont toutefois pas chronologiquement indépendantes et des 'aller-retours' sont faits puisque les résultats de modélisation et d'optimisation permettent d'améliorer la conception. La partie A. Conception contient des résultats de simulation ainsi que l'explication du principe de fonctionnement. La partie B. Modélisation est, quant à elle, plutôt axée sur les formules et les méthodes de calcul.

II.A. CONCEPTION

Dans cette partie je vais présenter la structure de l'actionneur telle que nous l'avons finalement conçue. Ces solutions seront accompagnées de justifications provenant de la modélisation. Les dimensions utilisées dans les exemples ne sont pas forcément les dimensions optimales du micro-actionneur, mais permettent d'obtenir un ordre de grandeur représentatif des valeurs calculées. Nous verrons aussi les géométries qui permettent d'optimiser le système mais qui n'ont pas été retenues pour la fabrication.

II.A.1. Cahier des charges / Recherche d'une structure

Le premier chapitre a validé notre choix préalable de l'actionnement magnétique. Nous en avons aussi déduit que l'utilisation des aimants est recommandée car la réduction d'échelle est favorable aux interactions entre aimants. L'utilisation de matériaux doux (type fer, Fe-Ni...) est plutôt à éviter pour diverses raisons de conception, de technologie et de calcul. En effet, l'ajout de fer dans un système permet de canaliser les flux mais peut aussi créer des forces parasites pouvant nuire au fonctionnement des microsystèmes. L'utilisation de plusieurs matériaux magnétiques, bien que possible, augmente les contraintes technologiques. De plus, l'ajout de fer dont l'aimantation n'est ni fixée ni constante sur tout le volume des matériaux augmente très sensiblement la complexité et les temps de calcul. La prise en compte des non linéarités et des saturations amplifie ce problème. Les procédés d'optimisation ou de calcul de trajectoire nécessitant plusieurs centaines d'itérations deviennent alors très lourds. Pour actionner la partie mobile, il semble logique d'utiliser un actionnement de type courant-aimant car c'est une interaction attractive et répulsive. Mais il est alors nécessaire d'étudier les densités maximales de courant supportées par les conducteurs car l'interaction courant-aimant est d'autant plus efficace que les densités de courant sont élevées.

La bistabilité peut a priori être facilement mise en œuvre. La partie mobile étant un aimant, il faut un ou plusieurs autres aimants dans les zones de positions stables pour maintenir l'aimant mobile en position de repos. Les forces de blocage peuvent être calculées grâce à la simulation.

Le cahier des charges stipule un déplacement de 100 à 200 μm . Faut-il que ce déplacement se fasse dans le plan du substrat silicium ou bien hors du plan ? Avec une poutre de flexion ? La poutre de

flexion prend de la place et semble donc être incompatible avec la volonté d'avoir un système de petite taille (qq mm²) car le déplacement souhaité est grand et nécessite donc une longue poutre. Il serait donc intéressant de faire commuter l'aimant mobile sans contact mécanique : en lévitation.

Les moyens de fabrication d'aimants disponibles en salle blanche au CEA/LETI nous imposent aujourd'hui de faire des aimants en CoPt électrodéposé d'environ 3 à 10 µm de haut. Les dimensions des aimants dans le plan peuvent varier de quelques micromètres à plusieurs mm. Afin de satisfaire au cahier des charges, le déplacement sera vertical, bien qu'à priori cela complique la fabrication par rapport à un déplacement horizontal de la partie mobile.

L'énergie de commutation n'est pas encore calculable à ce stade de la conception. Elle va dépendre de la masse de la partie mobile, de la distance de commutation, du temps de commutation qui déterminera la largeur de l'impulsion de courant, de la résistivité des conducteurs et du courant de commutation.

II.A.2. Principe magnétique choisi

Résumons nos premiers choix : Un aimant mobile (1) se déplace verticalement et en 'lévitant' entre deux butées (Figure II.1) séparées par une entretoise. Lorsqu'il est en position stable (i.e en haut ou en bas), il y est maintenu par des aimants fixes (2) ou (2') qui assurent la bistabilité. Enfin, pour lui permettre de commuter, on utilise des forces de Laplace en alimentant les conducteurs (3) avec des impulsions de courant (en inversant le sens du courant, on inverse le sens de commutation).

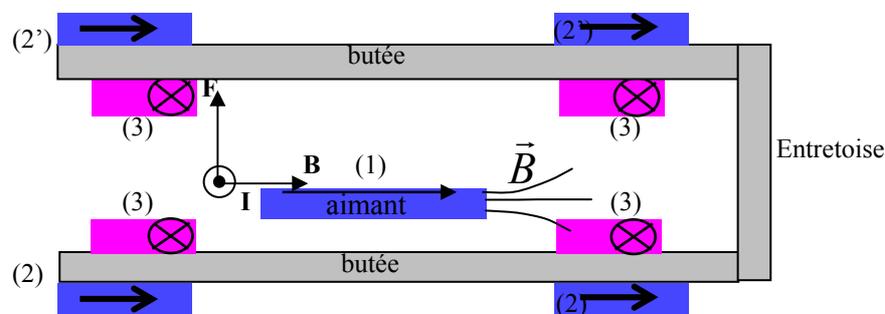


Figure II.1
A gauche : Principe du micro-actionneur. Vue en coupe.

Ce premier croquis est très schématique et nous invite ainsi à passer à la seconde phase : la simulation. Il faut déterminer si l'aimant mobile sera bien stable en butée, c'est-à-dire s'il ne va pas se coller préférentiellement sur la gauche ou la droite à un des deux aimants fixes. Quelle va être sa force de maintien en position stable ? Les questions sont les mêmes pour les conducteurs : Comment les placer pour obtenir une force verticale maximale ? Quelle forme leur donner ?

Les premières interrogations du point de vue de la réalisation apparaissent aussi. Comment l'aimant mobile va-t-il être fabriqué : pièce rapportée ou bien élément intégré puis libéré ? Va-t-il falloir

superposer un second substrat pour réaliser la partie supérieure de l'actionneur ? Comment le superposer ?

Les plus fortes contraintes technologiques sont a priori sur les aimants. Ce sont des aimants en CoPt électrodéposé dont l'épaisseur est limitée à environ 3 à 10 μm pour des raisons de temps de dépôt (1-2 $\mu\text{m}/\text{heure}$) mais aussi pour des problèmes d'épaisseur maximale des résines utilisables de manière standard au CEA-LETI. Leurs propriétés sont très variables en fonction des conditions de dépôt mais globalement, avec une aimantation dans le plan, la rémanence est acceptable car son minimum est de 0,3 T mais le champ coercitif est un peu faible (entre 2000 Oe et 3300 Oe). Il faut donc respecter un facteur de forme d'au moins 1,5 (rapport longueur dans le sens de l'aimantation sur largeur perpendiculaire à l'aimantation) afin de favoriser l'aimantation dans le plan.

Le déplacement de l'aimant est prévu pour varier de quelques microns à 200 μm . Pour les premiers prototypes, on se contentera d'un déplacement maximum de 120 μm . Les conducteurs prédimensionnés ont des dimensions de l'ordre de 10 μm de haut et de largeur allant de 5 à 50 μm .

II.A.3. Bistabilité

Il est assez facile d'imaginer que l'aimant mobile en position stable soit attiré par les aimants fixes supérieurs ou inférieurs. Mais quelle est cette force de maintien ? Les moindres vibrations peuvent-elle faire se détacher la partie mobile ? Il est donc important de connaître la force verticale (selon z, cf Figure II.2) sur l'aimant mobile quelle que soit sa position.

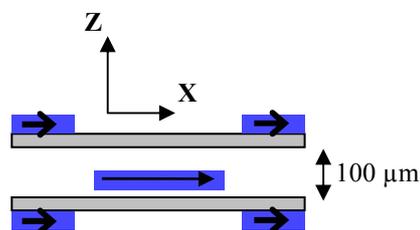
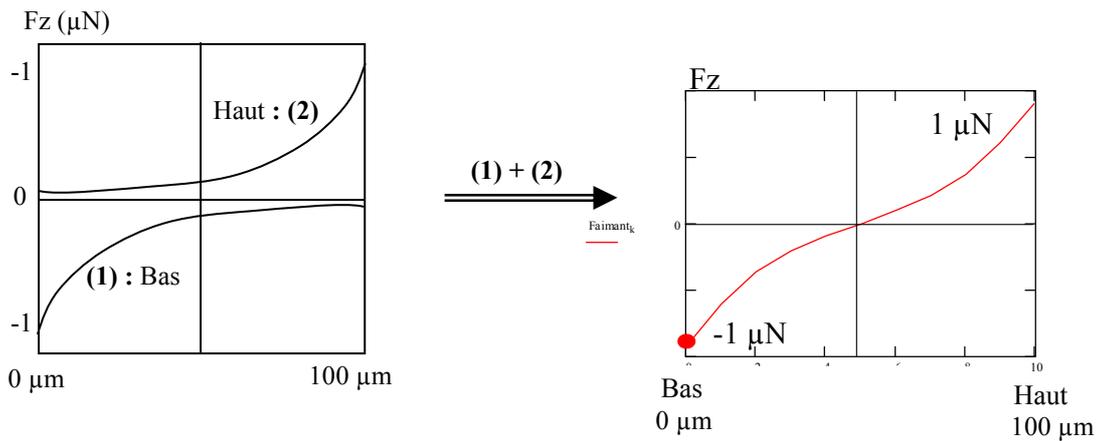


Figure II.2
Schéma des éléments modélisés

Dans un premier temps, seule la composante verticale des interactions entre les aimants permanents nous intéresse (il n'y a pas encore de conducteurs). La simulation sous Mathcad ou Dipôle 3D (voir l'annexe de modélisation et la partie modélisation de ce chapitre) nous donne une courbe du type Graph. II.1.



Graph. II.1

A gauche : Force verticale des aimants fixes inférieurs sur l'aimant mobile (1)

Force verticale des aimants fixes supérieurs sur l'aimant mobile (2)

A droite : Somme des forces de l'ensemble des aimants fixes (1 + 2) sur l'aimant mobile.

L'attraction exercée par les aimants fixes du bas sur l'aimant mobile (courbe (1)) est maximale au niveau de la butée inférieure et diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'aimant. De même les aimants fixes supérieurs exercent une force maximale au niveau de la butée supérieure (courbe (2)). La somme de ces deux courbes nous donne la force verticale globale sur l'aimant mobile due aux aimants fixes tout au long du déplacement. L'ordre de grandeur des forces en butée est de $1 \mu\text{N}$. On remarque aussi que la partie mobile ne subit aucune force au milieu de son déplacement, ce qui est normal car le micro-actionneur est symétrique.

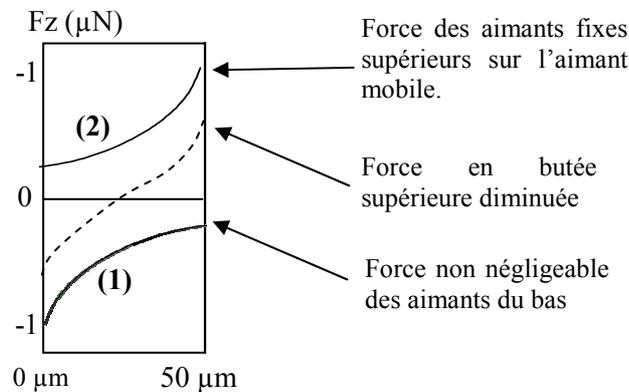
De plus, le poids de la partie mobile est négligeable ($0,009 \mu\text{N}$ soit $9 \mu\text{g}$ face à une force de $1 \mu\text{N}$). (cf. Eq. II.1). Pour déplacer l'aimant mobile, il faut donc lui appliquer 110 ($1/0,009$) fois sa masse, c'est-à-dire 110 g. Pour donner un ordre d'idée, les spécifications pour les applications spatiales imposent 1000 g; mais il est possible d'atteindre une telle valeur en redimensionnant les aimants.

Plus généralement, il est possible d'ajuster cette force dans une certaine mesure en modifiant : la taille des aimants fixes, l'épaisseur des aimants, l'épaisseur de la butée ou la rémanence des aimants. Mais la modification de l'entrefer selon l'axe x influence également le centrage de l'aimant mobile.

$$\begin{aligned}
 \text{Masse} &= \text{longueur} \times \text{largeur} \times \text{hauteur} \times \text{masse volumique} \\
 &= 180 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 11\,300 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Masse} &= 0,91 \mu\text{g} \\
 \text{Poids} &= 0,009 \mu\text{N}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. II.1}$$

Calcul de la masse de l'aimant mobile

Il est important de noter que la force résiduelle en butée dépend de la distance entre les aimants fixes, c'est-à-dire qu'en dessous d'un déplacement de 50 μm de la partie mobile, la compensation de la force résiduelle des aimants fixes du haut par ceux du bas n'est plus négligeable (Graph. II.2).



Graph. II.2
Influence de la distance entre les aimants fixes sur la force en butée

Vu de dessus, deux configurations de butée sont possibles : les aimants fixes peuvent être simples (deux aimants fixes, Figure II.3) ou dédoublés, près des coins du mobile (quatre aimants fixes, Figure II.4). En modifiant uniquement les dimensions des aimants fixes dans la configuration à quatre aimants fixes il est facile de régler la valeur de la force verticale en butée.

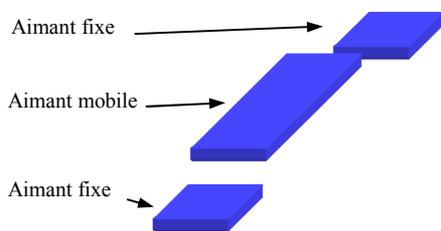


Figure II.3
Configuration classique dite 2x2 aimants fixes
(2 en haut et deux en bas)

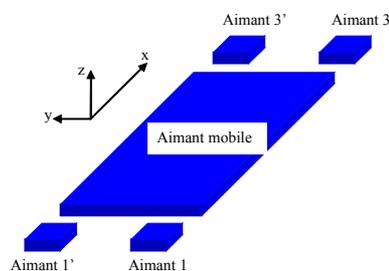


Figure II.4
Configuration dite 2x4 aimants fixes
(4 en haut et 4 en bas)

II.A.4. Centrage

L'aimant mobile est considéré en position stable en butée. La stabilité est définie ainsi: soit l'aimant mobile en butée (haute ou basse), exactement au centre (selon X et Y) des aimants fixes ; si l'aimant mobile se déplace dans le plan XY, les forces doivent contrer son mouvement et le ramener en position centrale. En règle générale, et avec des aimantations colinéaires, un aimant entre deux autres aimants va se rapprocher d'un des deux aimants fixes (déplacement selon l'axe x, cf. Figure II.5), et sa position sera donc instable. Pour que la position en butée Z soit stable au milieu des aimants fixes, il faut que l'aimant mobile soit attiré selon l'axe Z mais repoussé selon l'axe X par les deux aimants fixes (cf. Figure II.5). Dans notre cas, il faut modifier les dimensions de la butée (gapz et sep, cf. Figure II.6) pour obtenir une position stable selon l'axe X.

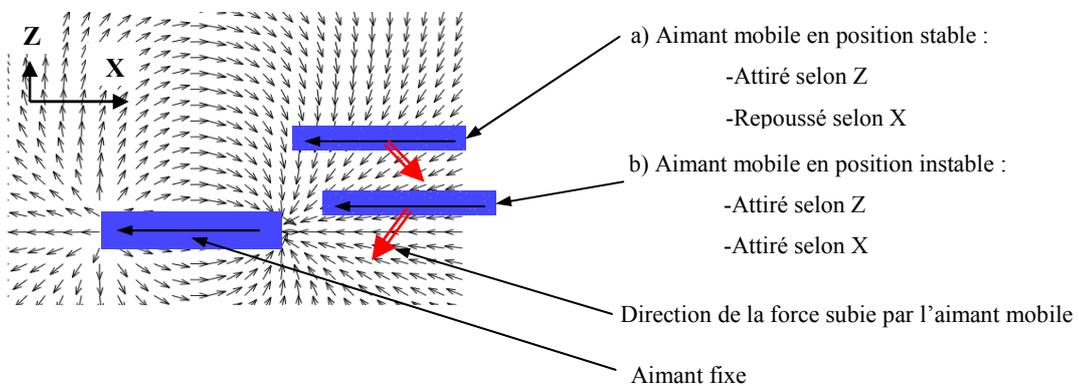


Figure II.5

Différentes positions possibles pour l'aimant mobile selon l'écart en z: un cas stable a) et un cas instable b).

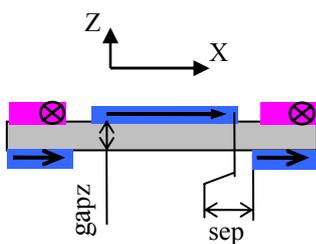
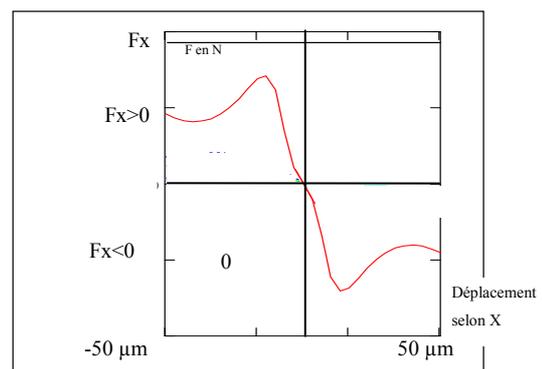


Figure II.6

Schéma des paramètres à modifier pour obtenir la stabilité selon x

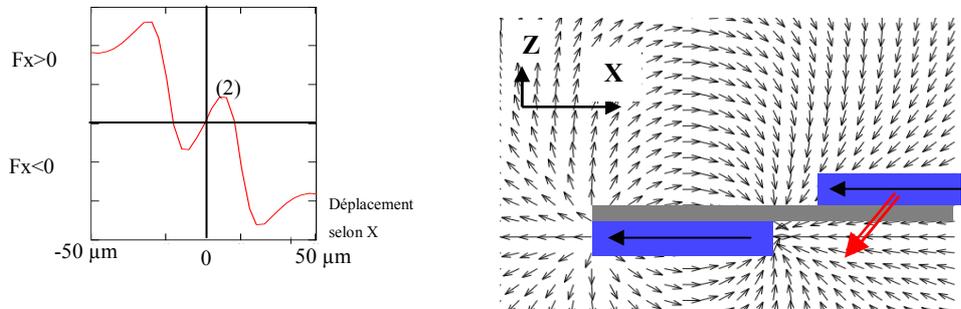


Graph. II.3

Cas stable avec Gapz = 7 µm et sep = 5 µm.

Pour être sûr d'obtenir la stabilité il faut modéliser 'au cas par cas', en suivant la règle approximative $gapz > sep$. Le Graph. II.3 nous montre un exemple d'état stable pour $sep = 5 \mu m$ et

gapz = 7 μm . Si l'aimant mobile se déplace vers les $-X$, il subit une force positive (de l'ordre de 0,2 μN pour 3 μm d'écart) qui le ramène au centre, et vice versa. Le Graph. II.4 par contre montre un cas d'instabilité pour sep = 6 μm et gapz = 16 μm . Si l'aimant centré se déplace vers les $+X$, il subit une force positive qui l'écarte encore plus. Il se stabilise alors dans la position (2) sur la courbe de gauche.



Graph. II.4
Gapz = 6 μm et sep = 16 μm . Cas instable

La stabilité selon l'axe Y est la plus simple à comprendre, elle est acquise par défaut comme le montre la Figure II.7 vue de haut. En première approche, elle est maximale si les aimants fixes et l'aimant mobile ont une même largeur.

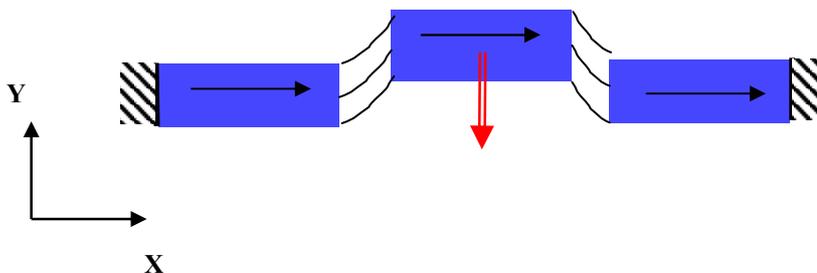


Figure II.7
Stabilité selon l'axe Y

Dans le cas du dispositif réel, les déplacements selon X et Y sont limités par des "barrières" qui seront positionnées à environ 5-10 μm tout autour de l'aimant.

Nous savons maintenant que l'on peut centrer et stabiliser l'aimant mobile en position de butée en Z. Les forces qu'il subit par les aimants fixes tendent à le ramener en position centrée dans le plan XY et à l'attirer en Z contre la butée du substrat. Les forces de maintien (selon l'axe Z) et de centrage (dans le plan XY) sont réglables.

II.A.5. Actionnement

Le problème est maintenant de faire commuter la partie mobile d'une position stable à l'autre. Le principe le plus simple est l'utilisation des interactions entre un courant et un aimant. En faisant circuler un courant dans des conducteurs proches de la partie mobile on crée dans les conducteurs des forces de Laplace (Eq. II.2), et donc des forces opposées sur l'aimant, par réaction. Ce type d'interaction peut devenir très intéressant si les densités de courant sont importantes. Comment et où faire circuler le courant pour obtenir un actionnement le plus efficace possible ? La Figure II.8 cartographie la direction du champ magnétique dans le plan d'un aimant vu de haut.

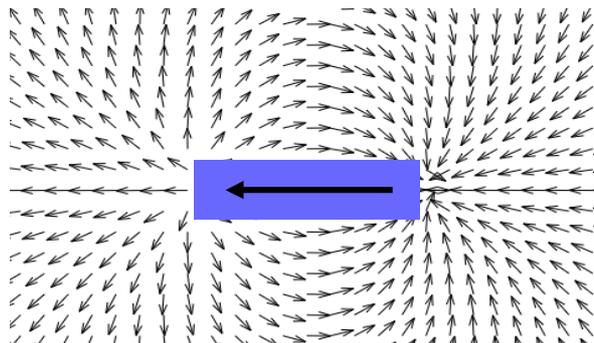


Figure II.8
Vue du dessus. Carte du champ magnétique généré par l'aimant mobile.

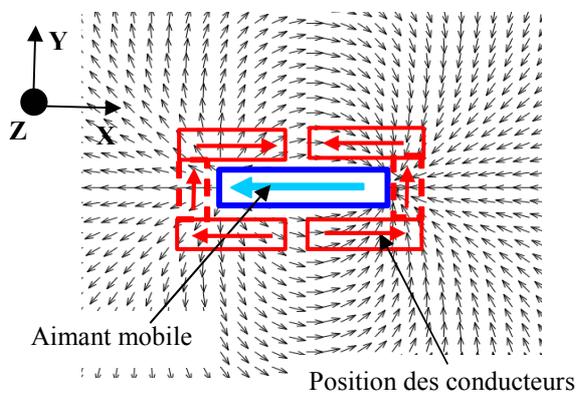


Figure II.9
Cartographie du champ magnétique autour d'un aimant et positions souhaitées pour les conducteurs.

$$\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

F(laplace)

Eq. II. 2

Formule de Laplace : Seule la composante du champ perpendiculaire au courant crée une force.

Pour obtenir une force optimale, le courant doit être perpendiculaire au champ magnétique et la valeur du champ magnétique doit être maximale. Ainsi, vue de profil, pour obtenir une force verticale le courant doit circuler selon les flèches de la Figure II.10 (on peut s'aider du schéma en perspective de l'Eq. II.2 pour vérifier).

Comme le montre la Figure II.1, des conducteurs sont placés sur le substrat haut et d'autres sur le substrat bas. Pour permettre la commutation, le courant devra circuler simultanément et dans le même sens dans les paires de conducteurs du haut et du bas. Sur la Figure II.11, on voit que le courant doit contourner l'aimant mobile pour qu'une force globale verticale soit créée sur les conducteurs. Pour commuter dans l'autre sens, il suffit d'inverser le courant.

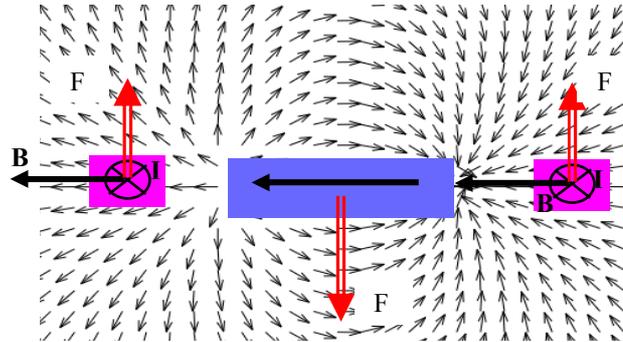


Figure II.10

Vue de profil: Forces de Laplace et réaction sur l'aimant mobile

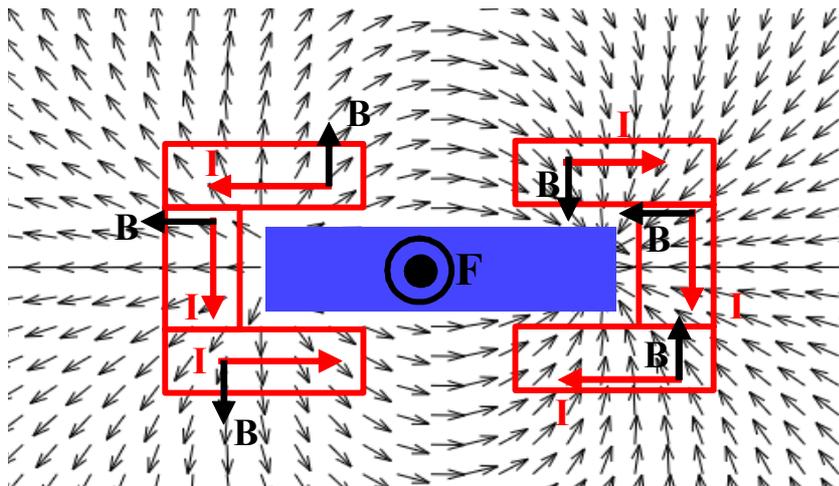


Figure II.11

Vue de haut: Sens du courant permettant la montée de la partie mobile vers le lecteur

Les conducteurs placés au nord et au sud (gauche et droite) de l'aimant (en pointillé sur la Figure II.9) devront, a priori, être au plus près de l'aimant afin de maximiser le champ B . Ces conducteurs devront aussi être les plus fins possibles afin de concentrer le plus de courant possible là où le champ B est maximum: ainsi, il faudra des densités de courant élevées.

Les conducteurs placés sur les côtés de l'aimant n'ont pas une forme optimale évidente. Une étude d'optimisation est donc nécessaire.

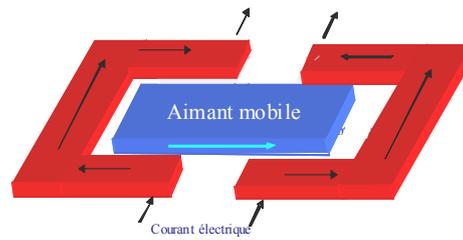
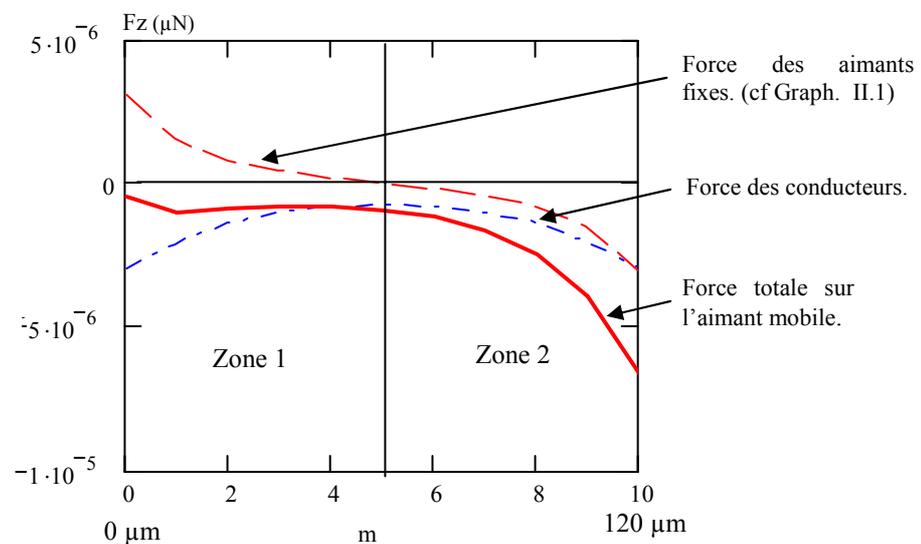


Figure II.12
Géométrie des conducteurs électriques et circulation du courant

Durant la première moitié du trajet, l'aimant mobile va devoir lutter contre les forces de maintien des aimants fixes du bas (Zone 1 du Graph. II.5) grâce à l'effort de poussée fourni par les conducteurs (principalement ceux du bas car ils sont plus proches). Puis il va accélérer de plus en plus à partir de la moitié de la distance de commutation car il est alors tiré à la fois par les conducteurs et par les aimants fixes du haut (Zone 2). On retrouve sur le Graph. II.5 l'évolution de la force combinée des aimants fixes sur l'aimant mobile : maximale au niveau des butées et nulle au milieu du trajet. La courbe de la force exercée par les conducteurs sur l'aimant mobile est toujours de même signe lors de la commutation et est elle aussi maximale au niveau des conducteurs.



Graph. II.5

Graphique : Dimensions du type de base (voir Chapitre III), Déplacement de la partie mobile = 120 μm ,
Courant = 1,2 A.

Trait pointillé : Force Aimants fixes \rightarrow Aimant mobile suivant l'axe z

Trait mixte : Force Courant \rightarrow Aimant mobile suivant l'axe z

Trait fort : Force totale exercée sur la partie mobile (trait pointillé + trait mixte) selon l'axe z.

On s'intéresse maintenant à la stabilité de l'aimant mobile due aux conducteurs. Cette étude est seulement qualitative. Imaginons que l'aimant commute de la butée inférieure vers la butée supérieure. Au début de la commutation, il est propulsé par les conducteurs du bas. Les forces de Laplace sur les conducteurs sont dirigées vers le bas et inclinées vers l'intérieur du micro-actionneur (Figure II.13 bas). En réaction, les forces sur l'aimant mobile sont dirigées vers le haut mais la position latérale de l'aimant mobile selon x est instable. En effet, chaque conducteur attire l'aimant vers lui et donc si celui-ci se décentre légèrement il va tendre à se décaler encore plus du côté de son décentrage car les forces augmentent lorsque l'on se rapproche des conducteurs.

Lorsque l'aimant mobile se rapproche de la butée supérieure (Figure II.13 haut) les forces de Laplace sur les conducteurs sont toujours dirigées vers le bas mais cette fois vers l'extérieur. Ainsi la réaction sur l'aimant mobile est bien entendu toujours dirigée vers le haut mais sa position latérale est cette fois-ci stable car l'aimant mobile est d'autant plus repoussé par les conducteurs qu'il s'en rapproche.

L'aimant mobile subit donc, lors d'une commutation, une instabilité latérale au début de la commutation, puis une force de recentrage avant qu'il n'arrive en butée supérieure.

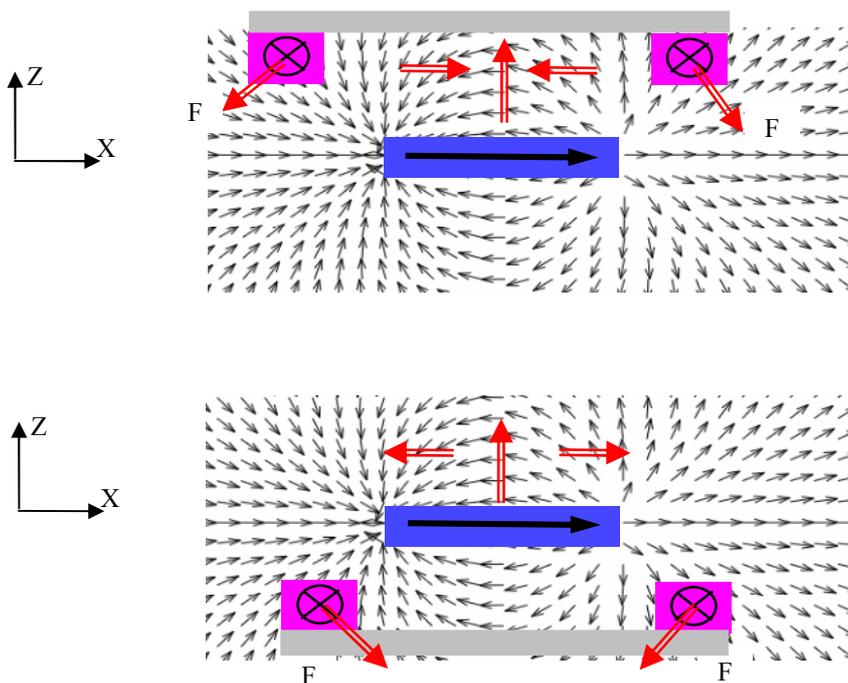


Figure II.13

Haut : Lorsque l'aimant mobile arrive en butée supérieure, le mouvement latéral selon x est stable.

Bas : Lorsque l'aimant mobile débute sa commutation, le mouvement latéral selon x est instable.

II.B. ETUDE ET OPTIMISATION DU MIAM

Cette pré-étude sur la configuration de base nous a permis de déterminer la position des conducteurs et le sens du courant pour permettre un actionnement vertical bistable et plutôt auto-centré. Mais les dimensions et la position des conducteurs ne sont pas optimales pour autant. Le programme que j'ai réalisé sous Mathcad pour simuler le micro-actionneur permet d'optimiser facilement deux paramètres simultanément (distance entre aimant mobile et conducteur, et largeur du conducteur par exemple) en créant une courbe tridimensionnelle. Ce calcul prend tout de même plusieurs minutes. Le maximum de la courbe est l'optimum recherché. Mon étude en matière de simulation s'est arrêtée à ce niveau. Pour faire plus, il aurait fallu que je crée un logiciel spécial et sous Mathcad une optimisation de tous les paramètres aurait demandé plusieurs mois. Heureusement, l'équipe Conception et Dimensionnement Intégrés du LEG développe un logiciel d'optimisation dont nous verrons la teneur et les performances plus loin dans ce chapitre.

II.B.1. Etude mécanique

Le système a maintenant une géométrie définie. Il faut encore l'optimiser pour diminuer l'énergie de commutation mais nous pouvons d'ores et déjà simuler le comportement du micro-actionneur.

Ayant réalisé une étude statique tridimensionnelle, c'est-à-dire que pour une position quelconque de l'aimant mobile dans l'espace (6 degrés de liberté : 3 translations, 3 rotations), le programme donne la force et le couple créés par les aimants fixes et les conducteurs et subis par l'aimant mobile. Il est alors attrayant de faire une étude dynamique du système en résolvant les équations différentielles de la mécanique classique. La simulation n'en devient que plus vivante car les résultats varient en fonction du temps. Le temps de commutation, la vitesse maximale de l'aimant mobile, la réponse à une excitation donnée deviennent des résultats faciles à obtenir. Grâce aux logiciels Mathcad et Matlab nous avons réalisé des animations du comportement théorique du système.

Cette étude permet également d'estimer la réponse dynamique de la partie mobile aux défauts structurels (défaut de conducteur, dissymétrie de courant dans les conducteurs, décalage latéral ou angulaire...) mais aussi aux perturbations extérieures (vibrations, champ magnétique extérieur).

Nous étudierons plus en détail les parties importantes de ce programme dans la partie modélisation de ce chapitre.

II.B.1.1 Temps de commutation

Pour un courant d'excitation donné et donc une force F donnée, l'aimant mobile a besoin d'un certain temps pour commuter d'une position à l'autre. Pour une première version optimisée du MIAM (dimensions Figure II.14), on calcule un temps de commutation de 360 μs avec un courant de 400 mA (Graph. II.6) et un déplacement de 100 μm . Cette version optimisée a une résistance au choc minimale (150 G), ainsi que des conducteurs fins (5 μm) et proches (10 μm) de la partie mobile. Sur le Graph.

II.6, le micro-actionneur subit deux impulsions de courant, une pour le faire descendre, et la suivante pour le faire remonter en position initiale.

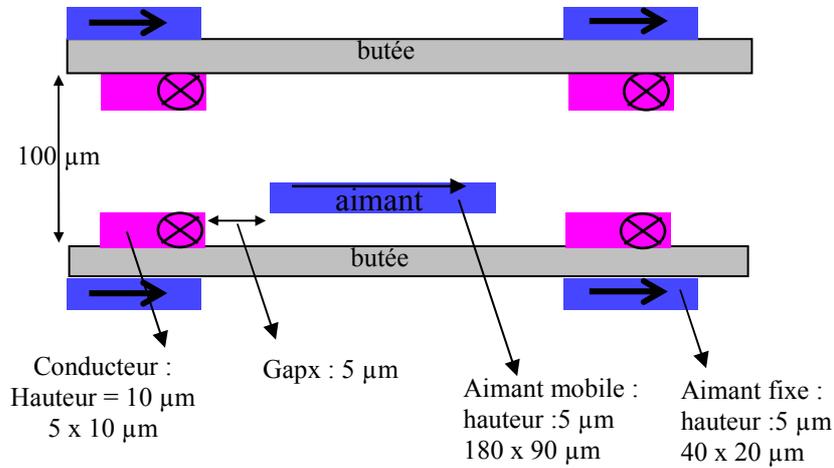
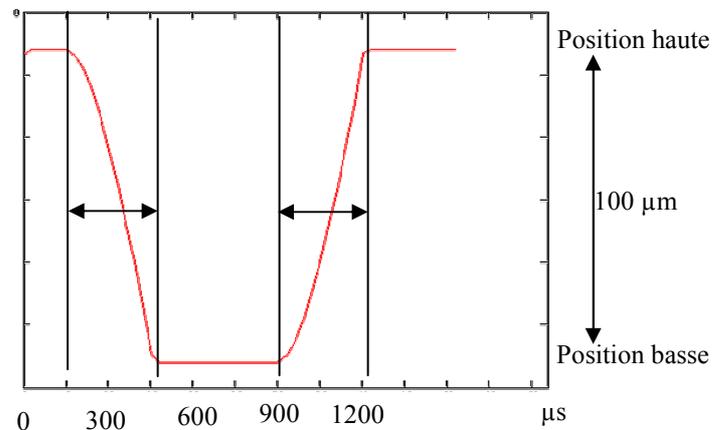


Figure II.14

Dimensions du micro-actionneur, et courants orientés pour la montée.



Graph. II.6

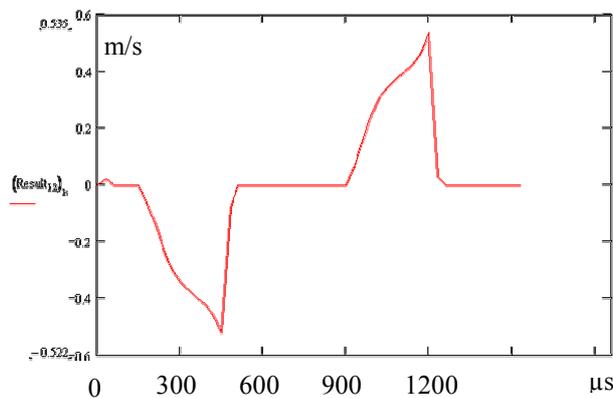
Pour un courant de 400 mA, le temps de commutation est 360 µs
Pour un courant de 1 A, le temps de commutation est de 300 µs

Le fait de commuter rapidement permet de s'affranchir (théoriquement) des problèmes d'instabilités de guidage de l'aimant mobile. En effet, seuls les aimants fixes assurent son centrage, les conducteurs créant une composante de force uniquement verticale. La trajectoire de l'aimant mobile, au milieu de son trajet, n'est donc due qu'à son inertie et peut donc être influencée par des perturbations (extérieures ou dues aux dissymétries mêmes de l'actionneur ou à un mauvais centrage de l'aimant mobile en butée). Une commutation rapide est donc préférable, c'est-à-dire que le courant de commutation sera bien supérieur au courant minimal de commutation. Théoriquement il est possible de commuter dès que la

force sur l'aimant mobile est supérieure à 0, mais nous nous imposons une marge supplémentaire de $0,5 \mu\text{N}$ sur la force afin d'assurer la commutation.

II.B.1.2 Vitesse :

En fin de course, l'aimant mobile choque sur la butée opposée puisqu'il n'y a rien pour l'amortir. Quelle est donc sa vitesse au moment du choc ? Le graphique II.7 montre que pour un déplacement de $100 \mu\text{m}$ et un courant de 400 mA , la partie mobile atteint $0,5 \text{ m/s}$. Il est donc possible que des phénomènes de rebond apparaissent lors de l'arrivée en butée de l'aimant, mais nous n'avons pour le moment aucune donnée théorique pour les quantifier (coefficient de rebond, énergie dissipée lors du choc...). Mais ceux-ci devraient être mineurs car on n'observe pas de rebond sur le micro-relais horizontal MAMBA qui fonctionne déjà selon le même principe (Chapitre I: [DIE04] et [DEL01], photo I.40) et avec des matériaux similaires.



Graph. II.7
Courant = 400 mA , 2 impulsions (aller et retour)
Vitesse selon l'axe Z en fonction du temps.

II.B.1.3 Limites de la conception :

Malheureusement, la gestion d'un objet dans un espace tridimensionnel devient rapidement complexe. Ainsi mon étude des atterrissages se limite à une étude simple des butées (position du centre de gravité de l'aimant mobile), alors qu'il faudrait prendre en compte tous les atterrissages possibles. Il est donc difficile de simuler l'aimant lorsqu'il est en butée et qu'il est décentré en translation ou en rotation. Il ne nous est pas encore possible de simuler les frottements entre la butée et l'aimant mobile, l'élasticité au choc, ou les forces électrostatiques de collage qui peuvent apparaître faute de données sur le sujet. J'ai aussi négligé le cas où l'aimant pourrait avoir une face concave. La fabrication d'une maquette macroscopique permet de lever certaines incertitudes engendrées par les hypothèses de travail simplificatrices.

II.B.2. Etude de la consommation en courant

De même que l'électrostatique fonctionne avec des tensions, l'électromagnétisme utilise des courants. Le micro-actionneur doit être alimenté en courant, la tension dépendant de la résistance du circuit. Un des objectifs dans la réalisation de cet actionneur est donc de minimiser l'énergie dissipée par effet Joule à chaque impulsion. Nous pouvons ainsi essayer de diminuer la résistivité des conducteurs en cuivre, ce qui permet de réduire l'énergie de commutation (20% de gagné sur la résistivité, c'est 20% d'énergie de commutation en moins). Il suffit pour cela de recuire le cuivre électrolysé. Mais bien sûr il est plus intéressant de travailler sur la diminution des courants, car l'énergie (puissance = Ri^2) évolue avec le carré du courant (20% de gagné sur le courant, c'est 36% de gagné sur l'énergie !). La largeur et la forme des impulsions sont aussi des données permettant de réduire l'énergie de commutation. Par exemple, une forme de décharge capacitive permet d'avoir une grande accélération de la partie mobile au début de la commutation (où c'est nécessaire) et une force plus modérée sur la fin de la commutation.

II.B.2.1 Optimisation Mathcad

Grâce au programme écrit sous Mathcad, j'ai pu réaliser des optimisations en courant. En fait, c'est la force pour un courant donné qui a été optimisée car pour des dimensions fixées la force est proportionnelle au courant. Optimiser les dimensions du système pour minimiser le courant est donc identique à chercher à maximiser la force des conducteurs sur l'aimant mobile. Mais seules deux variables peuvent être optimisées visuellement simultanément, à l'aide d'une courbe tridimensionnelle (variable 1, variable 2, force). Ne pouvant tout optimiser avec cette méthode fastidieuse, je me suis dans un premier temps intéressé uniquement aux dimensions du conducteur ainsi qu'aux distances entre les conducteurs et l'aimant mobile dans le plan Oxy (cf. Figure II.15).

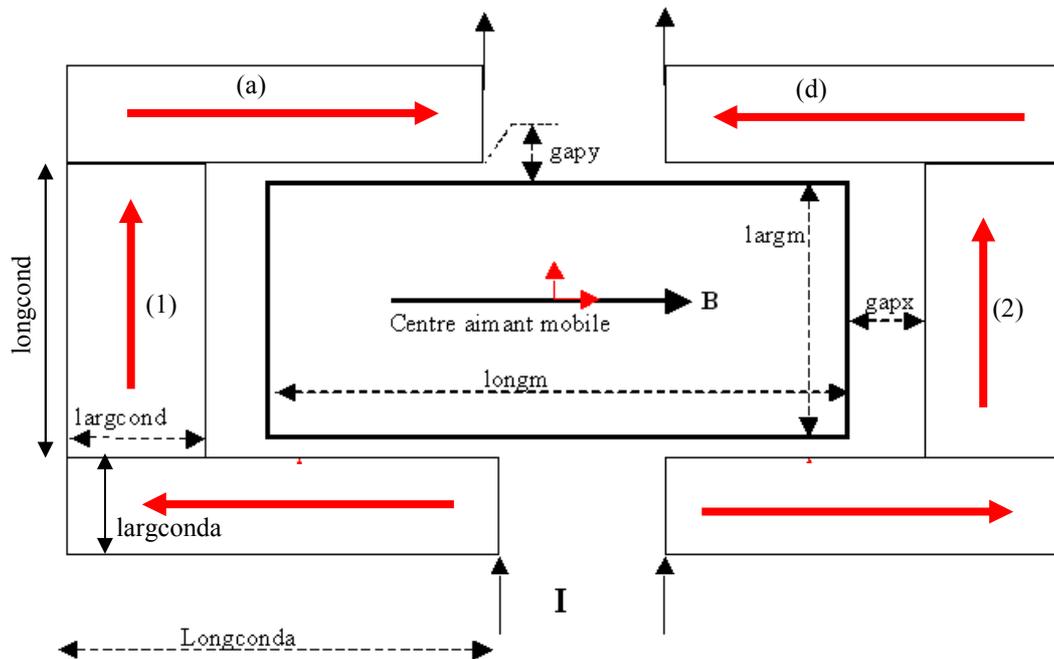


Figure II.15

Schéma simplifié du conducteur et de l'aimant mobile (vue de dessus) et noms des variables.

Voici les effets des variations dimensionnelles sur l'efficacité du conducteur :

- Diminuer la force de maintien au repos (et donc la résistance aux chocs) permet de faire commuter l'aimant plus facilement car celui-ci est moins bien retenu en position stable. Pour cela, il suffit de modifier les dimensions des aimants fixes et mobiles et leurs distances relatives. Mais le système est alors bien entendu plus sensible aux chocs et aux vibrations.
- Les conducteurs (1) et (2) (cf. Figure II.15) peuvent être adaptés à différents micro-actionneurs. Pour un même courant plus la section de passage du courant est faible et proche de l'aimant mobile, plus la force propulsant la partie mobile sera grande au début du déplacement (cf. Figure II.16). Plus le conducteur est épais (selon z), plus la force s'applique régulièrement tout le long du déplacement (cf. Figure II.17). Si le conducteur est éloigné, il sera moins efficace (voire inefficace si la force pour décoller l'aimant mobile de la butée n'est pas suffisante) mais il agira sur une plus grande portion du déplacement (cf. Figure II.18). On peut alors imaginer un double conducteur avec une partie fine en bas pour soustraire l'aimant mobile à l'attraction des aimants fixes et une partie supérieure plus large pour avoir une action soutenue tout le long du déplacement (cf. Figure II.19).

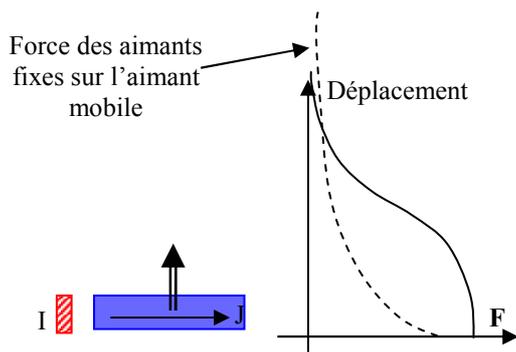


Figure II.16

Schéma : Cas où le conducteur (hachuré) a une faible section.

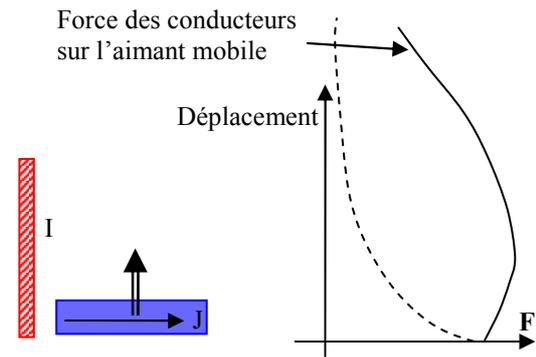


Figure II.17

Schéma : Cas où le conducteur (hachuré) est haut.

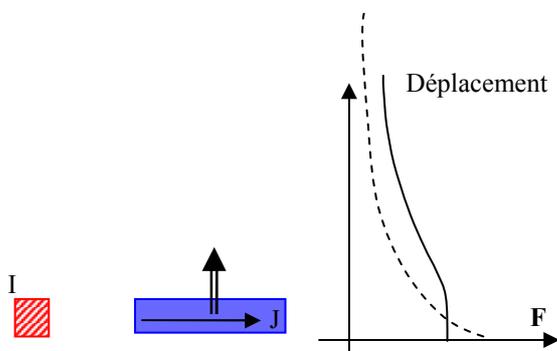


Figure II.18

Schéma : Cas où le conducteur (hachuré) est éloigné de l'aimant mobile

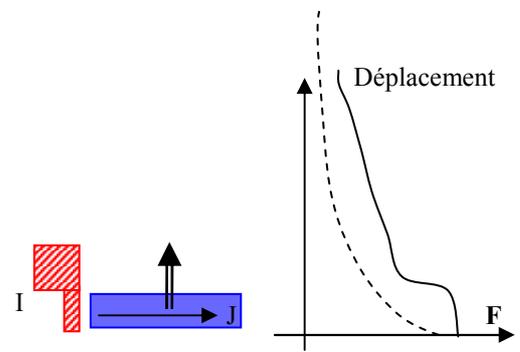
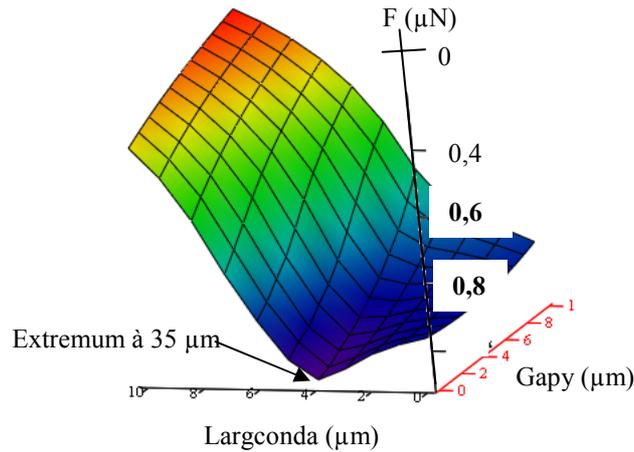


Figure II.19

Schéma : Cas où le conducteur (hachuré) est constitué de deux zones.

- Les conducteurs (a) et (d) (cf. Figure II.15) s'optimisent avec la même technique. Mais les résultats sont différents. La configuration la plus efficace n'est pas de mettre la plus petite section au plus près de la partie mobile... En faisant varier la largeur du conducteur (l_{cond}) avec sa distance à l'aimant mobile (g_{gap}) et en visualisant la force, on obtient le Graph. II.8. On remarque que la force est optimale lorsque g_{gap} est faible mais surtout qu'il existe une valeur donnée de la largeur du conducteur qui correspond à ce maximum (ici, la largeur optimum du conducteur est d'environ $35 \mu\text{m}$).



Graph. II.8

Simulation sous Mathcad

Axe vertical : Force (axe vertical à l'envers car forces pour la descente orientées vers le bas!)

II.B.2.2 Optimisation Pro@Design

Nous allons essayer de déterminer la meilleure géométrie des aimants et des conducteurs à l'aide d'un logiciel spécifique développé dans l'équipe Conception et Dimensionnement Intégrés du LEG. Pro@Design est un logiciel semi-analytique dédié à l'optimisation de systèmes dont les équations sous forme analytique sont connues. Il faut lui intégrer les équations du système ainsi que les contraintes sur les variables (densité de courant maximale, plage de variation des paramètres géométriques...). Pro@Design calcule ainsi les dérivées partielles de toutes les variables. Grâce à ces données, il opère une optimisation globale du micro-actionneur -minimiser le courant dans notre cas-. Le temps d'intégration des équations est long et les optimisations multi-étapes durent entre 20 minutes et plusieurs heures. Le logiciel d'optimisation s'arrête lorsqu'il trouve le courant minimum avec les contraintes géométriques que nous lui avons imposées.

Nous cherchons également à optimiser les pertes Joule en jouant uniquement sur la valeur du courant. Nous ne nous intéressons pas pour le moment à la résistivité ni à la forme de l'impulsion de courant. Bien que l'adjonction de ces données au programme puisse modifier la géométrie des conducteurs de manière significative.

L'optimisation a été réalisée au LEG dans le cadre d'un DEA [CHE04]. De nouvelles fonctions ont été rajoutées au programme standard afin de pouvoir lui intégrer les sommes multiples et les intégrales triples nécessaires aux calculs des forces entre les aimants. Ces résultats m'ont beaucoup appris sur le comportement fin de l'actionneur, qui est peu intuitif même pour un "magnéticien", et m'ont permis de redimensionner le micro-actionneur.

Prenons l'exemple des Figure II.20 et Figure II.21. Avant de se soucier de l'optimisation en courant, les dimensions de l'aimant mobile étaient les dimensions minimales du cahier des charge : un parallélépipède long et étroit. L'optimisation automatique nous a montré qu'il faut augmenter la largeur de l'aimant mobile si on veut diminuer le courant. Après coup, ceci est logique, car si l'aimant est plus large, il interagit avec une portion plus grande du conducteur, donc il y a plus de force pour un même courant. Mais étant plus large, il est plus lourd et présente donc une plus grande inertie. Il interagit aussi plus fortement avec les aimants fixes, ceux-ci sont donc réduits pour garder une force de maintien en butée minimale. Les paramètres dynamiques ne sont pas pris en compte pour l'optimisation (temps de commutation)

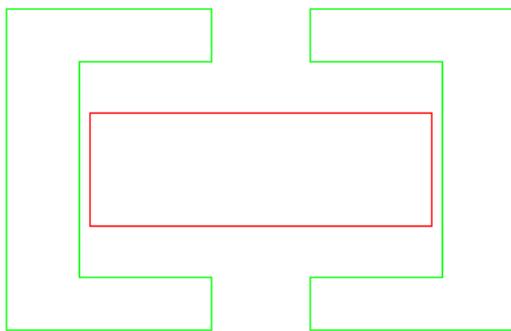


Figure II.20
Dimensions initiales soumises à Pro@Design:
Aimant mobile (centre) long et étroit.
Conducteurs (autour) de largeur à peu près homogène.

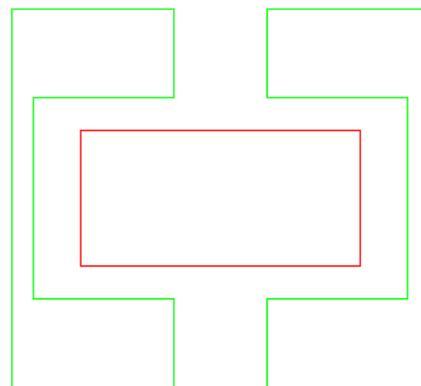


Figure II.21
Géométrie optimisée:
Aimant mobile (centre) plus large et moins long.
Conducteurs (autour) à largeur variable.

Un autre exemple : l'optimisation des dimensions des aimants fixes (Figure II.22 et Figure II.23). Dans un premier temps, les largeurs de tous les aimants ont été supposées identiques. Pour l'optimisation, la résistance aux chocs a été fixée à 150 G et les dimensions des aimants ont été libérées. Du coup, Pro@Design nous a suggéré d'utiliser des largeurs différentes : c'est ce qui a donné naissance au type « 2 x 4 aimants fixes » (Figure II.4). En effet, diminuer simplement la largeur des aimants fixes centrés rend les butées peu stables angulairement autour de 0x, d'où l'idée de placer deux paires de petits aimants fixes aux bords de l'aimant mobile (figure II.4).



Figure II.22
Dimensions initiales soumises à Pro@Design.
Aimant mobile (centre) long et étroit.
Aimants fixes (sur les bords) de mêmes largeurs.

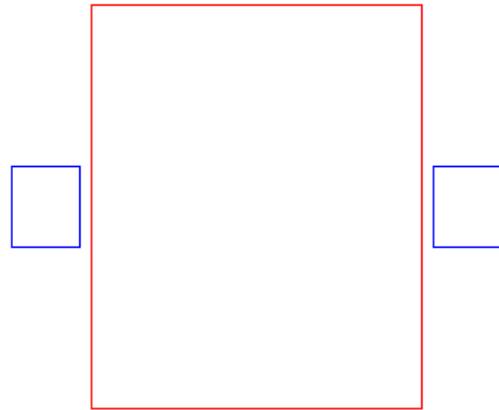


Figure II.23
Géométrie optimisée.
Aimant mobile (centre) large et peu long.
Aimants fixes plus étroits.

Une optimisation plus globale a permis de diminuer le courant minimal de commutation de 3 A (structure initiale n'ayant subi aucune optimisation) à 300 mA. La Figure II.24 représente la géométrie du micro-actionneur avant et après cette optimisation.

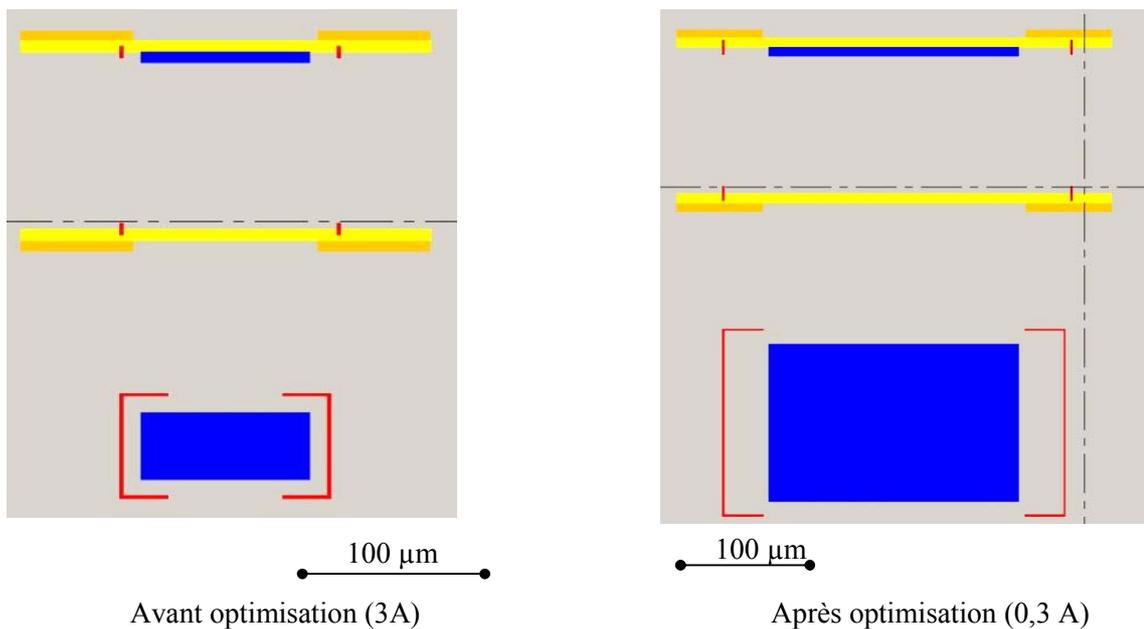


Figure II.24

Les principales évolutions sont un aimant mobile plus large pour augmenter l'interaction entre l'aimant mobile et le conducteur, ainsi que des conducteurs plus étroits afin d'augmenter la densité de courant, ce qui tend à confirmer ce que nous pensions intuitivement. Le besoin d'une densité de courant plus importante nous a conduits à étudier la température dans des conducteurs alimentés en courant.

II.B.2.3 Optimisation de la fabrication

Optimiser le micro-actionneur par des simulations informatiques est une phase nécessaire, mais il ne faut pas oublier les contraintes liées à la fabrication ! Ce qui apparaît comme un trait sous Mathcad doit forcément avoir une épaisseur dans la réalité... Il faut faire le compromis entre un système efficace et un système facile à réaliser. Par exemple, l'attaque chimique du cuivre sacrificiel pour libérer l'aimant ne doit surtout pas venir en contact des conducteurs, sinon les conducteurs vont disparaître aussi ! Pour éviter les contaminations il faut donc une isolation par une couche d'oxyde d'une certaine épaisseur. Nous verrons ceci plus en détail dans le chapitre IV traitant de la fabrication du prototype en salle blanche.

II.B.3. Validation du principe par une maquette

Jusqu'ici nous nous sommes contentés de modèles et de simulations afin de prouver le fonctionnement du micro-actionneur. Mais pour notre propre information, pour valider nos calculs, et lors de réunions avec des industriels ou d'autres laboratoires, il est important de pouvoir en montrer le fonctionnement par le biais d'une maquette centimétrique. L'objectif est donc de vérifier le bon fonctionnement des principes importants: l'actionnement et la bistabilité.

Pour avoir une maquette présentable, le déplacement de la partie mobile a été fixé à 1 cm. Afin de pouvoir utiliser un générateur de courant classique, les conducteurs sont bobinés un grand nombre de tours (200) afin de limiter le courant d'alimentation (maxi 6 A pour un générateur classique). Les densités de courant ne doivent pas dépasser 150 A/mm² en impulsionnel pour éviter de faire surchauffer les fils. L'une des difficultés est de fabriquer ces bobines, car il faut faire passer 200 fils de 0,2 mm de diamètre dans un espace de 3 x 5 mm².

Le plus pratique pour réaliser l'actionneur est de le fraiser dans du plexiglas (ou équivalent) car c'est un matériau transparent (donc esthétique car on voit ce qui se passe à travers) et très facilement usinable.

Les aimants ont pour dimensions 7 x 9 x 2 mm³ afin que ceux-ci soient suffisamment petits tout en restant usinables à partir d'un aimant de plus grosse taille.

La maquette centimétrique de l'actionneur que nous avons fabriquée se compose de trois parties : la partie supérieure (Figure II.26 : avec 2 conducteurs et 2 aimants fixes), l'aimant mobile (Figure II.27 : avec un simili-miroir) et la partie inférieure (Figure II.28: avec 2 conducteurs, et 2 aimants fixes absents sur la photo).

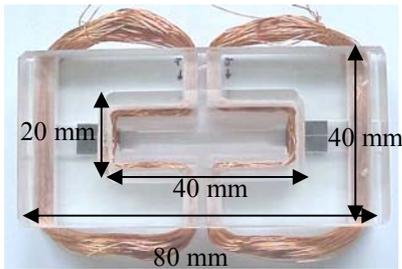


Figure II.25
Partie supérieure, vue de dessous
(on devine la forme pyramidale)

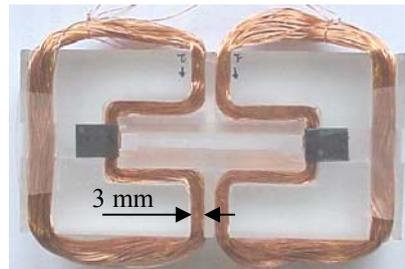


Figure II.26
Partie supérieure, vue de dessus

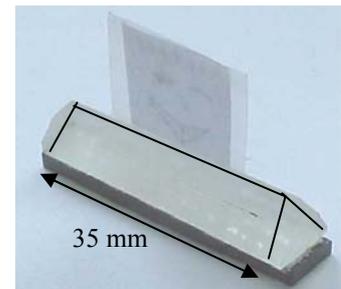


Figure II.27
Aimant mobile et son 'miroir'
(avec le support pyramidal)

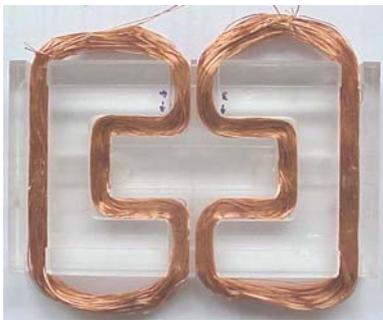


Figure II.28 :
Partie inférieure, vue de dessus
(sans les aimants fixes)

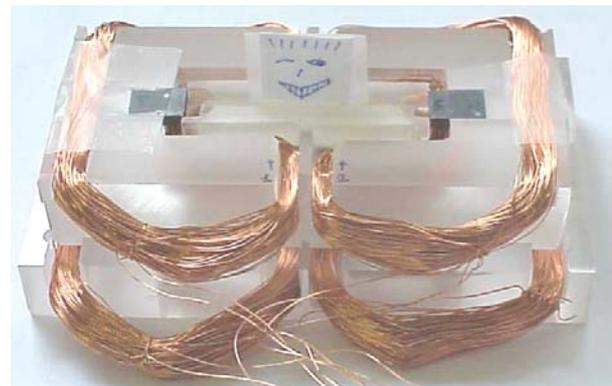


Figure II.29
Maquette assemblée avec le 'miroir' en position haute.

Les résultats sont concluants car avec un courant de 1,5 A dans chaque bobine l'actionneur fonctionne. Toutefois, on a enlevé les aimants fixes de la butée inférieure car le générateur ne peut pas fournir suffisamment de courant (effort maximal dû aux conducteurs : 0,15 N) pour vaincre à la fois la gravité (poids de 0,08 N) et la force des aimants (0,1 N) qui retient la partie mobile en bas. En effet, comme on l'a vu dans la section "réduction d'échelle" au chapitre I, la gravité n'est pas négligeable en grandes dimensions. Il faut rester prudent avec la durée des impulsions de courant, car même avec 1,5 A les bobines chauffent et, si on attend trop longtemps (quelques secondes), elles risquent de se détériorer. Afin de rendre le système plus transportable, j'ai remplacé le générateur de courant par 5 piles de 9 V et une capacité à forte charge.

L'auto-centrage en position haute (là où j'ai conservé les aimants fixes) est parfaitement visible : lorsque l'on pousse la partie mobile vers un aimant fixe, elle revient naturellement au centre. Cette action est suffisante pour compenser les dissymétries des bobines (géométrie, courant) qui pourraient décentrer la partie mobile.

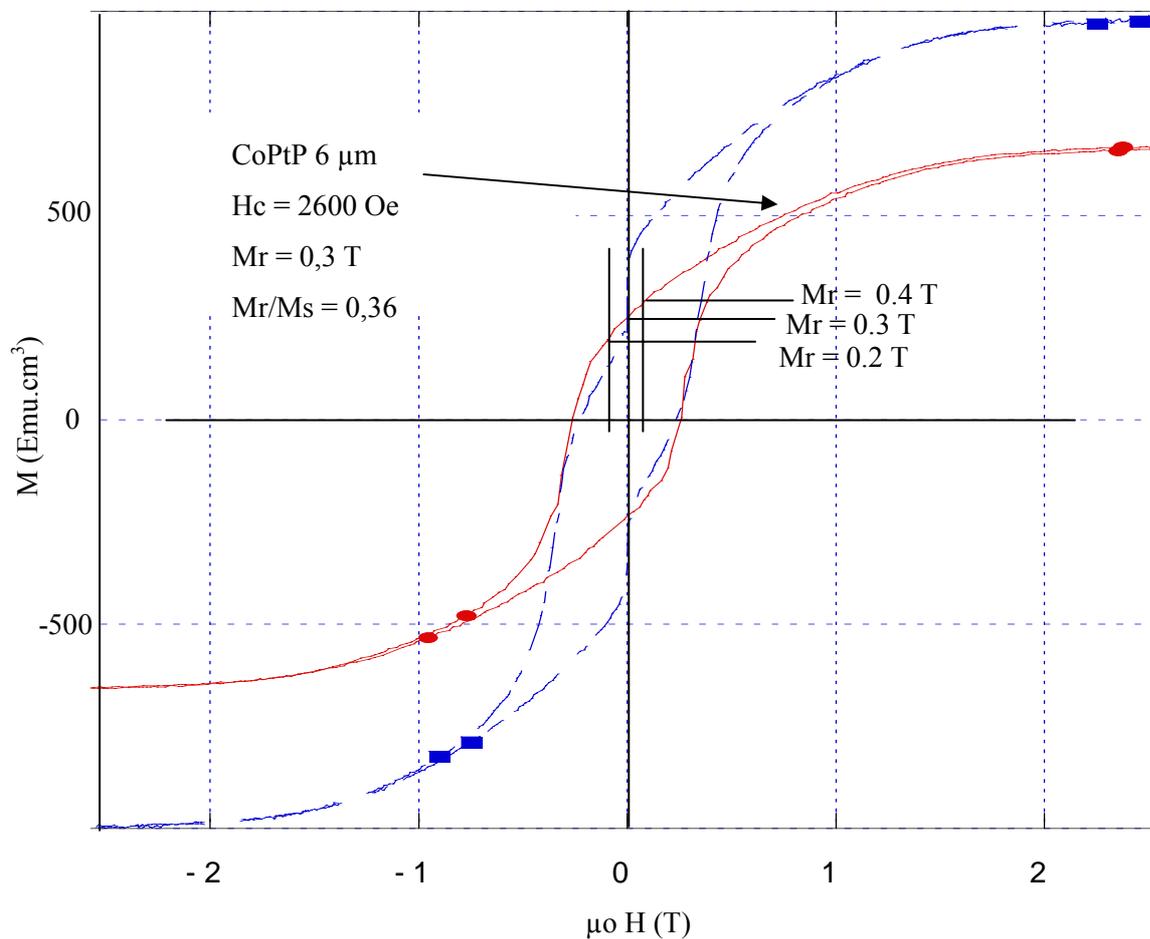
Cette maquette est donc un succès mais aussi une mise en garde contre les problèmes d'instabilités de guidage (courant de commutation trop faible et impulsion trop courte) et les problèmes de surchauffe des bobines.

II.B.4. Comment améliorer le principe

Nous avons déjà cherché à optimiser les dimensions du micro-actionneur. Mais il peut être intéressant de repenser le système dans le but de dissiper toujours moins de pertes Joule, donc de diminuer le courant.

II.B.4.1 Prise en compte des propriétés magnétiques des aimants dans la modélisation

Pour pouvoir utiliser des calculs simples et linéaires, mes simulations supposent l'utilisation d'aimants 'parfaits', c'est-à-dire ayant une rémanence constante ainsi qu'une coercivité élevée : un cycle d'aimantation carré et plus large que haut. Or cette hypothèse est fautive à la vue des courbes mesurées des propriétés magnétiques des aimants en CoPt électrodéposés que nous utilisons (cf. Graph. II.9, [GAM03]) :



Graph. II.9

Cycles d'hystérésis dans le plan XY d'une couche de 6 μm de Co-Pt-P (rouge, trait continu) et d'une multicouche de même épaisseur de Co-Pt-P/Fe-Ni (bleu, trait mixte).

En réalité, les aimants ont une coercivité faible et peuvent même être influencés par le champ magnétique des conducteurs. Dans le cas où le conducteur parcouru par un courant de plusieurs Ampères génère une induction de 0,2 Tesla au niveau des aimants fixes, ceux-ci voient leur aimantation passer à 0,4 Tesla si le champ est dans le sens de l'aimantation ou à 0,2 Tesla si le champ magnétique est dans le sens contraire de l'aimantation. Par exemple dans le cas de la Figure II.30, le conducteur est alimenté pour faire monter la partie mobile. Le champ magnétique généré autour des conducteurs s'oppose à l'aimantation naturelle des aimants fixes et diminue donc leur aimantation, ce qui diminue la force d'attraction des aimants fixes sur l'aimant mobile et permet ainsi de le faire décoller plus facilement. Au contraire, lorsque l'aimant mobile arrive en haut, il y est plus fortement attiré car l'aimantation des aimants fixes et le champ du conducteur sont dans le même sens. On obtient donc à priori une commutation plus rapide que ne le prévoient les simulations.

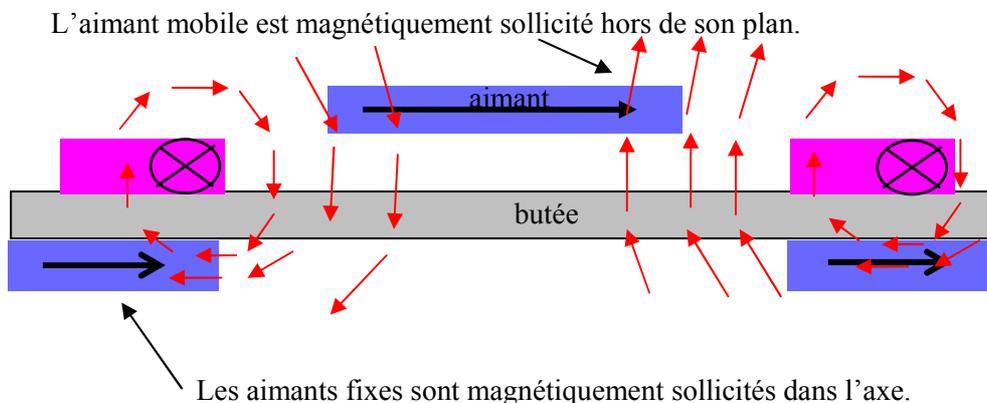


Figure II.30

Les aimants fixes subissent un champ magnétique opposé à leur aimantation qui tend à les désaimanter. L'aimant mobile subit un champ magnétique perpendiculaire à son aimantation qui tend à la réorienter.
Flèches rouges : sens du champ magnétique dû aux conducteurs.

Un problème à résoudre est donc le comportement dans le temps de ces micro-aimants. Vont-ils se désaimanter à force d'être partiellement ré-aimantés ou désaimantés? De plus, le courant dans les conducteurs crée en réalité un champ magnétique global vertical qui tend à réorienter l'aimantation de l'aimant mobile hors de son plan. Les propriétés magnétiques hors du plan étant en fait meilleures de 10 à 15 % que les propriétés dans le plan, l'aimantation ne devrait donc pas changer d'orientation tant que le courant reste inférieur à 5 A, c'est-à-dire un champ magnétique vu par les aimants inférieur à 0,1 T.

II.B.4.2 Quelle forme pour les conducteurs ?

Comme le montrent la Figure II.9 et l'EQ. II. 2, le courant doit circuler perpendiculairement en tout point aux lignes de champ pour que la force de Laplace soit maximale. Dans ce cas, il aurait été préférable de dessiner des conducteurs en arc de cercle comme le présente la Figure II.31. Cette configuration ne pose pas de problème de réalisation mais sa modélisation est complexe et nous n'avons

pas eu le temps de la faire. On ne sait donc pas si cette forme est réellement optimale (on gagne en orientation du courant, mais on perd en intensité du champ magnétique car on doit s'éloigner de l'aimant).

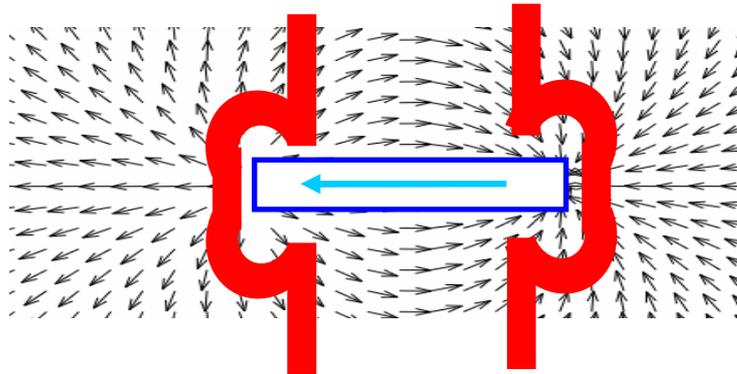


Figure II.31

Forme optimale intuitive d'un conducteur autour de l'aimant mobile.
Les flèches représentent la direction du champ magnétique autour de l'aimant.

II.B.4.3 Encore plus de conducteurs !

Si les micro-technologies l'avaient facilement permis, on aurait pu bobiner des conducteurs en solénoïde comme cela se pratique en électrotechnique classique. Ainsi, le courant à fournir par l'alimentation aurait été divisé par le nombre de conducteurs. Mais c'est aujourd'hui encore très difficile à l'échelle microscopique. Il est quand même possible de rajouter quelques conducteurs à des endroits judicieux comme par exemple sur la Figure II.32. Les deux conducteurs passant en sens contraire au dessus de l'aimant mobile (au centre) (Figure II.33) induisent une force supplémentaire à courte distance, c'est-à-dire pour le décollage, justement lorsque les forces de maintien des aimants fixes sont les plus grandes. J'ai simulé cette configuration et elle permet pour un exemple précis (8A-D30-T3-9) de passer d'un courant minimal de 200 mA à 160 mA, soit une réduction de 25% du courant de commutation ou de 44 % des pertes Joule. De plus ces conducteurs tendent à recentrer l'aimant mobile au moment où le conducteur débute sa commutation.

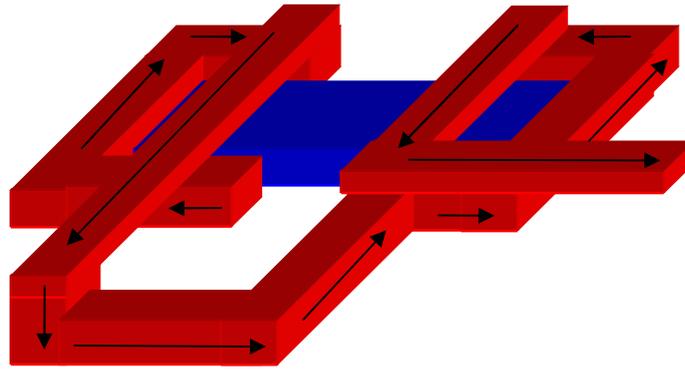


Figure II.32
Circuit complexe de conducteurs (les flèches indiquent le sens de passage du courant).

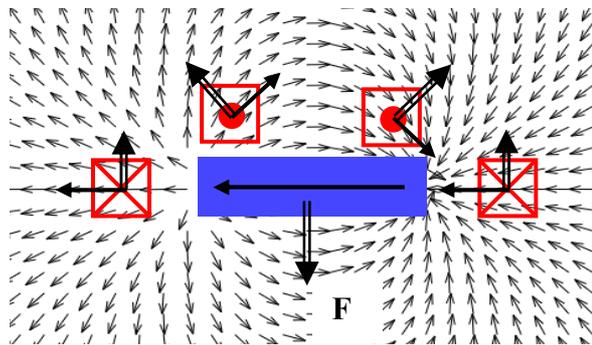


Figure II.33
Vue en coupe du circuit de la Figure II.32

A ce stade, la configuration, la géométrie, les dimensions et toutes les caractéristiques du micro-actionneur sont à peu près définies. Les dimensions d'un micro-actionneur sont présentées Figure II.34. D'après les simulations, il doit commuter en $360 \mu\text{s}$ avec un courant de $1,3 \text{ A}$. Ce micro-actionneur n'est pas optimisé mais est supposé plus facile à fabriquer grâce notamment à la grande distance entre les conducteurs et l'aimant mobile ($\text{gap} = 20 \mu\text{m}$).

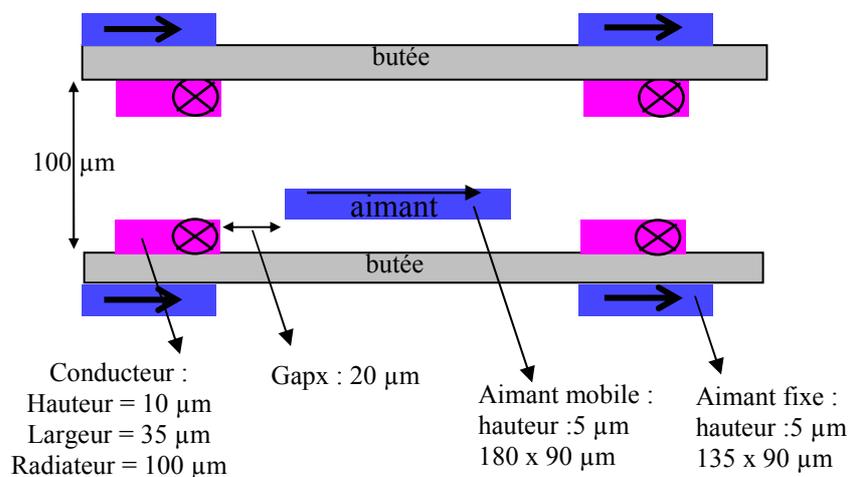


Figure II.34
Dimensions d'un micro-actionneur basique

Le micro-actionneur de la Figure II.35 a pour sa part des dimensions plus optimisées car il a des conducteurs plus proches de l'aimant mobile ($10\ \mu\text{m}$) et ses aimants fixes sont plus fins (donc une résistance aux chocs plus faible). Celui-ci devrait commuter en $340\ \mu\text{s}$ mais avec un courant de $900\ \text{mA}$. Ce micro-actionneur n'a été optimisé qu'après le début de la fabrication en salle blanche et les prototypes actuellement en cours de fabrication n'en tiennent donc pas compte.

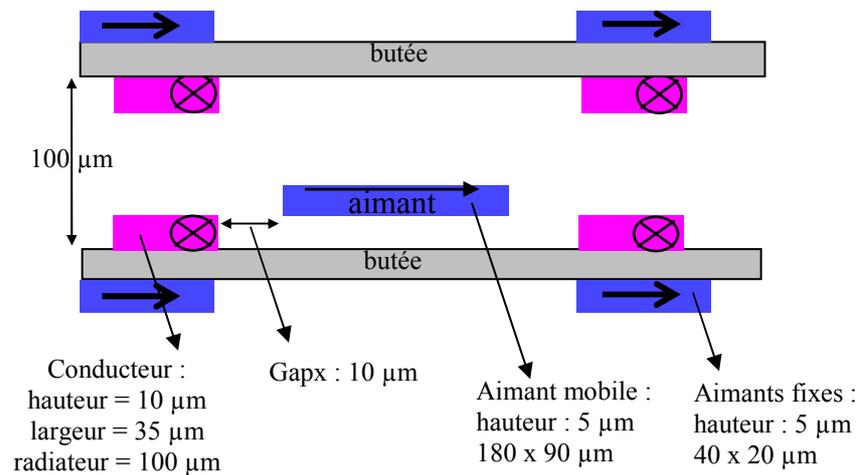


Figure II.35

Dimensions d'un micro-actionneur ayant de meilleures performances que celui de la Figure II.34.

La prochaine étape est donc la conception de la filière, c'est-à-dire l'ensemble des étapes technologiques pour fabriquer le prototype. Il y a bien sûr des modifications à faire afin de faciliter la fabrication. Mais avant cette étape importante, voyons les bases théoriques qui m'ont permis de modéliser et simuler le comportement du micro-actionneur.

II.C. MODELISATION

A l'issue de la première phase de conception, le micro-actionneur a été breveté conjointement entre l'INPG et le LETI [ROS02]. La première partie de mon travail a consisté en la rédaction de pages de calculs analytiques sous Mathcad afin de simuler les interactions entre les aimants et les conducteurs. J'ai fait un premier programme calculant uniquement les forces générées par des déplacements en translation en 2D, puis un second programme intégrant les couples, la position de l'aimant mobile avec 6 DDL et la dynamique en 3D, que l'on peut retrouver en annexe de modélisation. Ces programmes peuvent être utilisés pour tout système linéaire composé d'aimants et de conducteurs électriques mais ne comportant pas de fer. J'ai aussi été amené à utiliser le logiciel analytique-intégral Dipôle3D, fondé sur la discrétisation d'aimants, et à l'intégrer sous Mathcad. En parallèle, mon collègue J. Stepanek [STE05], [STE03] a réalisé un programme plus complet ayant les mêmes fonctionnalités sous Matlab. Fondé lui aussi sur Dipôle3D, il est très puissant pour la gestion du positionnement dans l'espace et de la dynamique.

Nous allons voir les bases analytiques de ces programmes, c'est-à-dire les interactions entre les différents types d'éléments, le problème mécanique et l'optimisation des temps de calcul.

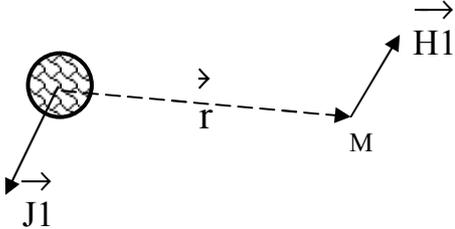
II.C.1. Forces et couples

II.C.1.1 Interaction 'Aimant-aimant'

II.C.1.1.1 Dipôle3D

Dipôle3D est un logiciel créé par J. Delamare et complété par différents Doctorants successifs. Son principe repose sur le calcul analytique intégral des interactions dipolaires entre des aimants ou des conducteurs discrétisés en éléments simples [DEL93]. Nous allons voir les grandes lignes de cette méthode.

L'Eq. II.3 nous montre l'équation du champ magnétique à une distance r d'un dipôle de volume v_1 et de polarisation magnétique J_1 .

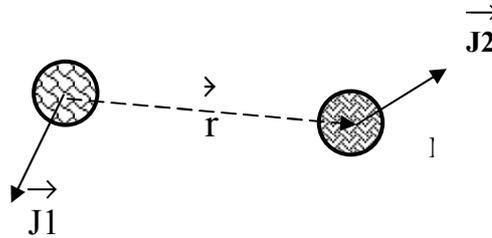


Eq. II.3

$$\vec{H}_1(M) := \frac{v_1}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot r^3} \cdot \left(3 \cdot \frac{(\vec{J}_1 \cdot \vec{r}) \cdot \vec{r}}{r^2} - \vec{J}_1 \right)$$

Champ magnétique H créé par un dipôle magnétique en un point quelconque M de l'espace.

Si un second aimant de polarisation J_2 et de volume v_2 est placé en un point M dans le champ magnétique de J_1 , l'énergie d'interaction est le produit scalaire $J_2 \cdot H_1 \cdot v_2$ (Eq. II.4).



$$W_i = \frac{v_1 \cdot v_2}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot r^3} \cdot \left(\overrightarrow{J_1} \cdot \overrightarrow{J_2} - 3 \cdot \frac{(\overrightarrow{J_1} \cdot \overrightarrow{r}) \cdot (\overrightarrow{J_2} \cdot \overrightarrow{r})}{r^2} \right) \quad \text{Eq. II.4}$$

Énergie d'interaction entre deux dipôles.

La force entre les deux éléments est égale au gradient de l'énergie, et le couple est le produit vectoriel entre $J_2 \times v_2$ et $H_1(M)$ (Eq. II.5).

$$\begin{aligned} \overrightarrow{F} &= -\text{grad } W_i \\ \overrightarrow{\Gamma}(M)_{12} &= J_2 v_2 \times H_1(M) \end{aligned} \quad \text{Eq. II.5}$$

Force et couple entre deux dipôles magnétiques.

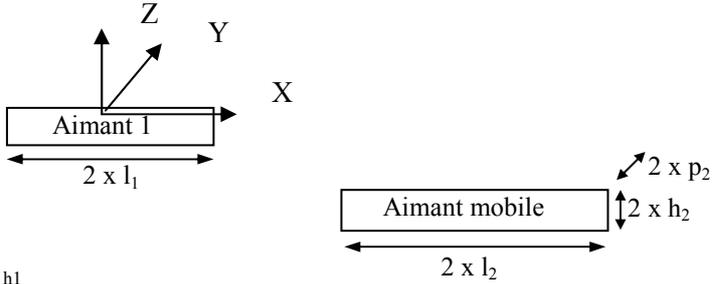
Pour appliquer ces relations à des aimants ayant des dimensions finies, il faut les discrétiser en morceaux suffisamment petits pour être assimilés à des dipôles paraissant ponctuels à une certaine distance par rapport aux dipôles élémentaires avec lesquels ils interagissent ; puis sommer les interactions (force, couple, champ) sur l'ensemble des éléments.

II.C.1.1.2 Analytique

Cette méthode de calcul a été développée par des chercheurs du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble [AKO84]. Elle permet d'obtenir des résultats exacts à partir d'équations fondées sur des sommes ou des fonctions basiques telles que Ln ou Arctan (Eq. II.6), d'où la facilité d'intégrer cette méthode dans des logiciels comme Mathcad ou Mathematica. Cette méthode permet de calculer des forces entre des aimants parallélépipédiques, ainsi que le champ magnétique aux alentours d'un aimant. Ses avantages sont l'exactitude et la rapidité. Son principal désavantage est qu'elle ne fonctionne pas pour des géométries complexes ou lorsqu'il existe un angle entre les deux aimants étudiés.

Position du centre (O'(a,b,c)) de l'aimant mobile par rapport au milieu de l'aimant fixe 1 :

$a1(x) = x + l1 + l2 + esp$
 $b1(y) = y$
 $c1(z) = -z$



Calculs pour l'aimant 1 :

$u(y, i, j) = b1(y) + (-1)^j \cdot p2 - (-1)^i \cdot p1$
 $v(z, k, k2) = c1(z) + (-1)^{k2} \cdot h2 - (-1)^k \cdot h1$
 $w(x, m, n) = a1(x) + (-1)^n \cdot l2 - (-1)^m \cdot l1$
 $r(u, v, w) = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)}$

$\Phi_z(u, v, w, r) := \frac{1}{2} \cdot (u^2 - w^2) \cdot \ln(r - v) + u \cdot v \cdot \ln(r - u) + u \cdot w \cdot \arctan\left(u \cdot \frac{v}{r \cdot w}\right) + \frac{r}{2} \cdot v$

$F1x(x, y, z) = \left[\frac{(J1 \cdot J2)}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{k2=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 \left[(-1)^{(i+j+k+k2+p+q)} \cdot \Phi_z(u(y, i, j), v(z, k, k2), w(x, p, q), r(u(y, i, j), v(z, k, k2), w(x, p, q))) \right] \right]$

$\Phi_y(u, v, w, r) := \frac{1}{2} \cdot (v^2 - w^2) \cdot \ln(r - u) + u \cdot v \cdot \ln(r - v) + v \cdot w \cdot \arctan\left(u \cdot \frac{v}{r \cdot w}\right) + \frac{r \cdot u}{2}$

$F1y(x, y, z) := \left[\frac{(J1 \cdot J2)}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{k2=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 \left[(-1)^{(i+j+k+k2+p+q)} \cdot \Phi_y(u(y, i, j), v(z, k, k2), w(x, p, q), r(u(y, i, j), v(z, k, k2), w(x, p, q))) \right] \right]$

$\Phi_x(u, v, w, r) := -u \cdot w \cdot \ln(r - u) - w \cdot v \cdot \ln(r - v) + u \cdot v \cdot \arctan\left(u \cdot \frac{v}{r \cdot w}\right) - r \cdot w$

$F1x(x, y, z) = \left[\frac{(J1 \cdot J2)}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{k2=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 \left[(-1)^{(i+j+k+k2+p+q)} \cdot \Phi_x(u(y, i, j), v(z, k, k2), w(x, p, q), r(u(y, i, j), v(z, k, k2), w(x, p, q))) \right] \right]$

Eq. II.6

Équations utilisées pour le calcul de la force exercée par un aimant 1 sur l'aimant mobile

II.C.1.1.3 Méthode des surfaces

Cette technique repose sur la méthode des surfaces en électrostatique pour en déduire des forces entre deux aimants. Elle utilise une équivalence entre les charges électrostatiques et les charges magnétiques. Sur la Figure II.36, la polarisation du dipôle électrostatique devient la polarisation magnétique $M (= J/\mu_0)$ et le champ électrique E devient le champ magnétique H .

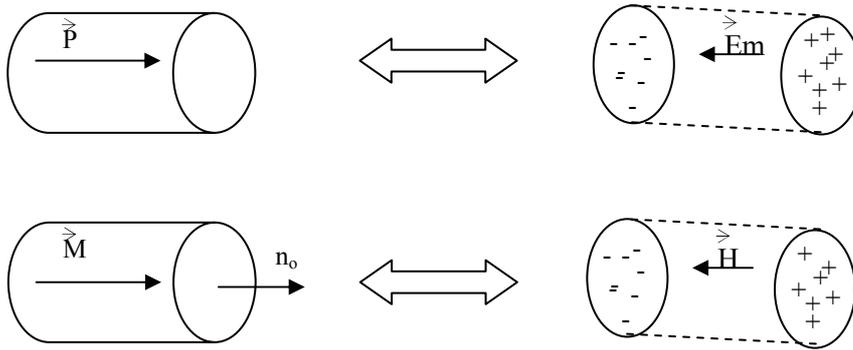


Figure II.36

Parallèle entre la méthode des surfaces en électrostatique (en haut) et en magnétique (en bas).

La force provenant d'un champ magnétique B externe devient alors :

$$\vec{F} = \int_{(V)} \rho_m \vec{B} dV + \int_{(S)} \sigma_m \vec{B} dS$$

Où B est l'induction magnétique, ρ_m est la densité volumique de charge et σ_m la densité surfacique de charges magnétiques. Dans un aimant, l'aimantation pouvant être considérée comme constante, la densité de charge volumique est nulle. La première intégrale est donc nulle et le calcul se ramène à un calcul surfacique :

$$\vec{F} = \int_{(S)} \sigma_m \vec{B} dS$$

Dans notre cas les aimants sont de forme parallélépipédique, avec une aimantation constante suivant leur longueur. Si l'aimantation n'est pas alignée selon un axe il faut la décomposer selon les trois axes et intégrer sur les 6 surfaces (Figure II.37).

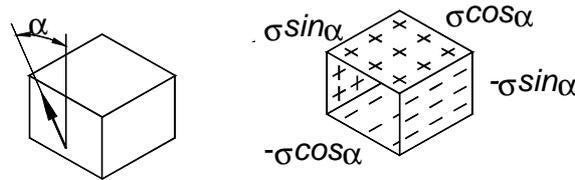


Figure II.37

Décomposition d'une aimantation orientée avec un angle α en surfaces chargées magnétiquement pour pouvoir appliquer la méthode des surfaces.

Exprimons la densité surfacique de charge magnétique:

$$\sigma_m = \vec{M} \cdot \vec{n}_o \quad \text{Avec } n_o \text{ normale à la surface.}$$

Nous savons que

$$\vec{M} = \frac{\vec{J}}{\mu_0}$$

donc

$$\sigma_m = \frac{\vec{J}}{\mu_0} \cdot \vec{n}_0 = \frac{J}{\mu_0}$$

Car l'aimantation est toujours parallèle au vecteur normal de la surface. Alors on a :

$$\vec{F} = \int_{(S)} \frac{J}{\mu_0} \vec{B} dS = J \cdot \int_{(S)} \vec{H} dS \quad \text{Equ. II.7}$$

Cette méthode est plus coûteuse en temps que la méthode analytique précédente car elle fait appel à un calcul d'intégrale double. Mais elle permet quand même de passer d'une intégrale triple à une intégrale double. Grâce à cette méthode il est possible de calculer des forces sur des aimants positionnés n'importe où dans l'espace et suivant n'importe quel angle. En effet, il suffit de connaître le champ magnétique uniquement sur la surface de l'aimant pour pouvoir calculer la force. Et, grâce à la méthode analytique, nous connaissons le champ magnétique d'un aimant en tout point de l'espace. Par contre cette méthode est plus délicate à utiliser pour calculer les couples car il faut que les conducteurs suivent bien des boucles de courants fermées et ne soient pas limités à un parallélépipède isolé dans l'espace.

II.C.1.2 Interaction 'Aimant-courant' : Force de Laplace

Le micro-actionneur commute d'une position stable à l'autre grâce à du courant circulant dans des conducteurs. Le calcul de la force engendrée peut se faire de plusieurs manières : selon la méthode dipolaire (1), grâce à la formule de Laplace en connaissant le champ généré par l'aimant mobile sur les conducteurs (2), ou alors en connaissant le champ généré par le conducteur et en appliquant la formule de la méthode des surfaces vue précédemment (3).

II.C.1.2.1 Dipôle3D

La méthode de calcul diffère si l'on considère l'action d'un aimant élémentaire sur un courant élémentaire ou vice-versa. La manière la plus simple consiste à considérer la force exercée par un aimant sur un courant (cf Figure II.38). Comme présenté dans l'Eq. II.8 le principe repose sur la force de Laplace. Le conducteur élémentaire a une densité de courant δc , un volume v_c et une direction dl . L'aimant élémentaire est défini par sa polarisation magnétique J_a et son volume v_a . Pour calculer la force entre un conducteur et un aimant, il faut faire la somme de toutes les forces entre chacun des éléments.

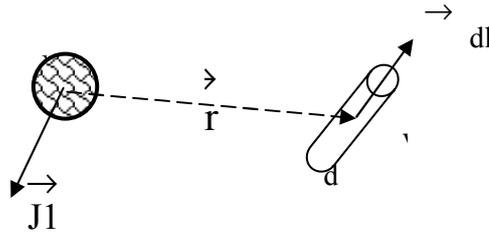


Figure II.38

Schéma de l'interaction d'un aimant élémentaire sur un courant élémentaire.

Force de Laplace:

$$\vec{dFac} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{Bac}$$

$$\vec{dFac} = \delta\vec{c} \cdot d\vec{Sc} \cdot d\vec{l} \times \vec{Bac}$$

$$\vec{dFac} = v\vec{c} \cdot \delta\vec{c} \times \vec{Bac}$$

Or on connaît B_{ac} grâce au calcul de la force entre deux dipôles magnétiques.

$$\vec{dFac} = v\vec{c} \cdot \delta\vec{c} \times \left[\frac{v_a}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot r^3} \cdot \left(3 \cdot \frac{(\vec{J}_a \cdot \vec{r})}{r^2} \cdot \vec{r} - \vec{J}_a \right) \right] \quad \text{Eq. II.8}$$

Méthode de calcul de la force entre un aimant et un courant élémentaires.

II.C.1.2.2 Laplace (analytique)

Dans ce cas aussi j'utilise aussi la force de Laplace, mais au lieu de discrétiser les éléments en volumes élémentaires, je les considère comme un ensemble et je résous une intégrale triple sur le volume de tout le conducteur. Le champ magnétique de l'aimant mobile est donné par le calcul analytique du champ (II.C.1.1.2). Cette intégrale est assez compliquée à résoudre et ne facilite pas le passage du problème bidimensionnel au problème tridimensionnel (Eq. II.9).

$$Fz12(zmobile) = \int_{ypos1-\frac{longcond}{2}}^{ypos1+\frac{longcond}{2}} \int_{zpos1(zmobile)-\frac{haut}{2}}^{zpos1(zmobile)+\frac{haut}{2}} \int_{xpos1-\frac{largcond}{2}}^{xpos1+\frac{largcond}{2}} 2densI \cdot Bx(x, y, z) dy dz dx$$

Description du volume du conducteur
Champ magnétique de l'aimant

Densité de courant

Eq. II.9

Calcul de force en analytique par la méthode de Laplace

II.C.1.2.3 Méthode des surfaces (aimants) ⊕ Biot et Savart (courants)

Nous avons vu précédemment que pour appliquer la méthode des surfaces, il suffit d'intégrer le champ magnétique global sur les surfaces de l'aimant mobile. On connaît déjà le champ des aimants fixes, il reste à calculer celui des conducteurs. Le calcul de champ est basé sur la loi de Biot et Savart (Eq. II.10).

$$\vec{H}_{ca} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\vec{i} \cdot d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \tag{Eq. II.10}$$

Loi de Biot et Savart

Dans ce cas aussi il faut calculer une intégrale triple pour trouver la valeur du champ, ce qui est assez long en temps de calcul. L'Eq. II.11 montre le calcul d'une des composantes du champ pour un conducteur de la Figure II.39.

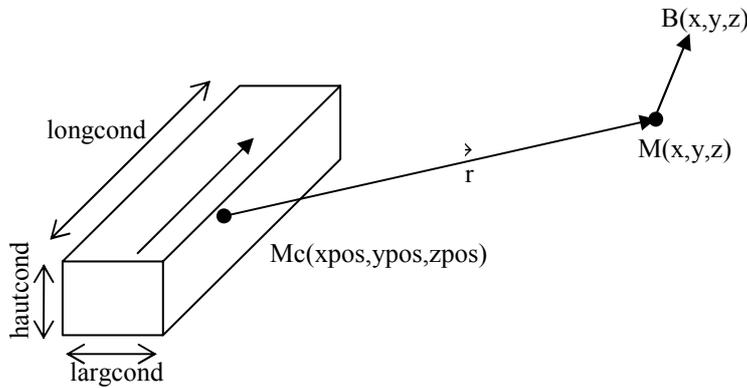


Figure II.39 Schéma du calcul du champ magnétique créé autour de lui par un conducteur.

$$B_{xcl}(x, y, z, I) = \int_{xpos1 - \frac{largcond}{2}}^{xpos1 + \frac{largcond}{2}} \int_{ypos1 - \frac{longcond}{2}}^{ypos1 + \frac{longcond}{2}} \int_{zpos1 - \frac{hautcond}{2}}^{zpos1 + \frac{hautcond}{2}} \frac{\mu \cdot \frac{I}{hautcond \cdot largcond}}{4\pi} \cdot \frac{z - zc}{[\sqrt{(x - xc)^2 + (y - yc)^2 + (z - zc)^2}]^3} dzc dyc dxc$$

Eq. II.11

Calcul du champ magnétique créé par un conducteur en tout point de l'espace.

Pour chaque conducteur il y a trois composantes à calculer, chaque composante étant le résultat d'une intégrale triple. Les variables d'intégration sur le conducteur sont xc, yc et zc et les bornes d'intégration sont les dimensions du conducteur.

Le point fort de la méthode, c'est qu'ensuite le calcul de la force de tous les éléments du système sur l'aimant mobile est centralisé par le calcul d'une seule intégrale de surface (Equ (II.7) de la méthode des surfaces). Ceci facilite le calcul des rotations du micro-aimant mobile.

II.C.2. Accélération des calculs

Un calcul de force en lui-même n'est pas long, mais il y a une douzaine de conducteurs, deux composantes de champ magnétique à calculer par conducteur ainsi que trois composantes de force. Cette opération doit être répétée une dizaine de fois pour tracer une courbe de la force en fonction du déplacement. Et plus encore pour un calcul de dynamique... Il est donc important de raccourcir au tant que possible les temps de calcul.

II.C.2.1 Analytique : Intégrale de Gauss

Afin d'accélérer le calcul des forces qui prenait environ 5 secondes, j'ai transformé ces intégrales en sommes de Gauss. Le calcul se fait alors en moins d'une seconde. L'erreur de numérisation est inférieure à 5% en comparaison avec la solution analytique et peut être diminuée en utilisant plus de points de Gauss au détriment du temps de calcul. La méthode de Gauss est utilisée de manière classique dans les méthodes d'éléments finis [BAT].

Pour gérer de façon plus efficace les rotations d'aimants (une partie d'une face de l'aimant mobile est contre un aimant fixe et l'autre partie s'en éloigne) les surfaces de l'aimant sont découpées en morceaux. L'intégrale de Gauss est effectuée sur chacun de ces morceaux. Ceci permet d'utiliser des coefficients de Gauss plus faibles (d'ordre 3) tout en gardant une bonne fiabilité.

Les équations ci-dessous présentent la méthode d'intégration numérique de Gauss. A partir du moment où cette méthode est utilisée, on perd tous les bénéfices de l'analytique en précision puisqu'on effectue une numérisation. Mais il y a peu de risques d'amplifier ces erreurs puisque cette numérisation n'intervient qu'à la fin des calculs.

$$F_{xcn3}(\theta_x, \theta_y, \theta_z, x_t, y_t, z_t, I) = \int_{-\frac{\text{largm}}{2}}^{\frac{\text{largm}}{2}} \int_{-\frac{\text{haut}}{2}}^{\frac{\text{haut}}{2}} \frac{Bc3x\left(\frac{\text{longm}}{2}, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z, x_t, y_t, z_t, I\right)}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} dz dy$$

A partir d'une intégrale double classique...

$$F_{xcn3}(\theta_x, \theta_y, \theta_z, x_t, y_t, z_t, I) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{Bc3x\left(\frac{\text{longm}}{2}, y \cdot \frac{\text{largm}}{2}, z \cdot \frac{\text{haut}}{2}, \theta_x, \theta_y, \theta_z, x_t, y_t, z_t, I\right) \cdot \frac{\text{largm} \cdot \text{haut}}{2 \cdot 2}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} dz dy$$

...en la mettant sous une forme adaptée...

$$P3 = \begin{pmatrix} \frac{5}{9} \\ \frac{8}{9} \\ \frac{5}{9} \end{pmatrix} \quad u3 = \begin{pmatrix} -\sqrt{\frac{3}{5}} \\ 0 \\ \sqrt{\frac{3}{5}} \end{pmatrix} \quad u6 = \begin{pmatrix} -0.932469514203152 \\ -0.661209386466265 \\ -0.238619186083197 \\ 0.238619186083197 \\ 0.661209386466265 \\ 0.932469514203152 \end{pmatrix} \quad P6 = \begin{pmatrix} 0.171324492379170 \\ 0.360761573048139 \\ 0.467913934572691 \\ 0.467913934572691 \\ 0.360761573048139 \\ 0.171324492379170 \end{pmatrix}$$

n3 = 2

n6 = 5

n7 = 6

...on peut, grâce aux coefficients de Gauss [BAT],...

$$F_{xcg3}(\theta_x, \theta_y, \theta_z, x_t, y_t, z_t, I) = \sum_{g=0}^{n3} \sum_{h=0}^{n3} P_g \cdot P_h \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{largm}{2} \cdot \frac{haut}{2} \cdot \left(Bc3x \left(\frac{longm}{2}, u_g \cdot \frac{largm}{2}, u_h \cdot \frac{haut}{2}, \theta_x, \theta_y, \theta_z, x_t, y_t, z_t, I \right) \dots \right) \\
 + Ba3x \left(\frac{longm}{2}, u_g \cdot \frac{largm}{2}, u_h \cdot \frac{haut}{2}, \theta_x, \theta_y, \theta_z, x_t, y_t, z_t \right) \dots$$

Eq. II.12

...mettre cette intégrale sous une forme de sommes simples.

II.C.2.2 Dipôle3D: Discrétisation des aimants

Dipôle 3D calcule les interactions entre des éléments discrétisés. Plus les aimants et les conducteurs sont découpés finement et plus le calcul sera précis, mais en contrepartie les calculs seront beaucoup plus nombreux (multipliés par le nombre d'éléments rajoutés) et donc le temps de calcul plus long. Il y a un moyen de garder une bonne précision tout en améliorant le temps de calcul : il consiste à découper finement les pôles des aimants, car c'est là que le gradient de flux est le plus important et plus grossièrement le centre de l'aimant, qui intervient moins dans les interactions (Figures II.33 et II.34).

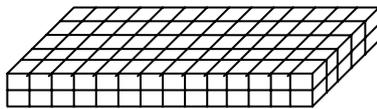


Figure II.40
Discrétisation uniforme d'un aimant

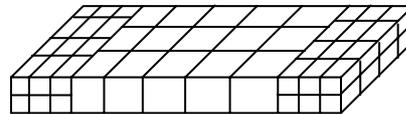


Figure II.41
Discrétisation adaptée d'un aimant

II.C.3. Aspect mécanique

Une fois fini le programme calculant les forces et les couples, il faut trouver un moyen plus pragmatique d'utiliser ces résultats. Il est intéressant de se poser le problème du comportement de l'aimant mobile durant son déplacement. L'aimant mobile peut-t-il se retourner durant la commutation ? Quelle va être sa vitesse de commutation ? Pour quel courant ? Le seul moyen de trouver réponse à ces questions est de se poser le problème du point de vue de la mécanique : soit un solide massique indéformable libre dans l'espace et subissant différents forces et couples. "Dans l'espace" signifie que nous allons travailler en trois dimensions avec des rotations, et 'massique' qu'il va falloir se poser le problème des matrices d'inertie. La solution du problème passe par la résolution des équations de la dynamique.

II.C.3.1 Rotation

II.C.3.1.1 Euler

Pour pouvoir prendre en compte toutes les configurations possibles lors du déplacement, l'aimant mobile doit pouvoir s'incliner par rapport aux aimants fixes (cf. Figure II.42). Je définis les trois rotations autour des axes x , y et z : Θ_x , Θ_y , Θ_z . Ces rotations vont nous aider à calculer la position et le mouvement de l'aimant mobile pendant la commutation.

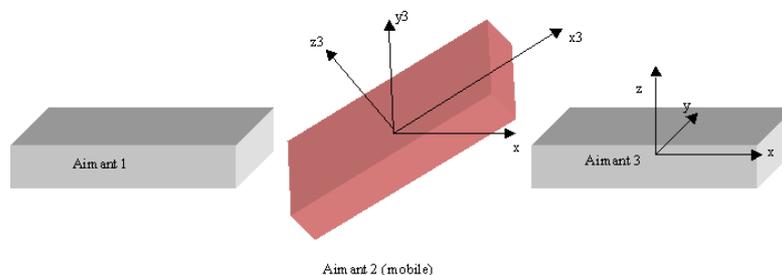


Figure II.42

Schéma d'un aimant mobile ayant une position quelconque entre deux aimants fixes.

Le passage du repère fixe au repère mobile se fait par une rotation suivant l'axe x , puis y , puis z . J'obtiens ainsi une matrice de passage M_{p3} qui permet de passer du repère fixe au repère mobile.

Malheureusement cette méthode n'est pas adaptée à des mouvements libres dans l'espace selon les trois degrés de rotations. Pour cela il faut utiliser un autre système de rotation utilisé pour le mouvement des satellites : les quaternions. La méthode reste néanmoins utile lorsque les rotations sont autour d'un ou deux axes seulement, ou que les angles sont petits.

II.C.3.1.2 Quaternions

L'étude des quaternions pour nos dispositifs a été menée par J. Stepanek [STE05]. Le principe n'est plus basé sur trois composantes angulaires mais sur trois composantes qui définissent la direction du vecteur global de rotation plus une composante qui définit l'amplitude de la rotation (Figure II.43).

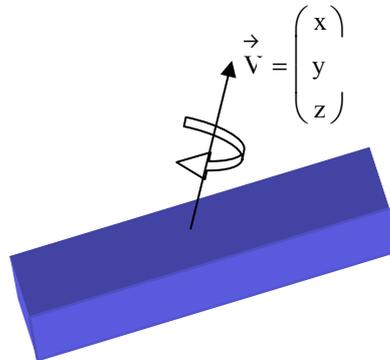


Figure II.43
Schéma du principe de la rotation avec des Quaternions.

II.C.3.2 Matrice d'inertie

Afin de pouvoir écrire la totalité des équations de la dynamique, il nous manque encore la matrice d'inertie du système puisque nous avons déjà les forces et les couples.

La matrice d'inertie d'un pavé se trouve dans la plupart des ouvrages scolaires de mécanique. Pour un pavé de longueur a suivant x, b suivant y et c suivant z et de densité 11,3 (20% de Platine et 80% de Cobalt) on obtient la matrice de l'Eq. II.13 :

b = largm

c = haut

m = a · b · c · 11300

kg = ■ kg

$$Minertiemobile = \begin{bmatrix} \frac{m \cdot (b^2 + c^2)}{12} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m \cdot (a^2 + c^2)}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m \cdot (a^2 + b^2)}{12} \end{bmatrix}$$

Matrice d'inertie de l'aimant mobile dans son repère propre (repère mobile).

Eq. II.13
Matrice d'inertie d'un pavé.

Cette matrice est définie dans le repère lié à l'aimant mobile. Or on applique le théorème de la dynamique dans le repère fixe, il faut donc faire un changement de repère comme le présente l'Eq. II.14 ci-dessous :

$$I(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = M_{p3}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)^T \cdot M_{inertie\ mobile} \cdot M_{p3}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$$

Eq. II.14
changement de repère de la matrice d'inertie

II.C.3.3 Equation de la dynamique : discrétisation

La partie dynamique du programme se présente comme une boucle itérative dans laquelle on introduit des valeurs initiales et qui calcule une matrice de vecteurs représentant les déplacements, vitesses, accélérations, angles... L'intégration des équations de la dynamique est basée sur la méthode des différences finies d'ordre 1. La méthode du calcul des forces est présentée dans l'Eq. II.15. Le principe est le même pour le calcul des couples (Eq. II.16) sauf qu'il faut d'abord développer le produit entre la matrice d'inertie et le vecteur d'accélération angulaire. Le résultat de l'itération est stocké dans un fichier qui est réutilisé pour visualiser les données et faire une animation de l'évolution du système (programme également réalisé sous Mathcad).

$$F_X(t) = m \cdot \frac{d^2}{dt^2} X(t) \quad \frac{d^2}{dt^2} X(t) = \frac{d}{dt} V_X(t)$$

$$F_X(t) = m \cdot \frac{d}{dt} V_X(t)$$

$$\Delta V_X = \frac{F_X(t)}{m} \cdot \Delta t$$

$$V_{X_{t+1}} = V_{X_t} + \frac{F_X(t)}{m} \cdot (t_{t+1} - t_t)$$

or
$$V_{X_{t+1}} = \frac{X_{t+1} - X_t}{t_{t+1} - t_t}$$

donc
$$X_{t+1} = X_t + V_t \cdot \Delta t + \frac{F_X(t)}{m} \cdot (\Delta t)^2$$

Eq. II.15
Discrétisation des équations de la dynamique

$$\vec{\Gamma} = I \cdot \frac{d^2 \vec{\Theta}}{dt^2}$$

Eq. II.16
Équation différentielle du couple

II.C.4. Logiciels et programmes

Je vais présenter ici les différents programmes que j'ai utilisés durant ma thèse. Pourquoi en ai-je favorisés certains et délaissés d'autres ? Les capacités de calcul, la convivialité de l'interface et les limitations du logiciel sont les principales raisons.

II.C.4.1 Logiciels

II.C.4.1.1 Mathcad : [MCD]

C'est le logiciel choisi pour rédiger le programme de dynamique. Son point fort est une interface présentée comme une feuille blanche où les calculs peuvent être écrits où on le souhaite, sous une forme graphique littérale facile à intégrer sous Word. L'unique règle est l'ordre des calculs de haut en bas. Il s'agit d'un logiciel de maths classique, avec des fonctions analogiques et numériques. En option, on peut assez facilement réaliser des dessins en 3D et des animations de l'actionnement du micro-actionneur. Il présente néanmoins certains bugs et certaines choses non intuitives notamment dans l'écriture des calculs.

II.C.4.1.2 Dipôle3D

Crée en 1991 par J. Delamare en langage C et complété au fil des ans par divers doctorants et DEA, Dipôle3D est basé sur la discrétisation volumique des éléments. Il peut calculer les forces et les couples entre des aimants et des conducteurs. Il est fiable et puissant, mais il lui manque encore une interface ergonomique pour gérer facilement les données et obtenir des graphiques. Ce programme a été intégré sous Mathcad pour pallier à ce problème et le résultat est bon. Mais la modification de l'architecture du micro-actionneur est compliquée car il faut l'écrire dans le programme en C puis recompiler les fichiers pour qu'ils soient lisibles sous Mathcad ou Matlab. J. Stepanek et B. Delinchant [DELI04] ont intégré ce programme sous Simulink (Matlab) afin de réaliser un programme de simulation dynamique de micro-actionneurs magnétiques.

II.C.4.1.3 Radia : [RAD]

Fonctionnant sous Mathematica, Radia est un programme de simulation électromagnétique développé par l'ESRF Grenoble (Synchrotron). Radia est très efficace car il calcule aussi les éléments de type fer (matériaux magnétique doux non linéaires), permet de dessiner automatiquement les systèmes 3D étudiés et s'intègre dans l'interface Mathematica habituelle. Malheureusement nous n'avons pas réussi à adapter Radia à nos géométries avec certaines dimensions μ -métriques.

II.C.4.1.4 Flux 2D-3D: [FLU]

C'est un logiciel de type éléments finis dédié à l'électromagnétisme créé au LEG et développé par Cedrat. Très puissant dans sa version 3D, il est plus lourd à utiliser et est réservé aux études poussées. Il

est aussi peu malléable pour pouvoir faire des optimisations. La simulation en 2D est facile mais n'est pas suffisamment précise pour être intéressante dans notre cas (car notre problème est 3D). Surtout, il n'est pas facile à interfacer avec Pro@Design pour réaliser des optimisations car c'est un logiciel d'éléments finis et donc non analytique.

II.C.4.1.5 Comparaison des logiciels

Radia a été écarté à cause d'un petit bug rédhibitoire pour nous et de ses problèmes d'adaptation à nos systèmes ce qui est dommage car c'est un bon logiciel de magnétisme, doté d'une interface agréable. Flux (2D ou 3D) ne correspond pas à notre attente en matière de rapidité et malléabilité. Il reste alors Mathcad, où il a donc fallu intégrer toutes les équations relatives aux interactions 'aimant-aimant' et 'aimant-courant' ainsi que l'aspect mécanique du problème. J'ai aussi réalisé une interface entre Mathcad et Dipôle3D qui offre des possibilités en matière d'optimisation. Le programme qui sera retenu pour les futurs micro-actionneurs est l'adaptation de Dipôle3D sous Simulink par J.Stepanek qui utilise une résolution du problème dynamique avec des quaternions.

Pour valider les différents programmes, des comparaisons ont été réalisées, par exemple entre Mathcad et Dipôle3D, entre la méthode des surfaces, la méthode analytique, la méthode discrétisée, et la force de Laplace analytique. Cette façon de procéder a permis de corriger de nombreuses erreurs et de montrer la cohérence des méthodes à quelques pourcents près.

II.C.5. Conclusion

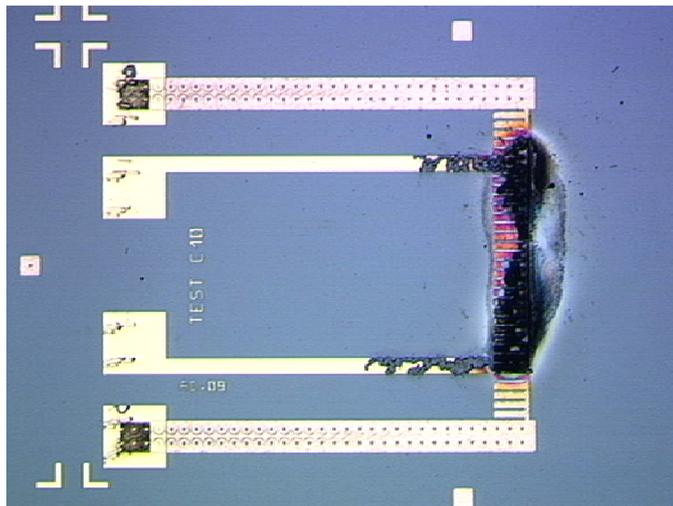
Après une première phase de conception où nous avons ébauché les grands principes du micro-actionneur (sa bistabilité et son mode de commutation), nous nous sommes attachés à évaluer ses propriétés mécaniques. Bien que la bistabilité ne soit pas si facile à obtenir avec la géométrie que nous avons choisie, il existe quand même des dimensions satisfaisant nos conditions. Bien que la partie mobile subisse une force verticale durant son déplacement, rien ne l'empêche de tourner autour d'un de ses axes. L'inertie joue donc un grand rôle en stabilisant la partie mobile durant la commutation. Une fois en butée, l'aimant mobile retrouve une position centrée. La phase d'optimisation nous donne des pistes ainsi que des dimensions concrètes pour diminuer l'énergie de commutation. Ainsi, l'actionnement nécessite des fortes densités de courant pour être énergétiquement efficace. Nous allons donc étudier dans le prochain chapitre le problème de l'échauffement des conducteurs par effet Joule.

CHAPITRE III. ETUDE THERMIQUE

Résumé :

Nous avons mené une étude expérimentale et théorique de l'échauffement d'un conducteur de taille micrométrique pendant une impulsion de courant. Cette étude a démontré l'utilité d'utiliser des radiateurs intégrés au conducteur qui permettent d'absorber la chaleur sans modifier la densité de courant. Ainsi la densité de courant critique est passée de 40 000 A/mm² à 90 000 A/mm². L'étude expérimentale a permis d'affiner la constante thermique des matériaux. Le modèle sous Flux 2D a montré une bonne corrélation avec l'expérience.

CHAPITRE III. ETUDE THERMIQUE



Game Over...

III.A. INTRODUCTION

Dans un bobinage de moteur électrique classique, la densité de courant maximale admissible en continu est d'environ 3 à 5 A/mm², avant surchauffe puis dégradation du bobinage, parfois jusqu'à 30 A/mm² pour un démarreur de voiture par exemple, mais pendant quelques secondes seulement. Dans notre cas, nous devons utiliser des impulsions de courant pouvant aller jusqu'à 5 A dans des conducteurs de section 10 x 10 μm² pour les plus fins. Ceci correspond à des densités de courant de l'ordre de 50 000 A/mm²! À de telles densités, dans une bobine classique la surchauffe et la destruction du conducteur sont immédiates : pourquoi peut-on se permettre cela aux dimensions microniques ?

Tout d'abord un microsystème se refroidit principalement par conduction via son substrat, plutôt que dans l'air par convection; le substrat est généralement en silicium, qui est un excellent conducteur de la chaleur. Ensuite, dans notre système la commutation se fait par impulsion de courant de l'ordre de la milliseconde ou moins [KOS97], ce qui laisse le temps au système d'évacuer ou de répartir la chaleur avant surchauffe locale et destruction ; notons que l'impulsion suivante ne doit pas avoir lieu trop tôt après la première.

Un autre facteur positif est l'augmentation du rapport de la surface du conducteur (qui dissipe la chaleur) sur son volume (qui la produit) lorsqu'on réduit ses dimensions (Figure III.1). La dissipation thermique (par conduction ou convection) n'en devient que meilleure. Ce rapport surface sur volume est encore amplifié par le fait que les micro-conducteurs sont généralement plats et non cylindriques.

Ainsi, en μSystèmes Magnétiques, on peut généralement se permettre de très fortes densités de courant, qui nous permettent d'obtenir des forces magnétiques importantes [CUG02].

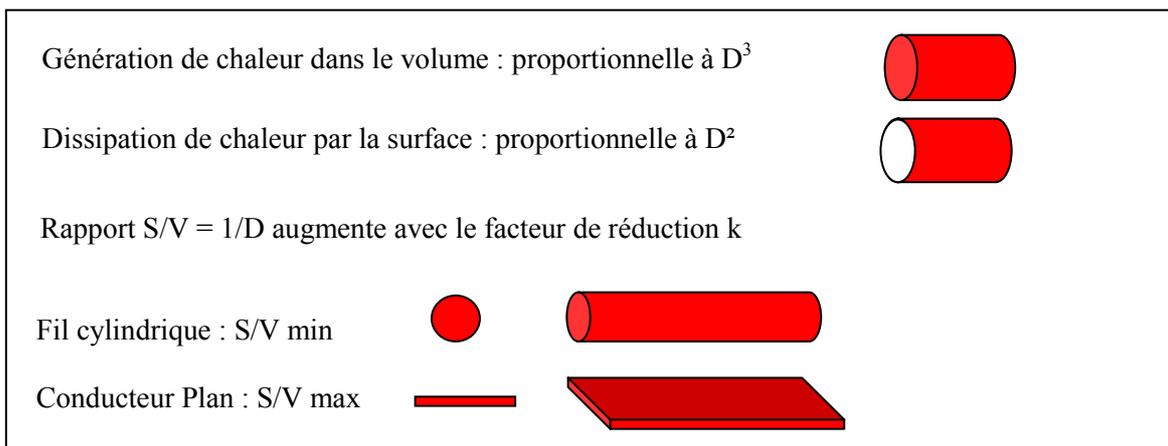


Figure III.1

Evolution du rapport surface sur volume de conducteurs lors d'une réduction d'échelle.

De plus, les transferts de chaleur sont en $\Delta T^2/\Delta d$. Ce qui signifie que les gradients thermiques sont multipliés par k lorsqu'on réduit les dimensions d'un même facteur, d'où une conduction plus efficace.

Afin de mieux comprendre le comportement thermique des conducteurs dans le cas spécifique de notre micro-actionneur nous avons fait des expériences sur des puces tests couplées à des simulations thermiques. Le logiciel utilisé est Flux2D (logiciel d'éléments finis) en mode thermique évolutif. L'utilisation de la version 3D aurait demandé trop de temps d'apprentissage et de calcul alors que le problème est facilement transposable en 2D pour des conducteurs avec ou sans radiateurs.

Dans tout ce chapitre, nous négligerons les problèmes d'électro-migration des atomes de cuivre [CHA03, WU01] Tout d'abord ces essais sont menés avec des impulsions de courant de très courte durée (500 μ s) dans des conducteurs de grandes sections (100 à 500 μ m²) par rapport aux essais d'électro-migration habituels (en étuve, à courant constant, pendant plusieurs heures). De plus, sur les dispositifs finaux, le courant circulera dans un sens puis dans l'autre, ce qui est à priori défavorable à l'électro-migration. Enfin, ce phénomène est bien souvent couplé à l'effet Joule et donc difficilement observable.

III.A.1. Géométrie des conducteurs

Pour pouvoir utiliser des densités de courant élevées, une idée serait de profiter du cuivre dont sont composés les conducteurs (Figure III.2 (a)) pour en faire des dissipateurs (Figure III.2, (b)). A la vue des dimensions choisies pour notre μ -actionneur, il sera difficile de faire des ailettes de plus de 100 μ m de long. Il peut alors être intéressant de faire des ailettes coudées (Figure III.2 (c)) :

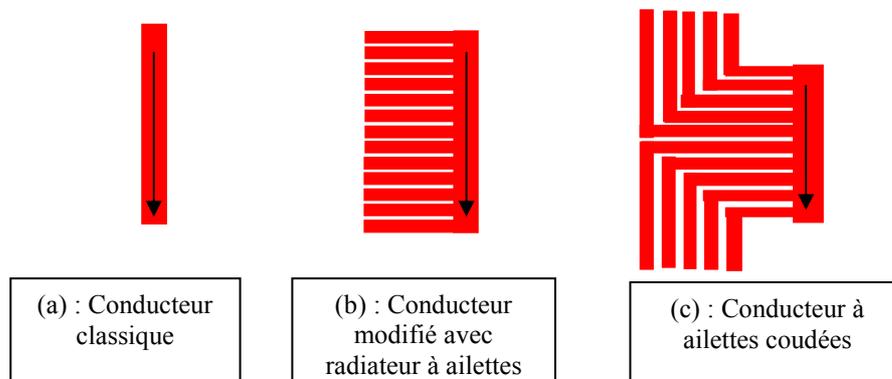


Figure III.2

Un conducteur simple et deux variantes avec radiateurs.

L'avantage des ailettes est qu'elles vont permettre de dissiper directement la chaleur du conducteur sans que le courant n'y soit dérivé. On peut ainsi obtenir une grande densité de courant en même temps qu'un bon refroidissement [MAC00]. Une couche de 1 μ m de SiO₂ sous le conducteur assure une excellente isolation autant thermique qu'électrique avec les aimants en CoPt, qui sont donc conducteurs électriques et qui, de surcroît, ne doivent pas être trop chauffés. La température de Curie est très variable d'une famille d'aimants à l'autre (et même entre différentes nuances d'une même famille). On connaît mal l'évolution des propriétés magnétiques du CoPt au-delà de 200°C, bien que les recuits jusqu'à 300 °C soient bien tolérés mécaniquement. En revanche, cette même couche de

SiO_2 isole aussi thermiquement les radiateurs du substrat en Si qui est sensé absorber leur chaleur. Ce compromis sera résolu dans les versions suivantes des prototypes, avec une couche de SiO_2 localisée aux aimants seulement.

La Figure III.3 présente le modèle en coupe sous Flux2D d'un conducteur de $10\ \mu\text{m}$ avec une ailette de $100\ \mu\text{m}$. Une simulation préliminaire avec une impulsion de courant arbitraire montre que la chaleur semble bien répartie dans le radiateur en cuivre avant d'être diffusée dans une surface plus grande de la couche d'oxyde, puis dans le silicium. La Figure III.4 montre le gradient de température sous le conducteur de la Figure III.3, ce gradient est très marqué dans la couche d'oxyde de $2\ \mu\text{m}$. Ceci est rassurant: les aimants ne risquent pas d'être endommagés et la chaleur est bien dissipée dans les radiateurs. NB : ne connaissant pas encore la conductivité thermique du CoPt, on l'a choisie à $250\ \text{W/m}^\circ\text{C}$ entre celles du silicium ($150\ \text{W/m}^\circ\text{C}$) et du cuivre ($400\ \text{W/m}^\circ\text{C}$).

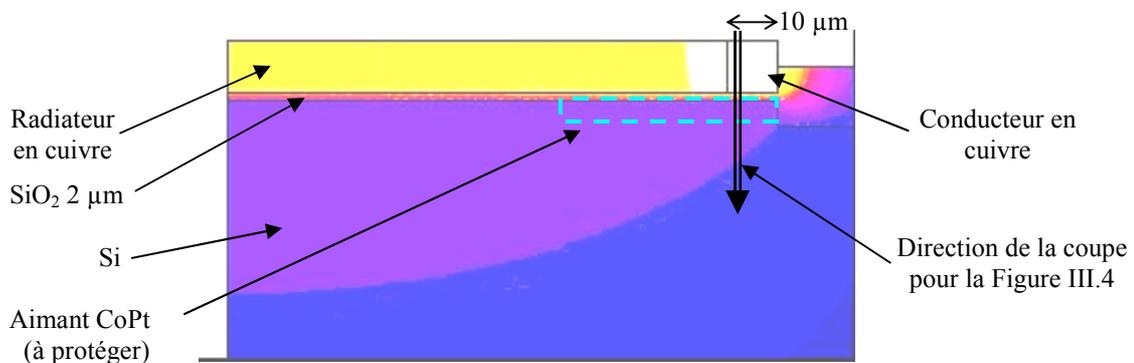


Figure III.3

Répartition de la chaleur avec une ailette de radiateur de $100\ \mu\text{m}$ de long.

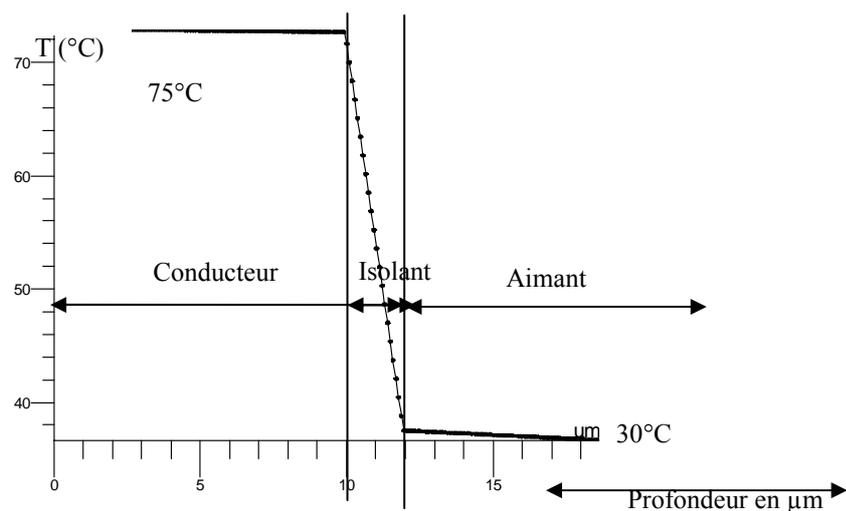


Figure III.4

Distribution de la température lorsqu'on s'enfonce dans le substrat à partir du conducteur. (cette courbe correspond à la coupe verticale de la Figure III.3).

III.B. ETUDE EXPERIMENTALE :

La simulation n'étant pas facile à mettre en oeuvre notamment à cause des variables thermiques qui changent sensiblement suivant le mode d'obtention du matériau (pulvérisé, électrodéposé, recuit) une première phase expérimentale est nécessaire. L'objectif est donc d'évaluer la densité de courant maximale acceptable par les conducteurs lors d'impulsions de courant de 500 μs , mais aussi de pouvoir mesurer la température du conducteur en cuivre durant le test.

Afin de mesurer l'évolution de la température durant les impulsions de courant, nous avons déposé et gravé une thermistance en or (0,2 μm d'épaisseur) sur la surface du dispositif au-dessus des conducteurs en cuivre dont elle est isolée par une couche d'oxyde de silicium (0,2 μm). La mesure de la température repose sur la variation de la résistance du métal en fonction de la température ($R = 100 \Omega$ à 25°C, $\alpha \approx 0,002/^\circ\text{C}$). Parmi les procédures annexes à cette caractérisation, il faut étalonner le matériau de la thermistance ; il faut également vérifier que les ailettes de radiateur, qui sont conductrices et font partie intégrante du conducteur lui-même, ne dévient pas le courant et permettent ainsi de garder une forte densité de courant dans le noyau du conducteur.

III.B.1. Motifs de tests

Les motifs de test sont des conducteurs en cuivre de 10 μm de profondeur et de 10, 20 ou 50 μm de largeur. La Figure III.5 présente la vue en coupe de l'empilement technologique.

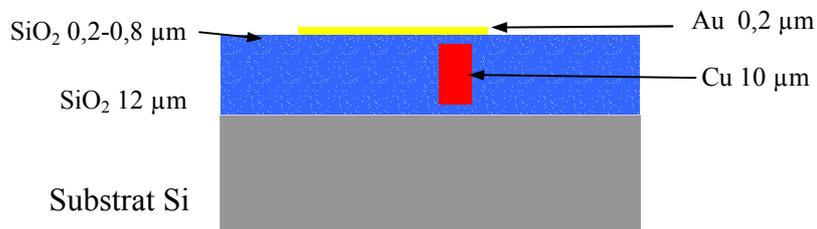


Figure III.5
Empilement technologique des motifs tests

A partir d'un substrat silicium standard, une couche de 12 μm de SiO_2 est déposée et une gravure profonde de 10 μm est réalisée dans ce SiO_2 . Une sous-couche de Ti/Cu est déposée afin de permettre l'électrolyse de 10 μm de cuivre dans les caissons SiO_2 .

Après la planarisation mécano-chimique du cuivre, une nouvelle couche fine (0,2 μm) de SiO_2 est déposée afin d'assurer l'isolation électrique entre le conducteur en cuivre et la thermistance en or de 0,2 μm d'épaisseur. La thermistance est en fait déposée à la fois au-dessus du conducteur en cuivre et de la couche de SiO_2 . Le SiO_2 étant isolant, la température indiquée par la thermistance n'est donc pas exactement la température du conducteur.

Vu de dessus (figure III.6), le motif comprend deux plots aux extrémités pour faire passer les impulsions de courant, ainsi que deux plots au centre pour mesurer la température grâce à la variation

de résistance de la thermistance (serpentin en or). Ainsi, comme le montre la Figure III.7, il y a deux pointes sur chacun des plots P2 et P3. Cette mesure se fait en quatre pointes : Un premier couple de pointes sert à envoyer un courant constant dans la thermistance (de 10 ou 100 mA) et le second couple est relié à un oscilloscope pour visualiser les variations de tension images des variations de température.

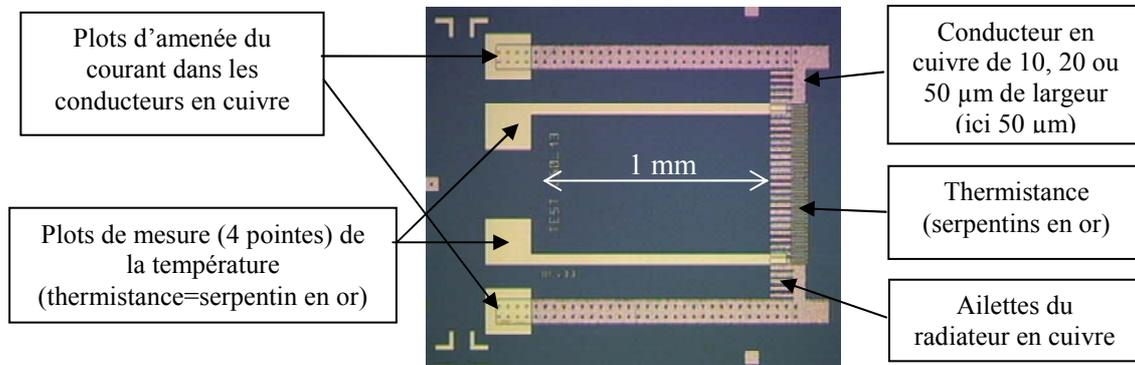


Figure III.6

Photo au microscope d'un dispositif test dont le conducteur fait 50 μm de largeur.

III.B.2. Dispositif de test

Les tests sont effectués 'sur tranche', c'est-à-dire que le substrat n'a pas besoin d'être découpé en puces individuelles pour tester les motifs. Les contacts sur les plots sont réalisés par des pointes (2 par plot, cf. Figure III.7) fixées sur une carte. Un testeur sous pointe permet de gérer les déplacements d'une puce vers une autre, et une interface avec un ordinateur permet d'automatiser une partie des tests (essentiellement les mesures de résistance).

Les tests se déroulent en plusieurs phases :

- Caractérisation systématique des dispositifs de la tranche testée (mesure automatique) :
 - Validation du contact des pointes sur des motifs en court-circuit (Figure III.12)
 - Mesure de la résistance des conducteurs des motifs de test (mesure quatre pointes)
 - Mesure de la résistance de la thermistance (mesure quatre pointes)
 - Mesure de l'isolement entre les thermistances et les conducteurs en Cu séparés par une couche d'oxyde de 0,2 μm (mesure deux pointes).
- Evaluation de la température des conducteurs soumis à des impulsions de courant d'une durée de 500 μs et d'intensités différentes : l'impulsion de courant est activée manuellement et les tensions images de la température et du courant sont lues sur un oscilloscope. On identifie les limites physiques du capteur de température.

- Mesure du courant maximal supporté par les conducteurs en cuivre avant destruction : l'acquisition est là aussi déclenchée manuellement. Ce dernier test est destructif.

Le montage utilisé pour réaliser ces tests est présenté Figure III.7. En début de chaîne, un générateur d'impulsions (en tension) nous permet de régler leur largeur, temps de montée, temps de descente et amplitude. Le signal généré est ensuite amplifié et peut atteindre 10 A, une résistance de $2,2 \Omega$ protégeant l'amplificateur d'un éventuel court-circuit (car les puces tests ont une résistance d'à peine quelques m Ω). Les pointes posées sur les plots P1 et P4 permettent le passage du courant dans le conducteur. Pour réaliser la mesure de température grâce à la thermistance on alimente cette dernière par deux pointes avec un courant fixe de 10 à 100 mA et on mesure la tension aux bornes des deux autres pointes (plots P2 et P3).

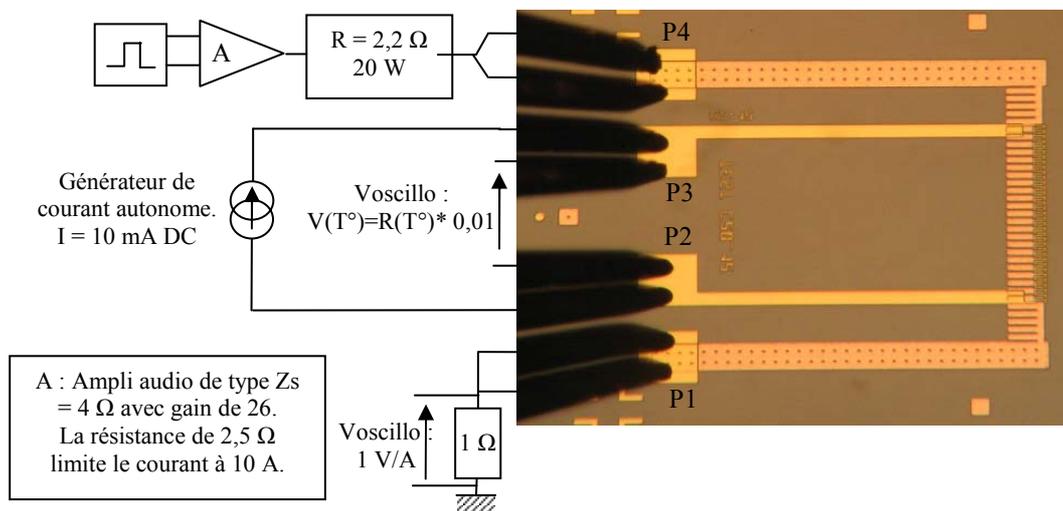


Figure III.7
Schéma du dispositif de test des conducteurs.

III.B.3. Caractérisation des motifs

III.B.3.1 Caractérisation des conducteurs en cuivre

Nous avons choisi trois largeurs de conducteurs: 10, 20 et 50 μm . Ces dispositifs sont nommés respectivement C10, C20 et C50. Pour chaque largeur il existe un motif avec et sans radiateur. Ceux possédant un radiateur sont nommés Cxx-R (Figure III.8). Les radiateurs ont des dimensions fixées à 100 μm de long, 10 μm de hauteur, 20 μm de large et espacées au pas de 10 μm (Figure III.9).

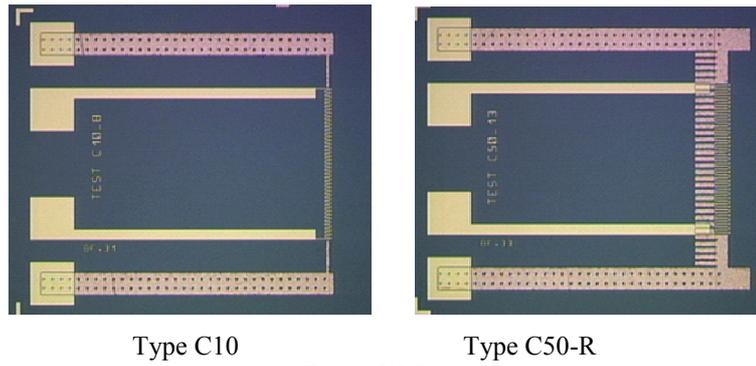


Figure III.8
Puces de test de 10 μm sans radiateur (à gauche) et 50 μm avec radiateur (à droite).

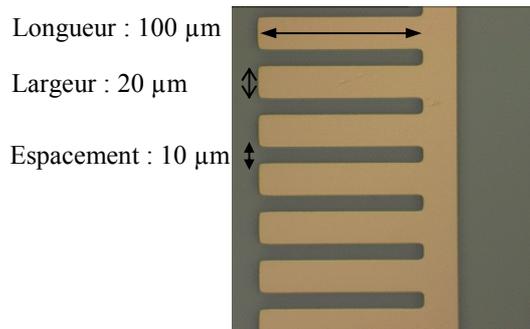
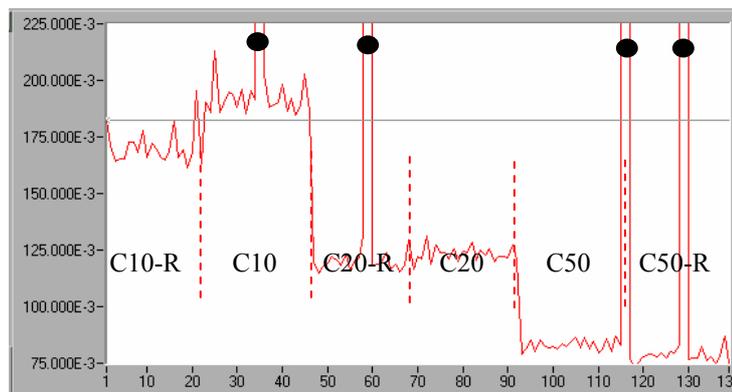


Figure III.9
Dimension des radiateurs sur un C20-R

Les 140 résistances de 6 types différents sont mesurées automatiquement type après type (environ 20 puces par type). La dispersion de la mesure d'une résistance en 4 pointes est meilleure que 3 m Ω (résultat obtenu en mesurant 3 fois chaque résistance). Le résultat de la mesure des résistances de toutes les puces tests du substrat est donné sous la forme d'un tableau et d'un fichier type Excel (Graph. III.1 et Tab. III.1).



Graph. III.1
Mesure de toutes les résistances classées par type. Les points ronds sur les résistances hors-échelle correspondent à des puces ayant un défaut de fabrication, généralement en bord de plaque.

Largeur du conducteur	Resistance avec le radiateur mΩ	Resistance sans le radiateur mΩ	Ecart-type mΩ	% de variation entre un conducteur avec ou sans radiateur
10 μm	170	192	< 3	-11%
20 μm	120	123	< 3	-3%
50 μm	78	83	< 3	-6%

Tab. III.1

Résistance moyenne des conducteurs de chacun des types de puces.

Les premiers résultats sont concluants : tout d'abord la quasi-totalité des puces sont fonctionnelles et seules les puces du bord de la plaque sont non opérationnelles car elles sont à la limite de l'anneau d'électrolyse du cuivre. On remarque aussi la bonne homogénéité des motifs car l'écart type pour chaque type de puce (soit 22 échantillons par type) est proche de la précision de la mesure (soit 3 mΩ). Les résistances des dispositifs varient peu selon la présence d'un radiateur ou non, ce qui confirme bien que les lignes de courant y sont peu déviées (Figure III.10). Les puces de type C10-R ont une résistance plus faible de 11%, les C20-R de 3% et les C50-R de 6% que leurs homologues sans radiateur (Tab. III.1). Nous pouvons en conclure que pour une puissance dissipée identique, la densité de courant sera presque la même dans les types Cxx et Cxx-R.

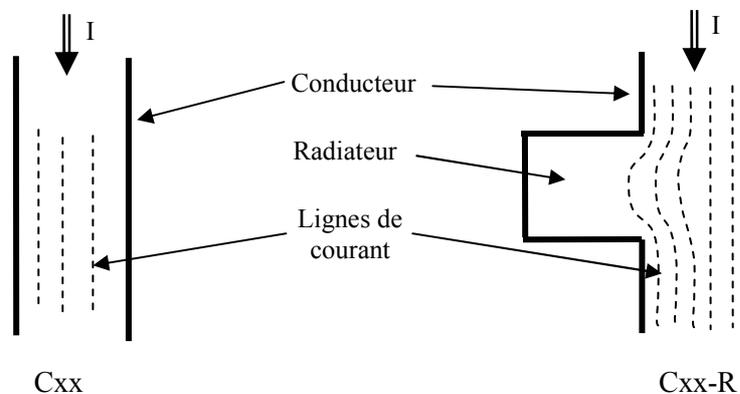


Figure III.10

Croquis de la distribution du courant dans les conducteurs

III.B.3.2 Caractérisation des thermistances:

La loi de variation de la résistance d'un matériau en fonction de la température est la suivante :

$$R(T) = R_{T_0} (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Avec : R_{T_0} : résistance du circuit de mesure de température à T° fixée (25°C)

α : coefficient de température du matériau ($Au \approx Cu \approx 0,002$ à $0,004/^\circ C$)

L'oscilloscope indiquant une mesure en Volt, transposons l'équation précédente :

$$V(T) = V_{to} (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

D'où :

$$\Delta T = (V(T)/V_{to} - 1) / \alpha$$

La température en fonction du temps est facilement mesurable malgré le bruit de fond. Il est aussi possible de faire une mesure de température directement avec les conducteurs en cuivre en envoyant une impulsion de courant constante (plusieurs ampères !) avec une pointe entre les plots P1 et P4 et en mesurant la variation de résistance pendant l'impulsion. Mais cette configuration est difficile à mettre en œuvre car il y a d'abord le risque de détériorer les pointes de test à cause du courant élevé, et de plus le signal est noyé dans le bruit de l'impulsion de courant.

III.B.3.3 Etalonnage des propriétés thermo-résistives des thermistances

La littérature indique que la variation de la résistance en fonction de la température est linéaire. Le coefficient α de la droite est donné aux environs de 0,004 pour de l'or 'massif' et entre 0,0016 et 0,0028 pour de l'or déposé en couche mince ([BEL59]). De plus ce même article montre que la variation de température est linéaire dans la gamme 25°C à 600°C pour un dépôt sur substrat recuit pendant quelques minutes après le dépôt. Dans notre cas, nous devons déterminer le coefficient de température pour un film d'or de 0,2 μm d'épaisseur.

Une plaque est découpée en puces et certaines de ces puces sont collées sur un support et reliées par micro-soudure à des contacts (Figure III.11). Le support est ensuite équipé d'un thermocouple placé au plus près de la thermistance, puis placé dans une étuve. On mesure ainsi la résistance en fonction de la température réelle.

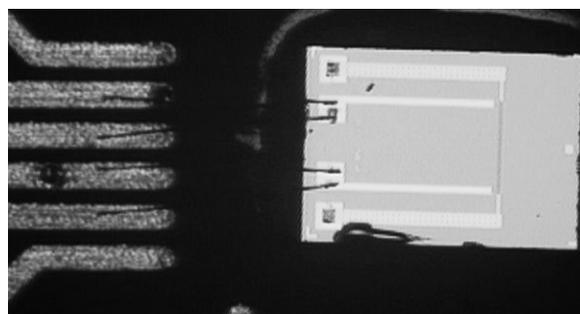
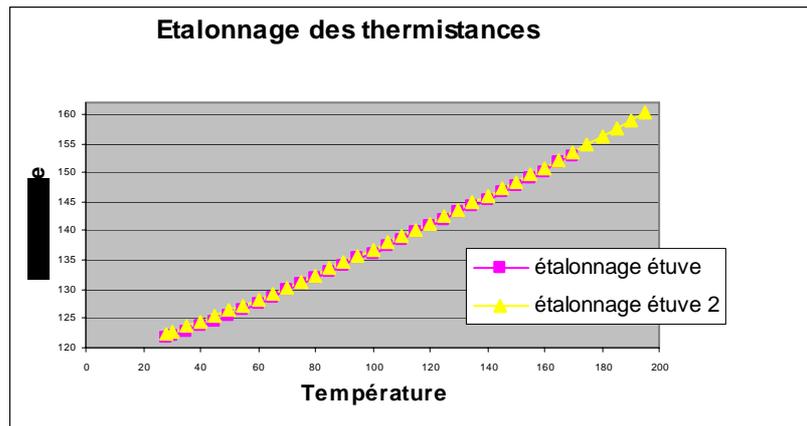


Figure III.11

Micro-soudure de la puce sur le support.

Il y a deux fils de connection sur chaque plot pour pouvoir mesurer les résistances en quatre pointes.

Les puces ont ainsi été recuites en étuve quelques minutes à 200°C pour obtenir une bonne répétabilité de l'étalonnage. La pente de la droite (Graph. III.2) donne un α égal à 0,0019%/°C à 3,5% près (sur 5 mesures, $R^2 > 0,997$) pour des températures de 25 à 200°C. Au dessus de 200°C, le support en résine Epoxy noircit et se dégrade, ce qui est naturel. Des tests de recuit ont été faits sur des plaques entières jusqu'à près de 600°C (pendant 10 minutes) sans qu'il y ait décollement des conducteurs ni apparition de fissures.



Graph. III.2

Courbe de la résistance en fonction de la température.

Les deux séries de mesures successives sont faites avec une même puce.

III.B.3.4 Isolation entre la thermistance et le conducteur en cuivre

L'isolation est assurée par une couche de SiO_2 (oxyde de silicium) de 0,2 μm ou 0,8 μm suivant la plaque. Une épaisseur de 0,2 μm permet un rendu plus fidèle de la température des conducteurs ; mais des problèmes de topologie liés aux phases de fabrication entraînent parfois une mauvaise isolation pour ces faibles épaisseurs. Les mesures de résistance sur les motifs sont faites en mode 'deux pointes' uniquement, et les résultats sont dispersés et varient de 100 Ω à plus de 1 M Ω pour une épaisseur de 0,2 μm d'oxyde.

III.B.3.5 Caractérisation de la carte à pointes

Des motifs en court-circuit permettent de vérifier que les pointes sont bien positionnées par rapport aux plots. On mesure donc la résistance aux bornes des pointes sur chacun des motifs de type 'court-circuit' dispersés sur l'ensemble de la plaque. Ce test permet de valider la carte à pointes.

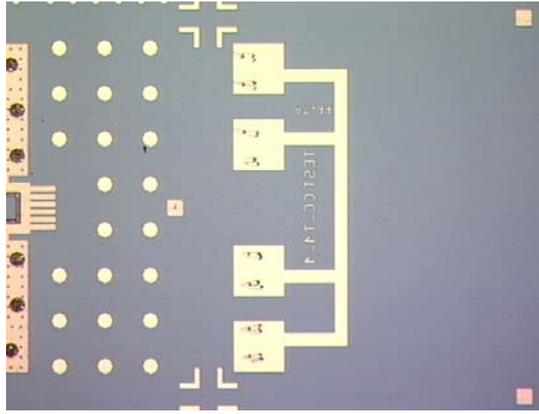


Figure III.12

Photo d'un motif court-circuit. On peut voir les traces des touchers répétés qui détériorent la surface des plots.

Les pointes vont subir des impulsions de courant d'intensité maximale de 10 A. Pour vérifier qu'elles ne fondront pas, des tests sur des pointes usagées mais néanmoins en très bon état ont été effectués sur une plaque recouverte de $0,2 \mu\text{m}$ d'or. En courant continu, les pointes très fines fondent à 2,5 A alors que les plus grosses supportent 5 A sans se détériorer. Dans un second temps, les pointes ont été testées avec des impulsions de courant de 10 A pendant $500 \mu\text{s}$. Aucune pointe n'a subi de dommage mais l'or déposé sur la plaque de test a fondu. Les tests effectués sur la carte à pointes définitive ont montré que les pointes supportent facilement 10 A en impulsions de plusieurs ms lorsque le courant est envoyé par deux pointes en même temps (entre les plots P1 et P4), soit 5 A par pointe. Une pointe seule peut supporter les impulsions de courant précédentes, mais il faut faire attention car si elle est oxydée le contact risque d'être résistif et un point chaud va alors se créer à ce niveau. La pointe risque alors de fondre (Figure III.13). Pour éviter la corrosion des pointes en cuivre/béryllium, le fabricant conseille de les décaper par plusieurs touchers ('touch down') sur un substrat avec une couche de tungstène (légèrement abrasif).



Figure III.13

Dégradation des pointes de la carte à pointes après une impulsion de courant alors que le contact était mauvais.

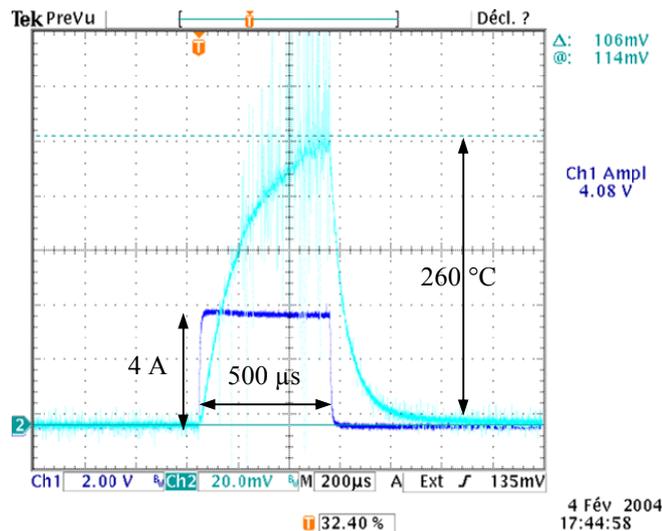
III.B.4. Test des motifs

III.B.4.1 Test en régime impulsionnel

Pour chaque type de conducteur, j'ai mesuré la réponse en température à une impulsion de 500 μs d'intensité variable (de 1 à 10 A). La réponse type lue à l'oscilloscope est une exponentielle croissante puis décroissante (Graph. III.3). Pour chaque impulsion de courant, on extrait la température maximale et on détermine si le capteur de température et/ou le conducteur en cuivre est détérioré.

La température maximale du capteur est dans ce cas de 258 $^{\circ}\text{C}$:

$$T^{\circ}\text{max} = 25 + (((106+114)/114) - 1)/0,0019 = 258 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$



Graph. III.3

Le créneau correspond à l'impulsion de courant de 4 A pendant 500 μs .
Le signal bruité correspond à la mesure de la température.

Dans de bonnes conditions les mesures ne sont pas limitées par les points de fusion des matériaux (1080 $^{\circ}\text{C}$ pour le cuivre et 1060 $^{\circ}\text{C}$ pour l'or) mais par un claquage électrique entre l'or et le cuivre séparés de 0,2 μm d'oxyde (Figure III.15). Pour pallier à ce problème, une plaque de test avec 0,8 μm d'oxyde a été fabriquée. L'inconvénient d'une forte épaisseur d'oxyde est que la mesure de température est moins représentative de la température du conducteur en cuivre. Le conducteur en cuivre est détruit par une trop forte densité de courant qui entraîne sa fusion (Figure III.14).

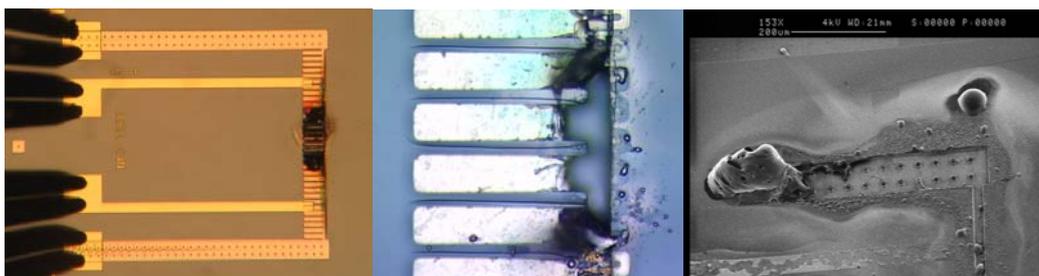
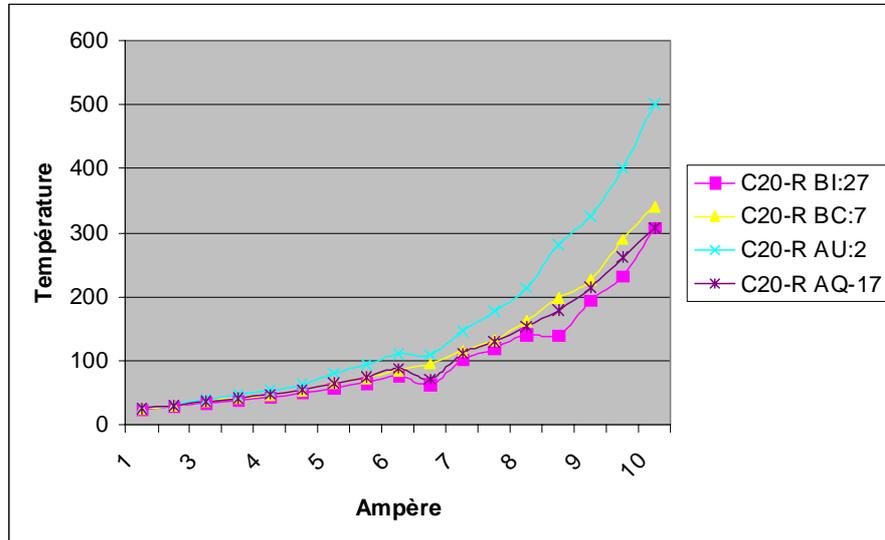


Figure III.14

Conducteurs détériorés suite à une impulsion de courant de 10 A (100 000 A/mm^2) sur un type C10-R.

La précision de mesure de la température est d'environ 15 %. Par contre la dispersion des caractéristiques entre plusieurs puces d'un même type est assez importante (Graph. III.4), surtout aux forts courants (mesure variant de 300 à 500 °C pour une impulsion de 10 A).



Graph. III.4

Dispersion des caractéristiques entre cinq puces C20-R différentes.

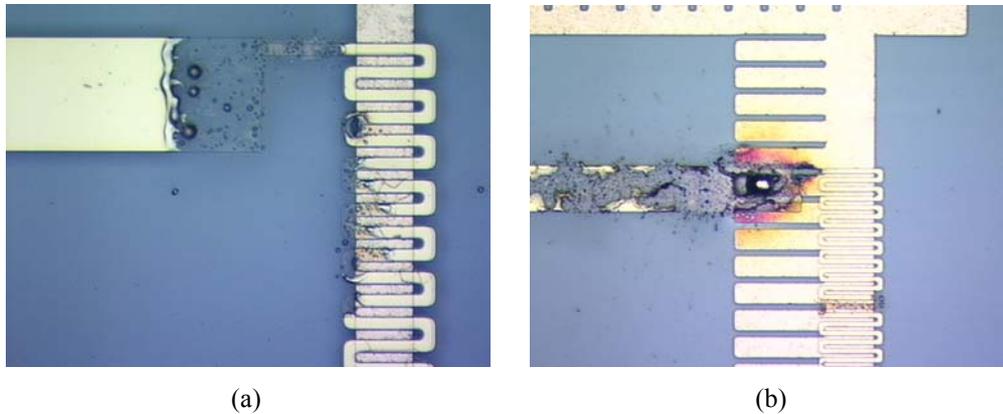


Figure III.15

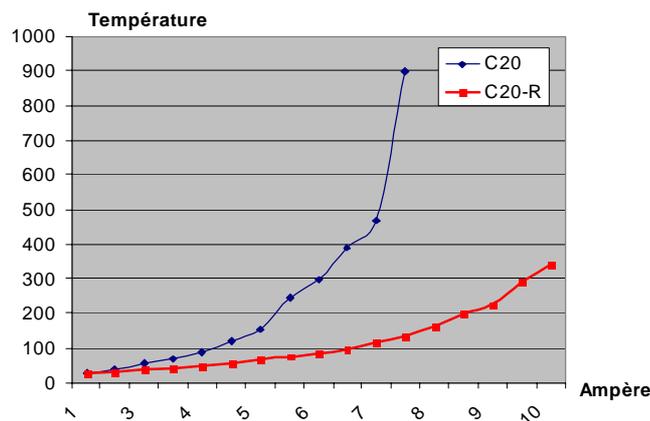
Thermistances détériorées par des courts-circuits entre l'or et le cuivre.
On voit l'or fondu sur la figure (a) et un point de court-circuit sur la figure (b).

III.B.4.2 Résultats

III.B.4.2.1 L'utilité des dispositifs radiateurs en courant impulsionnel

L'amplitude des courants utilisés (1 à 10 A) ne nous permet pas de tester les types C50 et C50-R car la densité de courant maximale est alors limitée à 20 000 A/mm² (10 A) et la différence de température entre une puce avec ou sans conducteur n'est donc pas significative dans ce cas. Les tests sont donc effectués sur les types C10, C10-R et C20, C20-R.

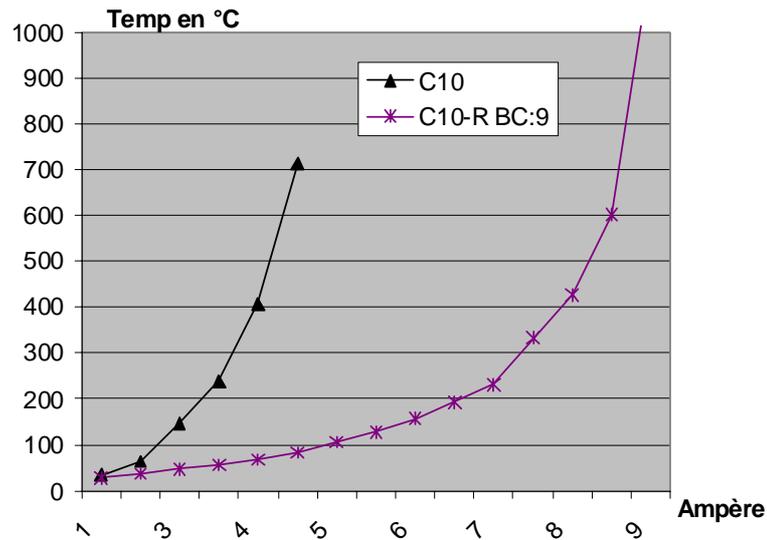
Le Graph. III.5 montre la différence de température entre un type C20 et un type C20-R pour une même impulsion de courant. La résistance des deux types étant équivalente (respectivement 120 et 123 mΩ), pour une même impulsion de courant la puissance et donc l'énergie dissipée est la même. Le type de puce C20 est détérioré pour une impulsion de 8 A pendant 500 μs : la puissance maximale dissipée est alors de 7,7 W (E = 3,8 mJ). En revanche le type C20-R supporte des impulsions de 10 A (50 000 A/mm²) sans être détérioré, soit une puissance dissipée de 12 W (6 mJ). Le radiateur semble donc bien remplir son rôle qui consiste à absorber la chaleur et aider à la diffuser dans l'oxyde (ce qui augmente la surface d'échange) sans changer la densité de courant.



Graph. III.5

Comparaison de la tenue en courant entre une puce C20 et une puce C20-R (équipée d'un radiateur) pour des impulsions de 500 μs. Les courbes sont des moyennes issues de plusieurs puces de chaque type.

L'étude des types C10 et C10-R permet de tester les puces jusqu'à leur détérioration car les densités de courant peuvent monter jusqu'à 100 000 A/mm² (10 A) (Graph. III.6). Les thermistances ont été détériorées respectivement à 5 et 9 A correspondant à des mesures de 700 et 1000 °C. Les dispositifs ont fondu à 5,5 A (5,8 W et 2,9 mJ) pour le type sans radiateur et 9,5 A (15,3 W et 7,6 mJ), soit respectivement des densités de courant de 55 000 A/mm² et 95 000 A/mm².



Graph. III.6

Comparaison de la tenue en courant entre une puce C10 et une puce C10-R (équipée d'un radiateur).
Le dernier point de chaque courbe correspond à la détérioration du capteur (par court-circuit).

Cette première étude a donc montré l'utilité des radiateurs intégrés aux conducteurs comme absorbeurs de chaleur. La densité de courant maximale en courant pulsé a été presque multipliée par deux pour des petits conducteurs (Tab. III.2). Il aurait été encore plus efficace de mettre un radiateur de chaque côté du conducteur, mais ce n'est pas possible dans notre cas pour des raisons de place.

Type de puce	Courant (A)	Densité de courant (A/mm ²)	Puissance (W)	Énergie (mJ)
C10	5,5	55 000	5,8	2,9
C10-R	9,5	95 000	15,3	7,6
C20	8	40 000	7,7	3,8
C20-R	>10	>50 000	>12	6
C20-R extrapolé	18	90 000	38,8	19,4

Tab. III.2

Tableau récapitulatif des densités de courant admissibles.

Pour ce qui concerne l'actionnement magnétique des microsystèmes, on constate donc qu'il sera ainsi possible d'augmenter fortement les courants, et donc les forces entre aimants et conducteurs, sans utiliser de dispositif de refroidissement extérieur.

Nous allons maintenant corréler la phase expérimentale avec une simulation thermique, afin d'estimer la température réelle du conducteur de cuivre. Cela nous servira aussi à déterminer la masse

thermique à rajouter à un conducteur afin qu'il puisse absorber une impulsion de courant donnée: on souhaite pouvoir prévoir la géométrie du conducteur et des radiateurs pour une densité de courant et un temps d'impulsion voulus.

III.C. MODELISATION THERMIQUE

III.C.1.1 Hypothèses et paramètres

L'hypothèse de l'étude dans un plan en coupe est justifiée car le conducteur est très long par rapport à sa section (1 mm de long pour une section maximale de $50 \times 10 \mu\text{m}^2$).

Les échanges thermiques sont supposés adiabatiques : nous négligeons les échanges de type convectif avec l'extérieur, ainsi que le rayonnement, qui sont tous deux relativement lents par rapport à la conduction. Ce choix est justifié car les impulsions de courant ne durent que $500 \mu\text{s}$ (dont $10 \mu\text{s}$ de temps de montée et $10 \mu\text{s}$ de temps de descente).

Sous flux2D, en coupe, il faut introduire la profondeur du dispositif pour le calcul de la puissance dissipée. Pour un conducteur simple, nous choisissons une longueur (profondeur) de $100 \mu\text{m}$. Pour un conducteur avec radiateur, il faut tenir compte de la différence de « profondeur » entre le conducteur qui est continu et le radiateur qui n'occupe que $20 \mu\text{m}$ pour un pas de $30 \mu\text{m}$ (Figure III.16). Nous déclarons alors une profondeur du système de $20 \mu\text{m}$, mais nous « injectons » une puissance équivalente à celle dissipée dans $30 \mu\text{m}$ de conducteur. Notons aussi que le modèle en 2D néglige la chaleur évacuée dans le silicium présent dans l'espace entre les dents du radiateur (dans la 3^{ème} dimension) et que nos simulations sont donc pessimistes.

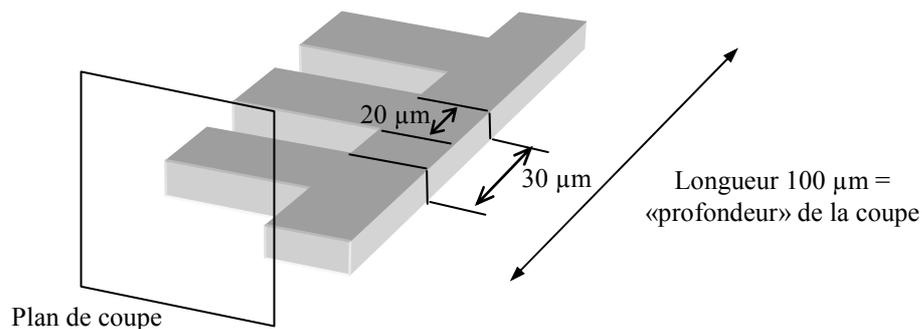


Figure III.16

Modèle équivalent du conducteur avec radiateur :

Chaque radiateur de largeur ($20 \mu\text{m}$) dissipe la chaleur produite par une largeur ($30 \mu\text{m}$) du conducteur.

La Figure III.17 montre la géométrie du conducteur vu en coupe ainsi que le maillage général, en zoom sur le conducteur. La zone globale en silicium mesure en fait $525 \mu\text{m}$ de haut par 1 mm de large ce qui correspond à la dimension standard d'une puce. Le conducteur en cuivre fait $10 \mu\text{m}$ de hauteur et a une largeur de $10 \mu\text{m}$ (d'autres puces mesurent $20 \mu\text{m}$ ou $50 \mu\text{m}$). La couche d'oxyde de silicium sous le cuivre fait $2,2 \mu\text{m}$ d'épaisseur (sur le substrat, cette dimension varie entre 2 et $2,4 \mu\text{m}$ à cause

de l'inhomogénéité de la gravure). La finesse de cette couche est critique car c'est par là que la majorité de la chaleur s'évacue vers le silicium. En surface, on distingue la couche d'or de la thermistance et sa sous-couche d'oxyde, toutes deux de $0,2 \mu\text{m}$. L'air autour du dispositif n'est pas maillé car l'étude est supposée adiabatique.

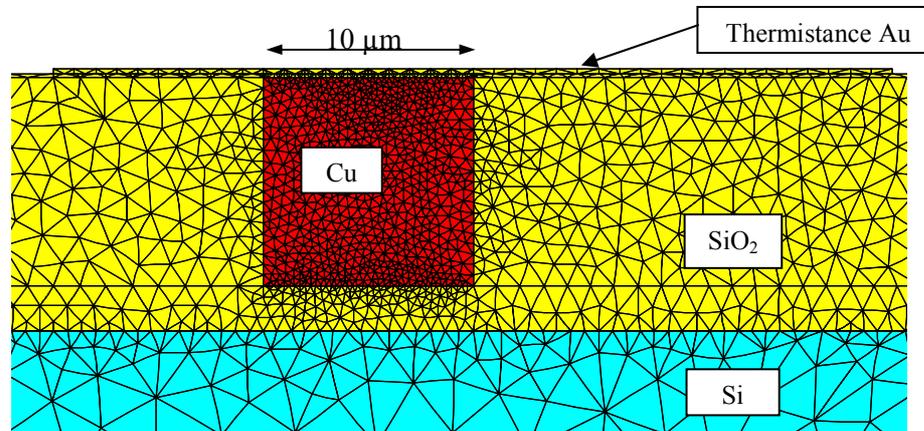


Figure III.17

Vue en coupe de la géométrie et du maillage (zoom sur le conducteur de $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$), sans radiateur.

Comme nous l'avons déjà observé précédemment, les propriétés physiques des matériaux en couches dans les microsystèmes peuvent être différentes de celles des matériaux massifs utilisés dans le monde macroscopique. Le Tab. III.3 présente les paramètres physiques trouvés dans la littérature et dans les bases de données du LETI, que j'ai utilisés pour les simulations.

Matériau	Conductivité thermique $\text{W/m}^\circ\text{C}$	Capacité calorifique $\text{J/m}^3/^\circ\text{C}$	Résistivité à 300 K $\Omega\cdot\text{m}$
Silicium	150	$1,63 \cdot 10^6$	--
SiO_2	1,2	$1,6 \cdot 10^6$	--
Cuivre	400	$3,12 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-8}$

Tab. III.3

Paramètres utilisés pour les simulations

La conductivité de l'oxyde varie entre 1 et $1,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Je l'ai donc fixée à $1,2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (moyenne) dans le cadre de mes simulations. C'est un paramètre très influant du système étudié.

Le test se fait à courant constant alors que la simulation est à puissance constante. Il faut donc connaître la section du conducteur et la résistivité du cuivre. La résistivité du cuivre électrolysé a été mesurée entre 2 et $2,2 \mu\Omega\cdot\text{cm}$. Cette valeur peut descendre jusqu'à $1,8 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ après recuit. Si les puces ne sont pas recuites, il risque d'y avoir une évolution de la résistivité résultant du passage répété de forts courants dans le conducteur (qui est en quelque sorte recuit lors des impulsions de courant).

Les autres paramètres thermiques sont moins influents. Le silicium sert à absorber la chaleur et est 100 fois meilleur conducteur de chaleur que l'oxyde de silicium, une petite variation de la conductivité du silicium ou du cuivre n'aura donc que peu d'influence sur les résultats.

III.C.1.2 Résultats des mesures

Afin de comparer mesures et simulations, un ensemble de tests à été effectué sur différentes puces avec différents courants. Les courbes de la résistance en fonction du temps ont été enregistrées avec un oscilloscope et traduites en courbe température/temps. La figure III.8 et le graph III.7 présentent un cas où la corrélation est bonne. Le conducteur fait $10 \times 10 \mu\text{m}$ de section et dissipe $0,18 \text{ W}$ sous 3 A , soit une densité de courant de $30\,000 \text{ A/mm}^2$. La température maximale (dans le conducteur) n'est pas la température mesurée car la thermistance recouvre à la fois le cuivre et l'oxyde, la température mesurée est donc une 'moyenne'. Mais cette valeur apparaît bien entendu clairement lors des simulations.

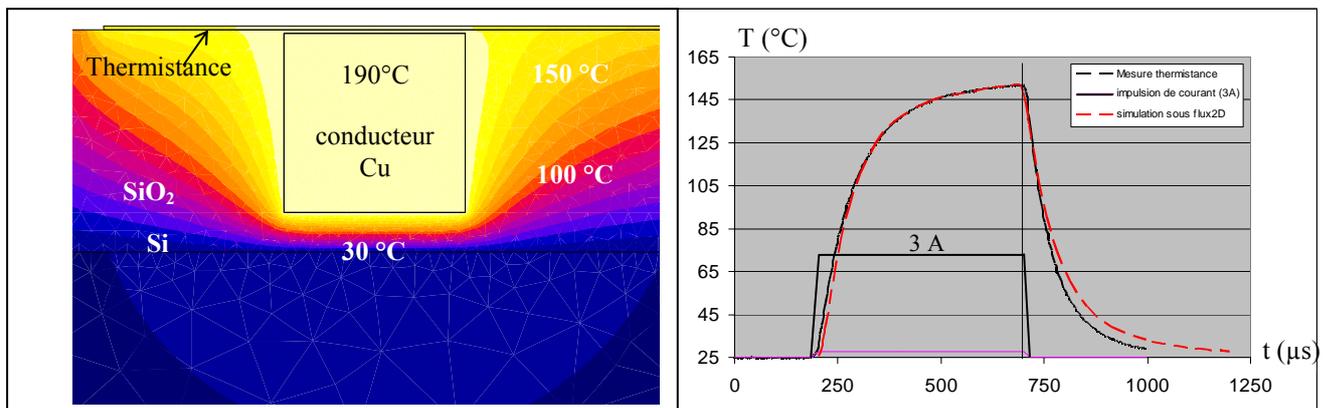


Figure III.18: Cartographie de la température simulée au maximum de chaleur pour un C10 (sans radiateur).
Graph. III.7: Mesure et simulation comparées pour une impulsion de 3A (180 mW pour $100 \mu\text{m}$ de conducteur).

La Figure III.19 montre la dissipation de chaleur d'un conducteur de $20 \times 10 \mu\text{m}$ dans son radiateur de $100 \times 10 \times 20 \mu\text{m}$. Le conducteur subit une impulsion de courant de 7 A (15 mW dans $30 \mu\text{m}$ de conducteur) soit une densité de courant de 35000 A/mm^2 . L'échauffement du conducteur est plus faible que sans radiateur (150°C au lieu de 190°C) pour une densité de courant plus élevée de 15 %.

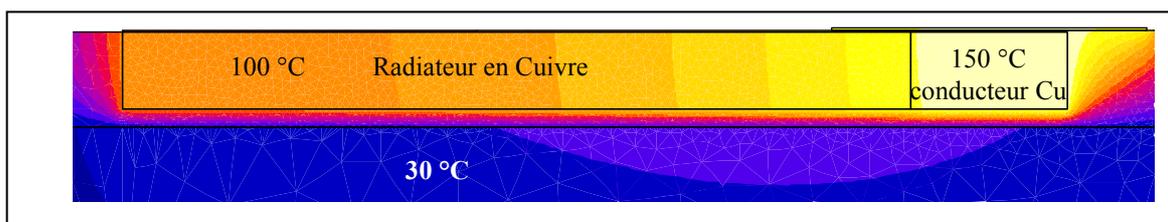
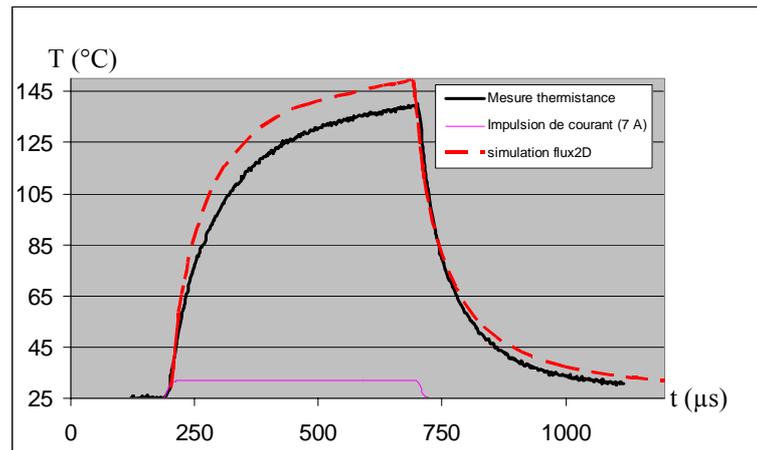


Figure III.19
Cartographie de la température simulée pour un conducteur C20-R au pic de chaleur (impulsion de 7 A).



Graph. III.8

Comparaison entre une mesure et la simulation (Figure III.19) pour une impulsion de 7A.

Cette simulation confirme les hypothèses faites lors des manipulations, à savoir que le radiateur absorbe presque instantanément la chaleur (conductivité thermique 300 fois plus élevée que l'oxyde) et qu'il permet une meilleure dissipation de la chaleur dans le silicium à travers une plus grande surface d'échange avec l'oxyde. Le désavantage de cette structure est que son temps de refroidissement est plus long qu'avec un simple conducteur car la masse thermique du cuivre supplémentaire est beaucoup plus importante. Néanmoins, ce temps de refroidissement est d'environ 400 μs . Le temps de cycle d'alimentation en courant puis retour à température ambiante reste donc d'environ 1 ms pour des fortes densités de courant.

III.C.1.3 Problèmes et limitations des simulations effectuées

Malheureusement, l'adéquation entre la simulation et la mesure n'est pas toujours aussi bonne que ce que nous venons de voir. Lorsque l'échauffement dû au courant dans le conducteur est trop fort, l'hypothèse de la commutation à puissance constante n'est plus valable. Un conducteur de cuivre de 1Ω à 20°C dans lequel passe 3 A dissipe 9 Watts. A 220°C la résistance de ce même conducteur passe à $1,8\ \Omega$ (coefficient de température de 4000 ppm), soit 16,2 Watts dissipés. Il faut donc pouvoir réaliser une étude à courant constant et non pas une étude à puissance constante. Ceci n'est pas facilement réalisable sous Flux2D. Ce problème pourrait être résolu en utilisant un logiciel adéquat mais nous n'en avons pas eu le temps.

La thermistance de $0,2\ \mu\text{m}$ d'or ne serpente pas exactement au dessus du conducteur en cuivre mais passe également au dessus de l'oxyde (Figure III.20). L'image de la température que l'on mesure effectivement est donc en partie la température de l'oxyde. De plus, cette couche, même mince, participe à l'écoulement de la chaleur du conducteur vers l'oxyde (Figure III.18). Sans cette couche, les courbes isothermes arrivent perpendiculairement à la surface.

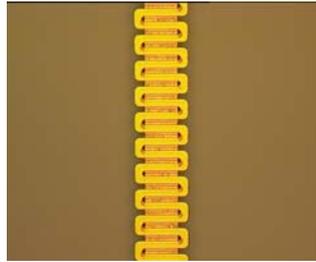


Figure III.20

Thermistance en or au dessus du conducteur en cuivre, avec recouvrement partiel de l'oxyde sur les bords.

Globalement les simulations sont concluantes et en concordance avec les résultats expérimentaux. Mais certains points restent à affiner pour que les simulations restent réalistes aux hautes températures (600°C ou plus). Des simulations à ces températures pourraient permettre d'étudier de manière fiable la dilatation du conducteur et donc les contraintes mécaniques dans le dispositif. La densité de courant maximale admissible dépend aussi fortement de la géométrie du conducteur et des matériaux présents à proximité. Ainsi les limites de densités atteintes pourraient facilement être repoussées en travaillant sur les matériaux (recuit du cuivre, remplacer l'oxyde...).

En conclusion, l'expérimentation s'est révélée très importante pour la connaissance et la caractérisation du comportement des conducteurs sous fortes densités de courant, car elle nous a permis de mettre au point les impulsions de courant qui permettent la commutation de la partie mobile (générateur d'impulsion, amplificateur de courant). Elle nous a aussi aidés à déterminer les constantes thermiques des matériaux. Les résultats restent quand même surprenants (dans le bon sens !) car il est peu commun, même en microsystèmes, de parler de densités de courant frôlant les 100 000 A/mm².

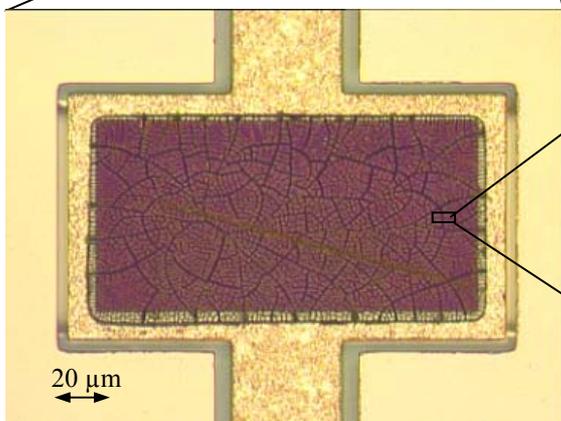
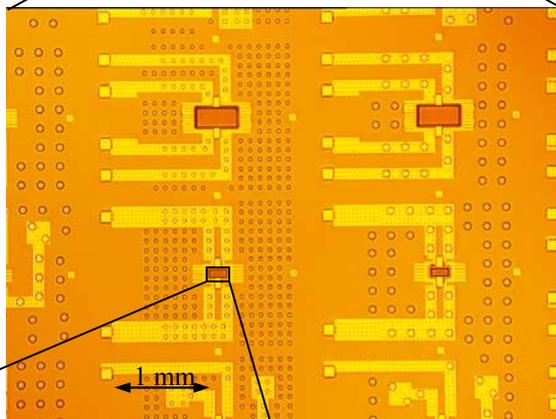
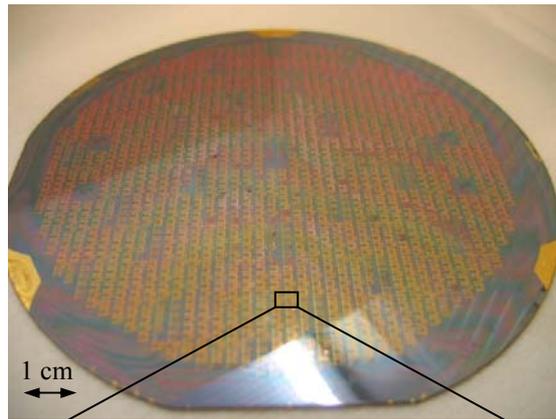
CHAPITRE IV. FABRICATION DU MICRO-ACTIONNEUR AVEC DES PROCEDES MICRO-TECHNOLOGIQUES

Résumé :

Forts d'un système dimensionné et modélisé, nous réalisons un prototype du micro-actionneur dans les salles blanches du CEA-LETI. Nous avons tout d'abord conçu et dessiné les masques. Chaque puce fait 3 mm², ce qui fait 6 mm² de substrat utilisé par puce hybridée. Puis les briques de bases ont été réalisées en salle blanche. Parmi ces briques de base, on peut noter le dépôt électrolytique des aimants en CoPt qui est développé au LETI depuis plusieurs années. Après l'échec du dépôt en caisson d'oxyde de silicium, les aimants seront dorénavant déposés en caisson résine. La plupart des autres briques de bases (Planarisation mécano-chimique, électrodéposition du cuivre) ont été validées sans grandes difficultés.

Toutefois le prototypage du premier substrat, c'est-à-dire l'assemblage de toutes les briques de bases, nous réserve de nombreuses surprises. Notamment la libération chimique du cuivre emprisonnant les aimants mobiles qui est compliquée car l'attaque chimique libère les aimants mais s'infiltré aussi dans les conducteurs en cuivre et les détériorent. Bien que le second substrat semble plus simple à réaliser, il reste des interrogations quand à l'intégration des billes flip-chip. Le découpage et l'assemblage des deux substrats ne sera pas non plus une chose aisée. Néanmoins les premiers échantillons devraient être prêts courant 2005.

CHAPITRE IV. FABRICATION DU MICRO-ACTIONNEUR AVEC DES PROCEDES MICRO-TECHNOLOGIQUES



La partie théorique nous a permis d'établir des ordres de grandeur de la géométrie du micro-actionneur (taille des aimants, distance de commutation, courant...). La réalisation passe par un compromis entre ce qu'il est possible de réaliser en salle blanche et le résultat des simulations. Le micro-actionneur a été fabriqué dans les salles blanches du CEA-LETI.

IV.A. RAPPEL DES PROCÉDES DE MICRO-TECHNOLOGIE BASIQUES

IV.A.1. Masques

Les masques sont incontournables dans le monde des microstructures. Ils permettent de définir les dimensions des objets dans le plan du wafer, et sont précis à 0,2 μm près. Ce sont ensuite les gravures et dépôts qui vont définir l'épaisseur des objets.

Un masque est carré et a les dimensions du substrat (100 x 100 mm dans notre cas). Il est en verre avec une face chromée sur laquelle on retrouve les motifs que l'on souhaite reproduire sur le substrat. Le masque est 'reproduit' sur le substrat grâce au procédé de photolithographie. En général, il faut plusieurs masques successifs pour réaliser les différentes étapes et couches empilées qui composent un micro-actionneur. Les différents masques sont alignés entre eux grâce à des motifs de positionnement en forme de croix ainsi que des verniers qui permettent de vérifier la précision du positionnement (cf. Figure IV.2).

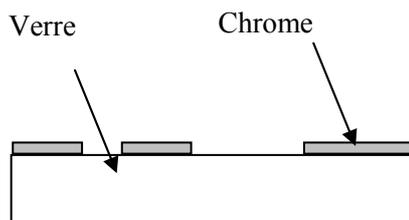


Figure IV.1
Alignement du masque 2 sur le masque 1

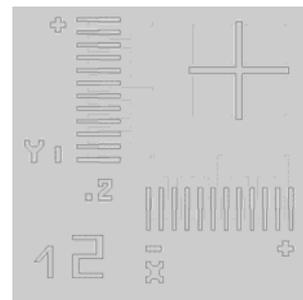


Figure IV.2
Alignement du masque 2 sur le masque 1

IV.A.2. Photolithographie

Cette opération consiste premièrement à déposer une résine photosensible en film mince (quelques fractions de micromètre à plusieurs micromètres), uniforme, de grande qualité et fortement adhérente.

Ces résines sont des composés organiques (généralement des polymères thermoplastiques) dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV. Il existe deux types de résines.

→ Les résines négatives : pour lesquelles le rayonnement ultraviolet entraîne une polymérisation des zones exposées, d'où une résistance accrue des zones insolées aux solvants lors du développement.

→ Les résines positives : pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une rupture des macromolécules, d'où la dissolution des zones insolées lors du développement. Ce sont celles que nous utiliserons pour fabriquer le micro-actionneur.

L'opération de dépôt de la résine photosensible s'effectue par centrifugation au moyen d'une tournette composée d'un système permettant la mise en rotation à grande vitesse de la plaque. Cette dernière est maintenue par aspiration à vide sur un support solide du plateau en rotation (cf. Figure IV.3). L'épaisseur finale de la couche de résine est principalement fonction de la quantité de résine déposée sur l'échantillon, de sa viscosité, et des conditions de rotation (accélération, vitesse, temps).

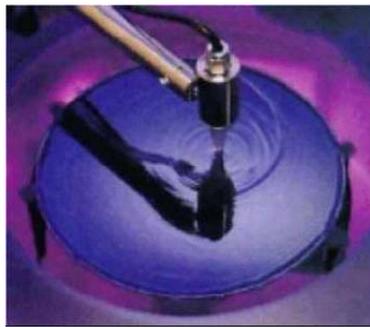


Figure IV.3
Tournette servant à déposer la résine

La résine photosensible, visqueuse après son étalement sur l'échantillon, est alors durcie sur une plaque chauffante ou dans un four, de façon à éliminer toutes les traces de solvant avant son insolation.

La résine est ensuite insolée avec des UV à travers un masque puis la résine est révélée dans un bain chimique (cf. Figure IV.4). Le masque est aligné par rapport à la plaque laquée grâce à des motifs de positionnement.

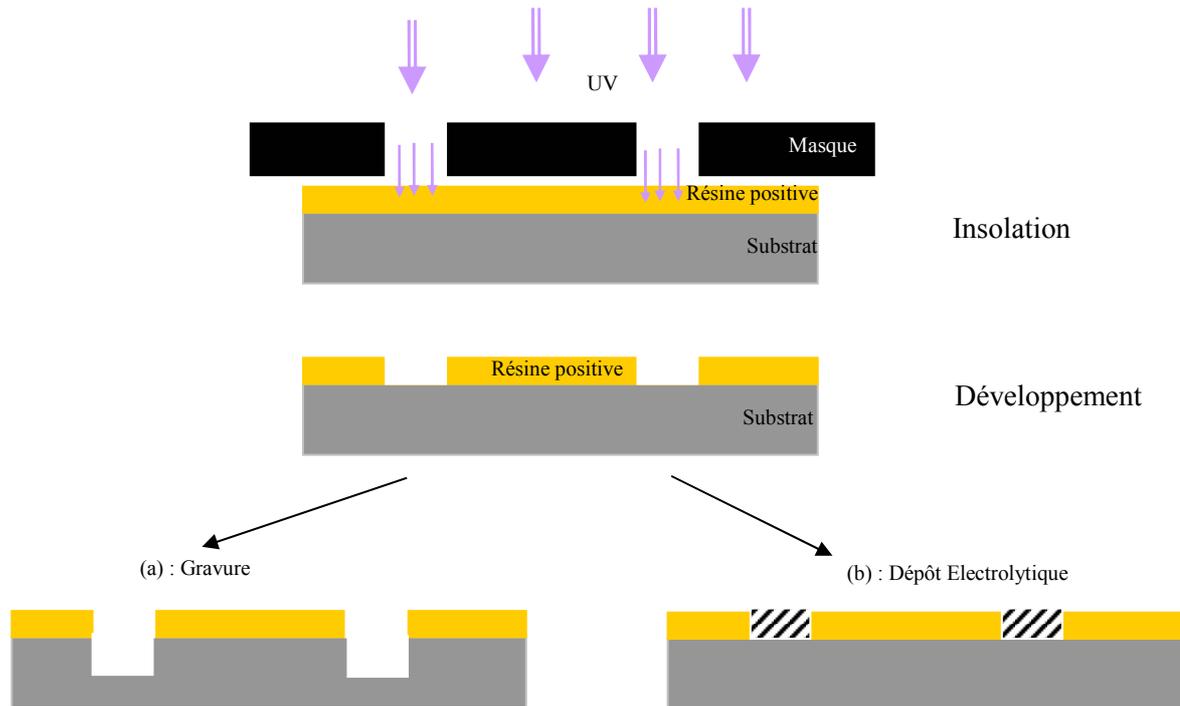


Figure IV.4
Insolation puis développement de la résine

La plaque peut ensuite être gravée là où la résine a été enlevée, la résine intacte protégeant les zones ne devant pas être gravées (a). Un dépôt électrolytique (dépôt local du matériau métallique) peut aussi être réalisé dans les caissons ne contenant pas de résine (b). Lorsque ces étapes sont finies, la résine est enlevée (étape de délaquage) chimiquement et/ou par une gravure sèche.

IV.A.3. Gravure

IV.A.3.1 Gravure sèche

Dans une enceinte sous atmosphère contrôlée en argon, on applique une forte tension entre une anode et une cathode sur laquelle est posé le substrat. Les Ions Ar^+ sont attirés à très haute vitesse vers la cathode et viennent graver le substrat par arrachage atomique. Les particules gravées sont éjectées du substrat et viennent finalement se déposer dans l'enceinte (cf. Figure IV.5). Cette gravure est purement ionique et ne permet pas d'obtenir une bonne sélectivité en fonction des matériaux, et la vitesse de gravure est très lente. L'avantage de cette technique est justement que l'ensemble des matériaux peut être gravé dans le cas d'un 'recyclage' d'un substrat par exemple (opération visant à essayer de réparer une erreur commise sur un substrat).

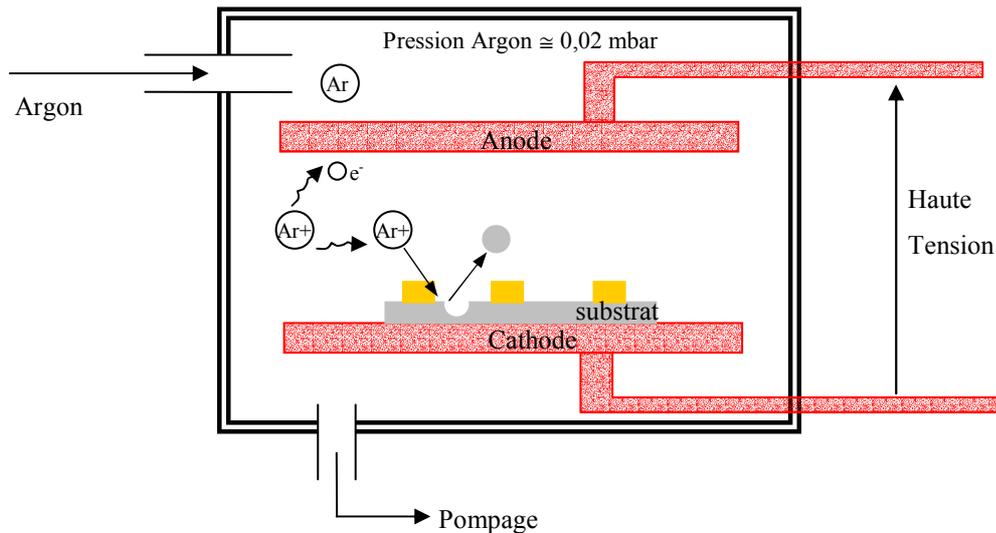


Figure IV.5
Gravure Ionique.

Pour pallier à ces défauts, les machines actuelles utilisent plutôt la RIE (Reactive Ion Etching) ou GIR (Gravure Ionique Réactive) qui allie la gravure ionique et la gravure chimique en phase gazeuse grâce à l'utilisation de gazs fluorés (SF_6 , CHF_3). Ce procédé permet de graver plus rapidement ($\cong 1\mu\text{m}/\text{mn}$). On obtient une bonne sélectivité de gravure en choisissant les gaz injectés. Cette technique permet de graver rapidement du SiO_2 et de déboucher par exemple sur du cuivre sans que celui-ci ne soit attaqué.

IV.A.3.2 Gravure humide (chimique)

La gravure humide consiste à plonger la plaque à graver dans un bain contenant une solution chimique (KOH, acide fluorhydrique...). Il existe deux types de gravure : les gravures isotropes et anisotropes. Si le matériau gravé est constitué de monocristaux, la gravure sera anisotrope car la vitesse de gravure est différente d'un plan cristallin à un autre. C'est-à-dire que les flancs de gravure auront un angle donné suivant le plan cristallin gravé. Dans la plupart des applications le matériau à graver est polycristallin et la gravure est donc isotrope (même vitesse de gravure verticalement et horizontalement). La sélectivité entre les différents matériaux peut être très bonne suivant la solution chimique choisie, voire parfaite car une solution peut par exemple ne pas avoir d'effets sur le Co, le Pt, l'Au, le SiO_2 et le Si mais graver rapidement du Cu.

IV.A.4. Dépôts sous vide

Le dépôt de matériaux divers tels que les métaux, les oxydes, les matériaux réfractaires ou isolants se fait en général par évaporation dans des chambres sous vide avec ou sans gaz. Voici trois procédés :

➤ Le dépôt classique est l'évaporation thermique d'un matériau (Au, Cu ...) dans un creuset placé en face du substrat. En fondant, le matériau éjecte des particules (il s'évapore) qui

viennent se déposer sur l'ensemble des parois de la chambre (donc aussi sur le substrat). Dans le cas d'une évaporation e-Beam, c'est un faisceau d'électrons qui crée l'évaporation du matériau.

➤ Une seconde méthode est la pulvérisation cathodique ou PVD (Physical Vapour Deposition). Le principe est très proche de la gravure ionique. Des ions argon viennent arracher de la matière d'une cible placée sur la cathode. Ces particules arrachées vont ensuite se déposer sur le substrat fixé à l'anode (cf. Figure IV.6).

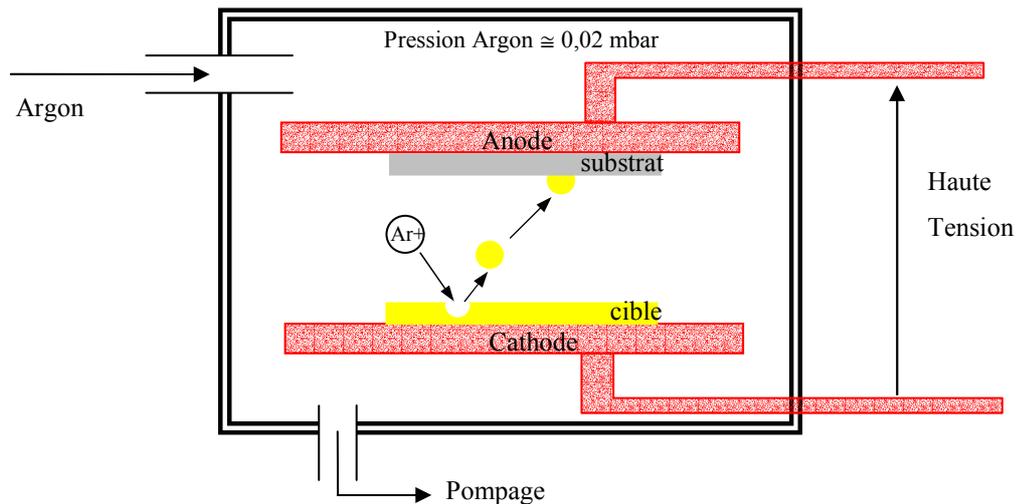


Figure IV.6
Gravure plasma IE (Ion Etching)

➤ La troisième méthode se fait toujours dans une enceinte sous vide mais cette fois le dépôt est le résultat d'une réaction chimique entre des gaz qui créent un produit solide qui se condense sur le substrat. C'est le dépôt PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition), i.e dépôt chimique en phase vapeur assisté par un plasma. Par exemple pour déposer le nitrure de Silicium Si_3N_4 , il faut du gaz SiH_4 et NH_3 pour faire la réaction : $3 \text{SiH}_4 + 4 \text{NH}_3 \Rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12 \text{H}_2$.

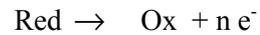
Les épaisseurs des couches déposées peuvent varier de quelques centaines d'Angström à plusieurs microns.

IV.A.5. Dépôt électrolytique

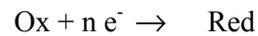
Le dépôt électrolytique est utilisé pour déposer des couches épaisses de matériaux métalliques, sur tout le substrat ou dans des caissons délimités. Il s'agit d'un procédé électrochimique liquide. Dans le cas de cette thèse, le dépôt électrolytique sert à déposer du cuivre (5 à 10 μm d'épaisseur), les micro-aimants en CoPt (5 μm d'épaisseur) ainsi que le SnPb pour réaliser les billes flip-chip.

Une cellule de dépôt électrolytique (Figure IV.7) est composée :

→ D'une anode qui est le lieu d'une réaction d'oxydation selon le mécanisme suivant :



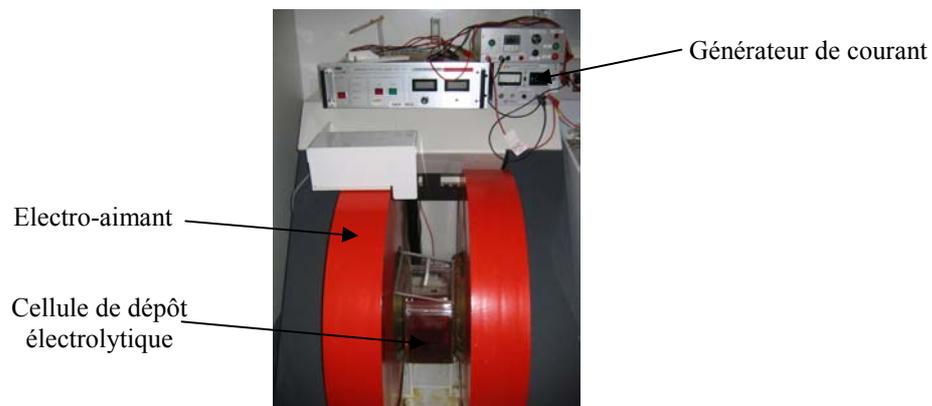
→ D'une cathode qui est le lieu d'une réaction de réduction selon le mécanisme suivant :



→ D'un générateur de courant qui met les électrons et les ions en mouvement et permet ainsi à ces deux réactions de se produire.

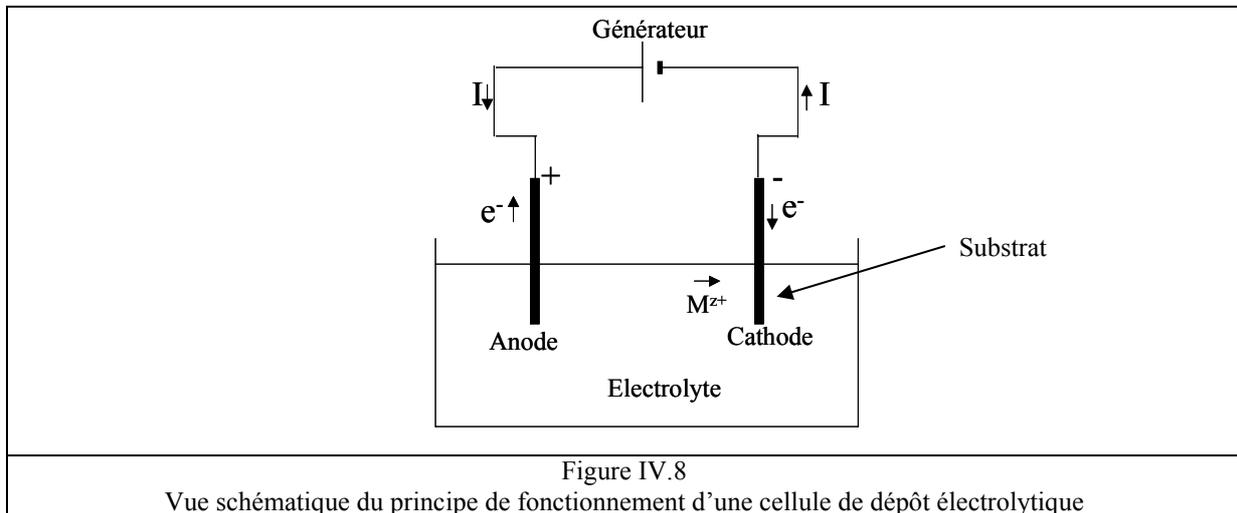
→ D'un liquide (nommé électrolyte) qui contient, entre autres, les espèces chimiques (ions métalliques en solution) permettant le dépôt du matériau.

→ Dans notre cas d'un électro-aimant pour faire le dépôt sous champ magnétique



IV.A.5.1 Formation d'un dépôt sur les électrodes

Dans le sens de la réduction, un ion M^{Z+} est électriquement déchargé à la surface de la cathode par l'arrivée d'électrons à la surface de cette dernière. Il se dépose à l'état d'atome métallique sur cette surface en formant progressivement un revêtement de métal M (CoPt dans notre cas pour les aimants, Cu pour les conducteurs, SnPb pour les billes, Figure IV.8).



IV.A.5.2 Transport de matière associé aux réactions d'électrochimie

Trois phénomènes participent au transport de matière : la migration, la diffusion et la convection :

L'électrolyte est le lieu d'une électro-migration des espèces ioniques présentes dans la solution sous l'action du champ électrique créé par la différence de potentiel entre anode et cathode.

Des réactions d'oxydation et de réduction se produisent en des zones très localisées de la cellule (aux interfaces électrodes/électrolyte). De ce fait il y a création ou consommation de substances à ces interfaces, ce qui crée des variations locales de concentrations (appauvrissement ou enrichissement en espèces). Cela a pour conséquence une diffusion des espèces afin de rétablir l'uniformité du bain en concentrations.

De plus, il est possible d'assurer un transport de matière par convection en utilisant par exemple un système de circulation de fluide ou encore une agitation par palettes.

IV.A.6. CMP et planarisation mécanique

Après le dépôt électrolytique, les surfaces peuvent ne pas être planes car le dépôt n'est pas parfaitement régulier. Il faut donc planariser les plaques. Il y a deux types de planarisation : la planarisation mécano-chimique CMP (Chemical Mechanical Planarisation) et la planarisation mécanique. La machine CMP est constituée d'un grand plateau rotatif sur lequel est injecté un 'slurry'

(liquide contenant un abrasif par particule ou un abrasif chimique) permettant la planarisation. Le substrat est placé sur un support qui appuie sur le plateau et qui se translate.

IV.A.6.1 La CMP

La machine de CMP est constituée d'un grand plateau recouvert d'un feutre et d'un support mobile qui maintient la face avant du substrat plaquée sur le feutre. L'action mécanique est réalisée par les mouvements des différents éléments, le plateau et le substrat sont en rotation sur eux-mêmes et le substrat fait aussi un mouvement de translation sur le plateau. En même temps, l'action chimique est réalisée par l'injection d'une solution chimique spécifique (le 'slurry') sur le feutre (Figure IV.9).

La planarisation est principalement due à des phénomènes chimiques dans le cas du cuivre. Deux types de 'slurry' mélangés à de l'eau oxygénée permettent de choisir une vitesse de gravure plus ou moins rapide (de 0,6 à 1,3 $\mu\text{m}/\text{min}$).

Dans le cas de l'oxyde de silicium, la planarisation est à la fois chimique et mécanique. Il est possible d'utiliser des produits surfactants qui permettent d'éliminer uniquement la topologie sur la plaque (les 'bosses') sans planariser le reste du substrat. D'autres produits permettent de planariser de manière homogène la surface du substrat.

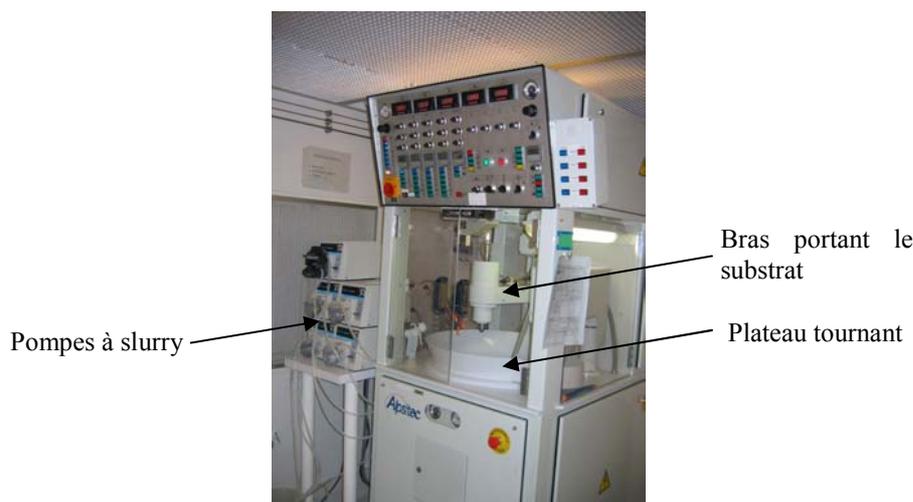


Figure IV.9
Machine de planarisation mécano-chimique CMP

IV.A.6.2 La planarisation mécanique

La planarisation mécanique (cf. Figure IV.10) se fait principalement manuellement par frottement sur un papier abrasif à grains fins (0,5 μm). Cette méthode convient pour des matériaux durs et que l'on ne sait pas planariser en CMP.

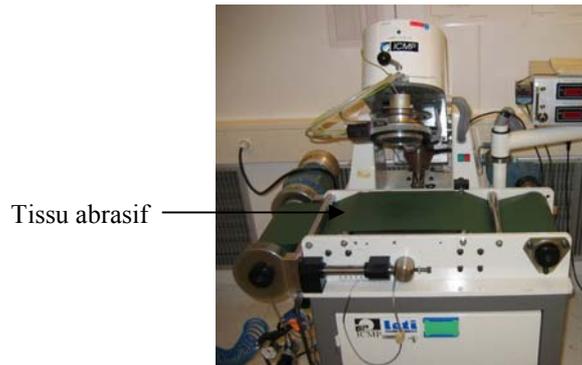


Figure IV.10
Machine de planarisation mécanique

IV.B. EMPILEMENT TECHNOLOGIQUE

L'objectif de cet empilement est d'essayer d'utiliser les technologies les plus simples et les plus fiables. Ainsi les masques sont conçus pour être utilisés sur des machines de projection et non de contact. C'est-à-dire que le masque et le substrat ne sont jamais en contact, d'où un gain en terme de nettoyage de masque. L'oxyde de silicium qui encapsule les conducteurs et les aimants a été choisi car il se dépose, se grave et se planarise facilement même pour des épaisseurs avoisinant les 10 μm . Mais la plupart des étapes ne peuvent être réalisées que sur une seule machine. Nous utilisons donc ces machines dans la plage normale de leur utilisation. Par exemple nous utilisons des résines standard qui ont une épaisseur préprogrammée dans les lignes de 'couchage' de résine. Les sous-couches d'électrolyse sont elles aussi d'épaisseur raisonnable (100-2000 Å) et de composition telle qu'une seule machine de pulvérisation soit nécessaire (l'ensemble des cibles des matériaux sont déjà dans la machine).

IV.B.1. Présentation générale de l'empilement

Le micro-actionneur complet est composé de deux puces superposées et assemblées par flip chip. Le montage en flip chip est un assemblage entre deux éléments grâce à des billes en matériau fusible qui permettent à la fois de coller les puces, de permettre le passage du courant et de régler l'espace entre les deux puces. Dans notre cas, c'est le réglage de l'espace entre les deux puces qui permet de régler la distance parcourue par l'aimant mobile entre la position stable basse et la haute (Figure IV.9).

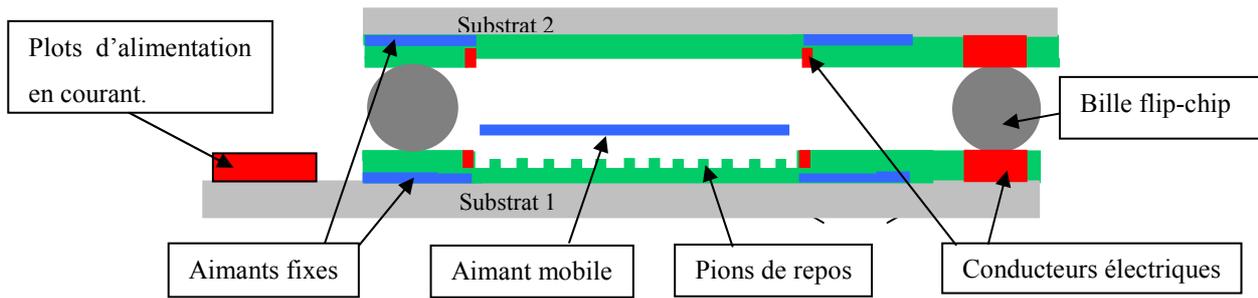


Figure IV.11
Vue en coupe du micro-actionneur

Le substrat 1 contient les aimants fixes et les conducteurs de courant pour la partie basse, ainsi que l'aimant mobile. La phase critique de la fabrication de ce premier substrat est la libération de l'aimant mobile. La méthode qui a été choisie consiste à entourer l'aimant mobile de cuivre durant la fabrication. Lorsque toutes les étapes sont finies, on grave chimiquement ce cuivre (avec du KOH par exemple) et la partie mobile est ainsi libérée. Mais cela impose de protéger tous les autres éléments en cuivre qui ne doivent pas être gravés (les conducteurs, les ailettes de refroidissement...) au risque de détériorer toute la puce.

Le substrat 2 est quant à lui fabriqué sur les mêmes bases que le substrat inférieur. Il est constitué de conducteurs, d'aimants fixes et d'un caisson pour faire la butée supérieure de l'aimant mobile. Une fois les billes flip-chip électrolysées, le substrat 2 est découpé en puces de tailles inférieures aux puces du substrat 1 afin de permettre d'alimenter les plots en courant. Ces puces sont ensuite hybridées (retournées et collées) sur le substrat 1 resté intact.

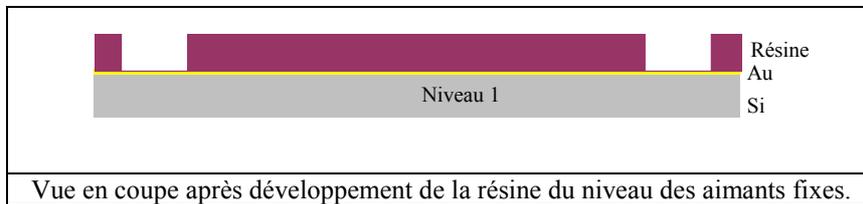
IV.B.2. Empilement, étape par étape

Ce paragraphe décrit la succession des étapes nécessaires à la réalisation du micro-actionneur.

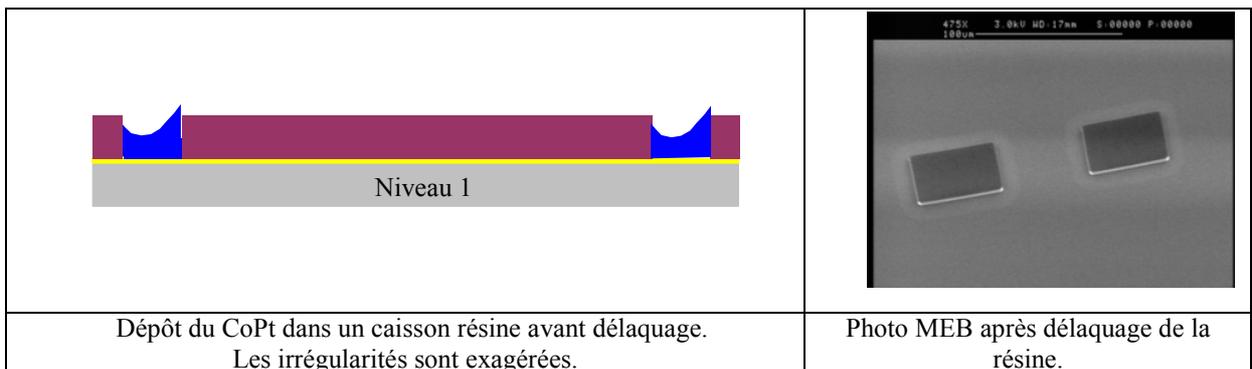
CoPt	SiO ₂	Substrat	Cuivre
			

SUBSTRAT 1

- Substrat Si de 525 µm d'épaisseur
- Marquage (numéro de la plaque)
- Dépôt PVD Au. L'or est la couche conductrice qui permet de faire démarrer l'électrolyse
- Photolithographie niveau 1 : définition de la géométrie des aimants fixes (résine 12 µm)



- Dépôt électrolytique des aimants en CoPt
- Dépôt sous champ magnétique des micro-aimants fixes afin d'améliorer les propriétés magnétiques des aimants. La vitesse de dépôt est environ de 1 à 2 µm/heure.
- Délaquage de la résine

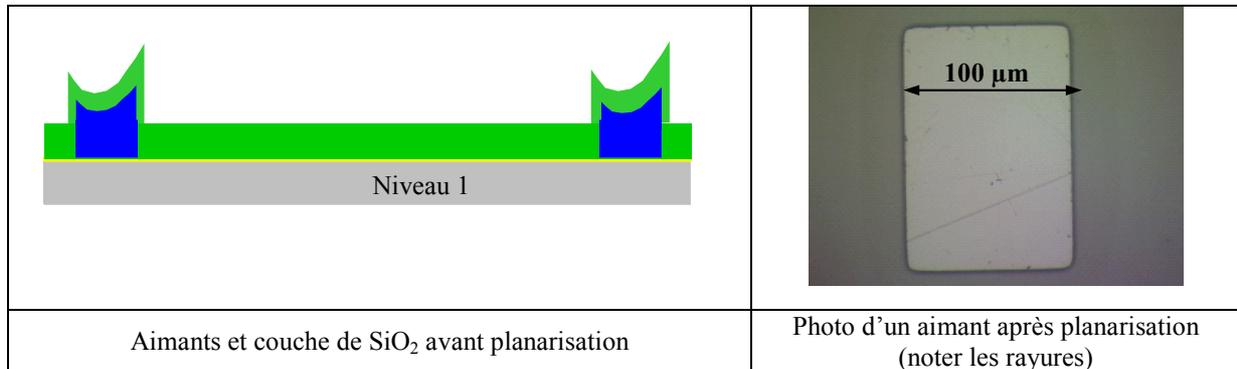


- Dépôt de 7 µm de SiO₂ PECVD faibles contraintes.
- Le choix du procédé faibles contraintes permet de réduire les contraintes dans le matériau. Une épaisseur d'oxyde de 10 µm 'low-stress' génère quand même une flèche d'environ 80 µm sur l'ensemble du substrat 100 mm. Cette flèche influence peu la planarisation car le substrat est plaqué contre une surface plane pendant la planarisation.

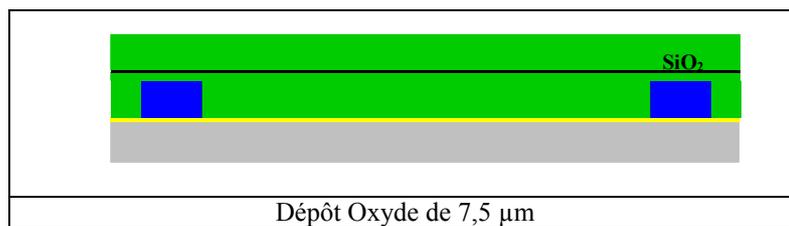
○ Planarisation mécanique CoPt

Le dépôt de CoPt n'est pas parfaitement plan et dépasse de la couche d'oxyde. Il faut le planariser mécaniquement afin d'obtenir une surface la plus plane possible.

Si la surface n'est pas parfaitement plane à l'issue de cette étape, il faut refaire un dépôt d'oxyde de silicium et faire une CMP oxyde.



○ Dépôt SiO₂ 7,5 µm

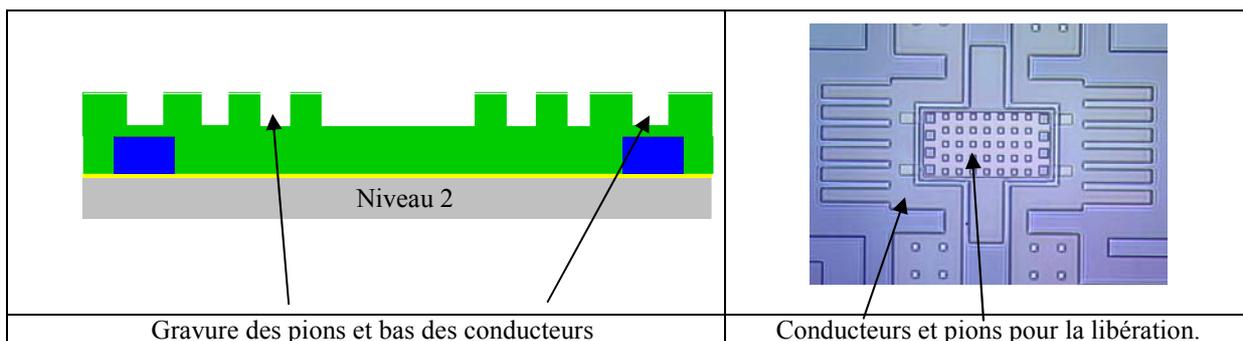


○ Photolithographie niveau 2 : préparation pour la gravure des conducteurs et de la couche sacrificielle

○ Gravure RIE SiO₂ 5 µm

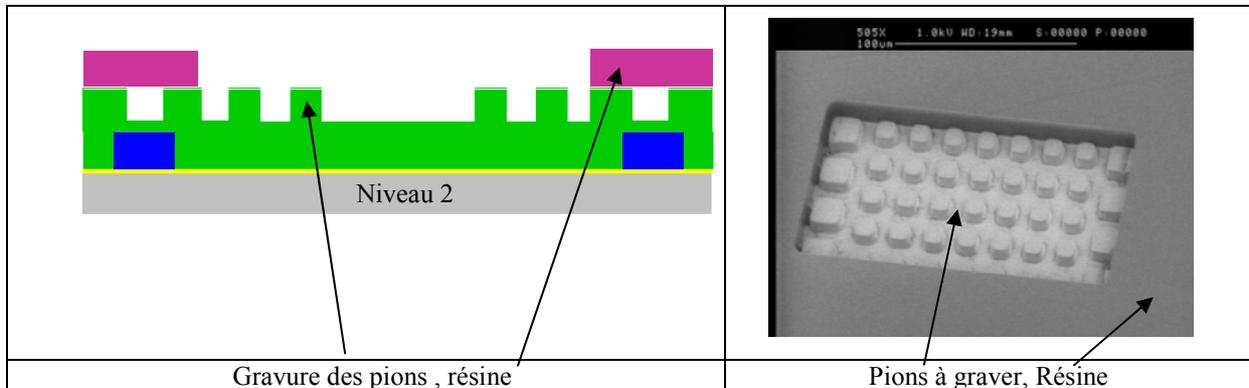
La gravure est arrêtée 'au temps'. Le but est de graver la première couche des conducteurs dans laquelle du cuivre va être électrodéposé ainsi que la première partie de la couche sacrificielle qui va permettre la libération de l'aimant mobile.

○ Délaquage



- Photolithographie niveau 3 : Préparation à la gravure des pions de la couche sacrificielle

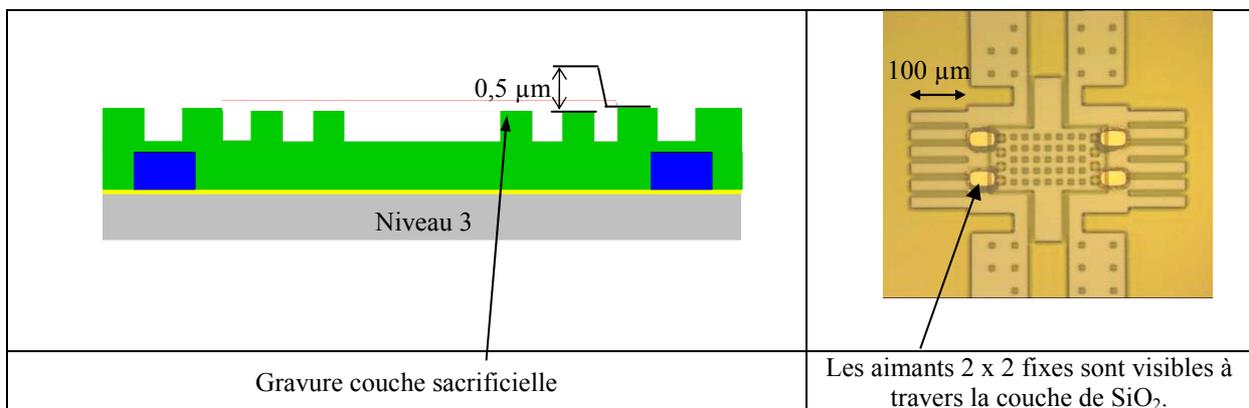
Les pions sont gravés afin de faciliter la circulation du liquide de la gravure chimique de libération de l'aimant mobile. Ils vont ensuite servir de support à ce dernier dans sa position de repos en butée.



- Gravure RIE des pions en SiO_2 ($0,5 \mu\text{m}$)

La gravure est arrêtée au temps.

- Délaquage



- Dépôt sous-couche Cu

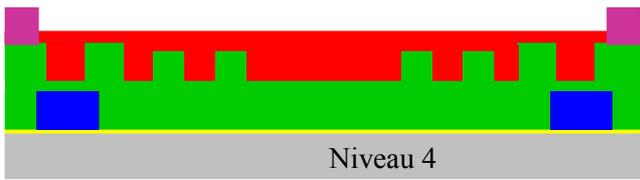
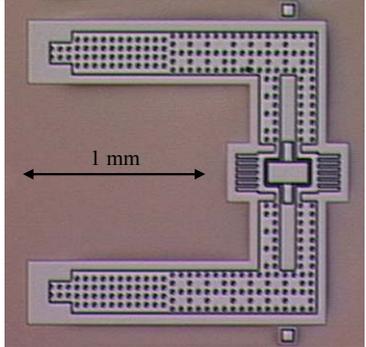
Cette sous-couche permet d'initier l'électrolyse du Cu.

- Photolithographie niveau 4 :

La résine déposée limite la surface de cuivre déposée au nécessaire et donc simplifie la CMP. La CMP est donc plus rapide car la surface de dépôt à planariser est plus faible.

- Dépôt électrolytique du Cu ($>5 \mu\text{m}$)

La vitesse de dépôt est de l'ordre de $0,17 \mu\text{m}/\text{min}$. Le cuivre déposé va simultanément remplir les conducteurs et la couche sacrificielle. Après planarisation, une paroi d'oxyde de silicium sépare les conducteurs de la couche sacrificielle assurant l'étanchéité durant la gravure chimique.

 <p style="text-align: center;">Niveau 4</p>	
<p>Dépôt électrolytique de cuivre pour les conducteurs</p>	<p>Résine permettant de limiter la surface de cuivre électrolysée. Photo avant électrolyse.</p>

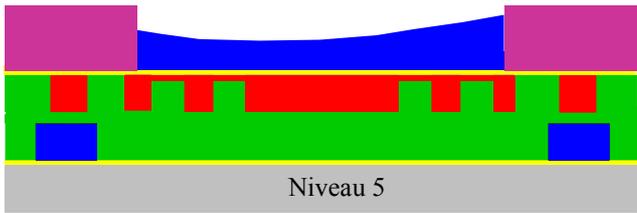
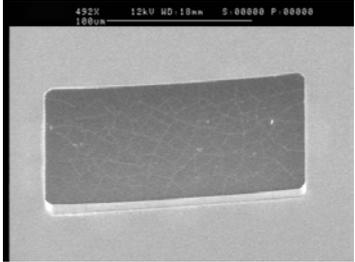
- Délaquage
- CMP Cuivre

La planarisation est critique car si elle est trop importante, un creux se forme (appelé ‘recess’) et nuit au reste des étapes car si le recess est trop important les aimants se collent sur les pions en SiO₂ et la libération devient impossible. Et s’il reste trop de cuivre, il peut rester des ponts de cuivre entre la couche sacrificielle et les conducteurs. La gravure chimique de libération s’infiltrera alors dans les conducteurs.

- Dépôt Au

Sous couche du dépôt électrolytique

- Photolithographie niveau 5 : Définition de la géométrie des aimants mobiles.
- Dépôt électrolytique des aimants mobiles en CoPt.

 <p style="text-align: center;">Niveau 5</p>	
<p>Dépôt électrolytique de l'aimant mobile</p>	<p>Aimant mobile après délaquage</p>

- Délaquage
- Gravure Ionique Au

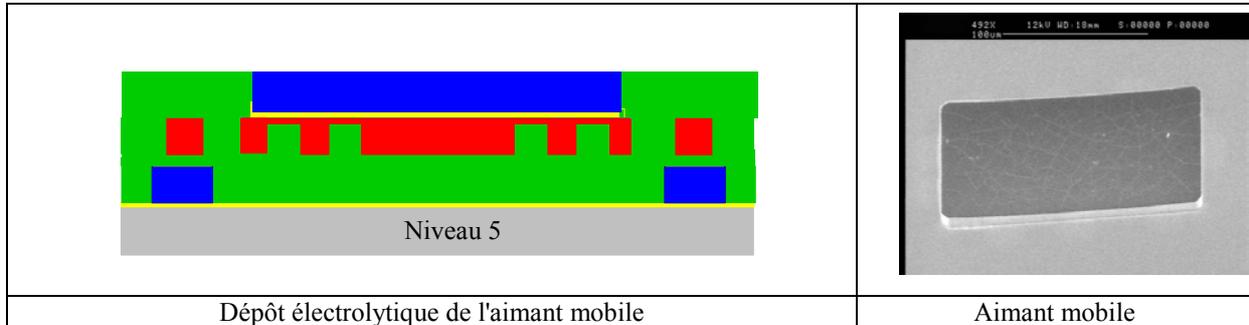
Cette gravure permet de supprimer la sous-couche d’électrolyse qui fait court-circuit entre tous les conducteurs.

- Dépôt SiO₂ 7 μm

Ce dépôt va servir à encapsuler les aimants mobiles ainsi que de support pour la seconde couche des conducteurs et pour le bord de la couche sacrificielle.

- CMP SiO₂

L'oxyde s'est déposé uniformément sur toute la surface, il y a donc des bosses au niveau des aimants mobiles. Le but de la CMP est d'obtenir une surface plane.



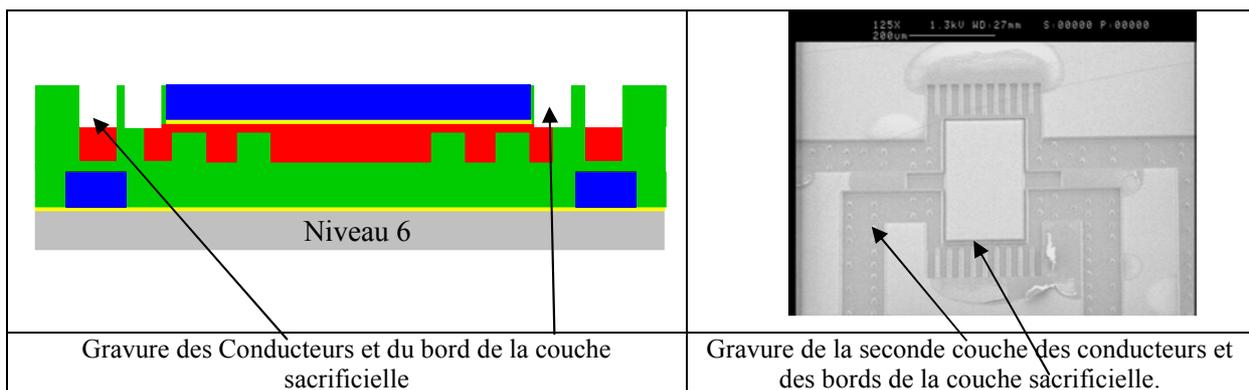
- Photolithographie niveau 6 :

Cette étape prépare à la gravure de la seconde couche des conducteurs et du bord du caisson de libération

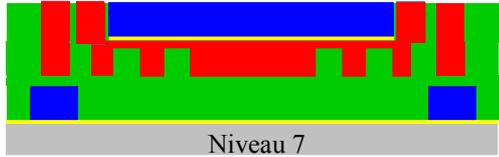
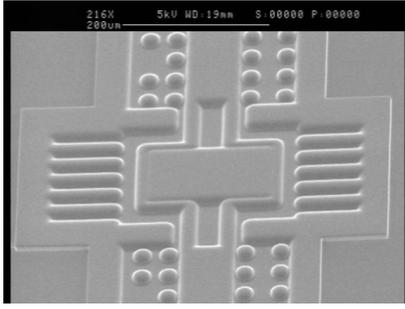
- Gravure SiO₂ 5µm

Il faut que la gravure débouche sur la première couche de cuivre en dessous pour que le courant puisse circuler. On fait donc une reprise de contact du conducteur mais aussi de la couche sacrificielle qui encapsule l'aimant mobile. La sélectivité de la gravure entre le cuivre et le SiO₂ est un atout important.

- Délaquage



- Dépôt sous-couche Ti/Cu
- Photolithographie niveau 7
- Electrolyse Cuivre

 <p style="text-align: center;">Niveau 7</p>	
<p>Dépôt de cuivre. Dépôt d'oxyde. Gravure sèche de l'oxyde</p>	<p>Motif après électrolyse de cuivre mais avant planarisation.</p>

- Délaquage
- CMP Cu

La planarisation permet aussi d'enlever la sous-couche de Ti/Cu qui court-circuite les conducteurs.

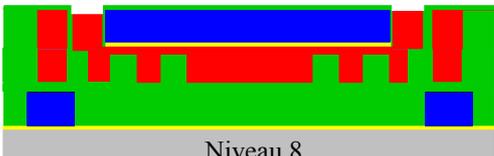
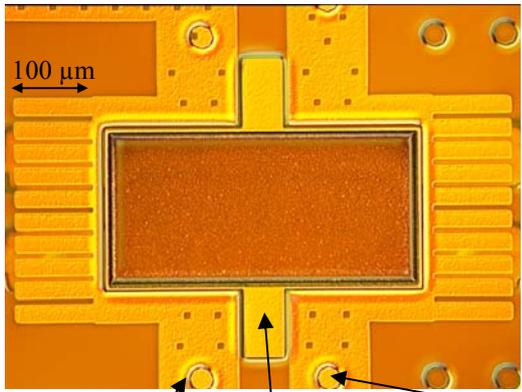
- Dépôt SiO₂ 0,3 μm

Cette couche sert à protéger le cuivre des conducteurs de la gravure chimique de la couche sacrificielle.

- Photolithographie niveau 8
- Gravure SiO₂

L'ouverture de la couche d'oxyde précédente permet de venir prendre les contacts électriques sur les conducteurs pour l'alimentation en courant et pour le passage du courant à travers les billes 'flip-chip'. Cette gravure permet aussi de dégager l'accès à la couche sacrificielle pour la libération ultérieure de l'aimant mobile.

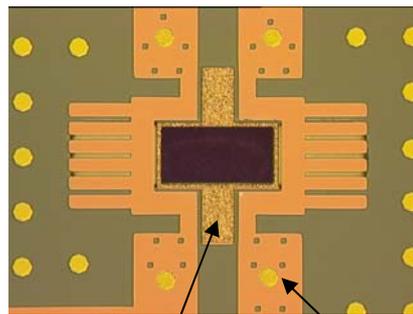
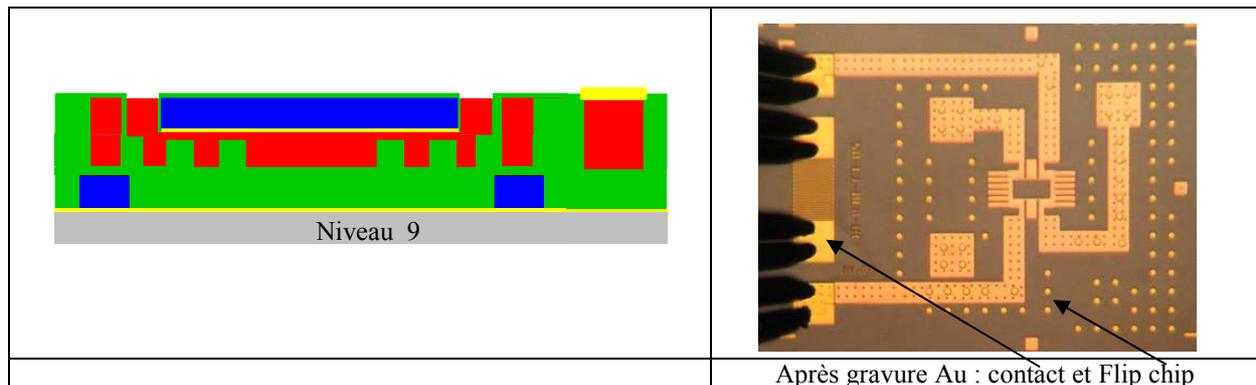
- Délaquage

 <p style="text-align: center;">Niveau 8</p>	
<p>Dépôt de cuivre. Dépôt d'oxyde. Gravure sèche de l'oxyde</p>	<p>Photo après ouverture de l'oxyde au niveau des billes 'flip-chip' et de la couche sacrificielle.</p>

- Dépôt Au pleine plaque
- Photolithographie niveau 9
- Gravure RIE de Au

Après la gravure, seul l'or nécessaire aux contacts subsiste. Seul le cuivre de la couche sacrificielle est à l'air libre.

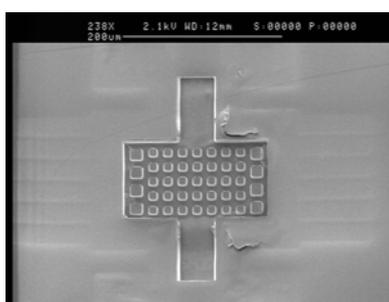
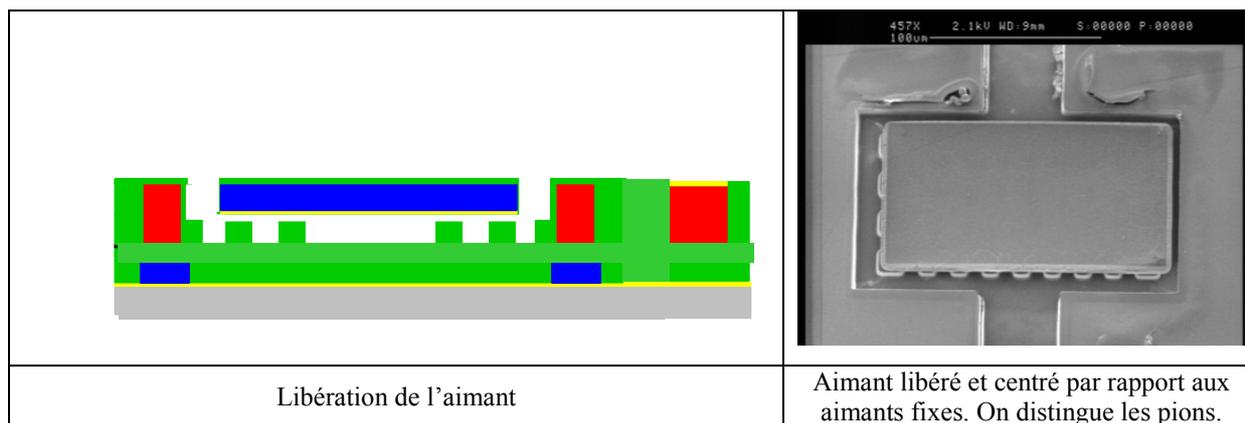
- Délaquage



Après gravure Au : Le cuivre de la couche sacrificielle est à nu, les trous (pour les billes flip-chip) dans l'oxyde sont protégés par l'Au.

- Libération Aimant (attaque chimique du Cuivre)

L'attaque chimique de la couche sacrificielle permet de graver tout le cuivre débouchant sur la plaque et donc de libérer les aimants mobiles. Lors de la libération, les aimants viennent en contact avec les pions et sont attirés et centrés par les aimants fixes. Il n'y a pas de résidu de cuivre observé entre l'aimant et les pions.



Vue des pions après avoir enlevé l'aimant libéré. Il n'y a pas de trace de cuivre résiduel.

SUBSTRAT 2 (verre)

Nous allons maintenant décrire la réalisation du substrat supérieur (Figure IV.12), qui est en verre (700 μm d'épaisseur) et non pas en silicium afin de pouvoir voir le mouvement de l'aimant mobile.

Les premières étapes concernant les aimants fixes sont identiques à celles du substrat 1, sauf qu'il n'y a pas d'aimant mobile. Tout d'abord, le substrat en verre est opacifié afin que celui-ci puisse être détecté par les machines de litho et de gravure sèche. Puis les aimants fixes sont déposés et planarisés comme pour le substrat 1. Les conducteurs de 10 μm de haut sont ensuite gravés dans 12.5 μm de SiO₂ low stress puis remplis de cuivre par dépôt électrolytique (Figure IV.13). Un caisson est alors gravé pour servir de butée supérieure à l'aimant mobile. Enfin, les billes 'flip-chip' sont électrodéposées et la sous-couche d'électrolyse gravée chimiquement

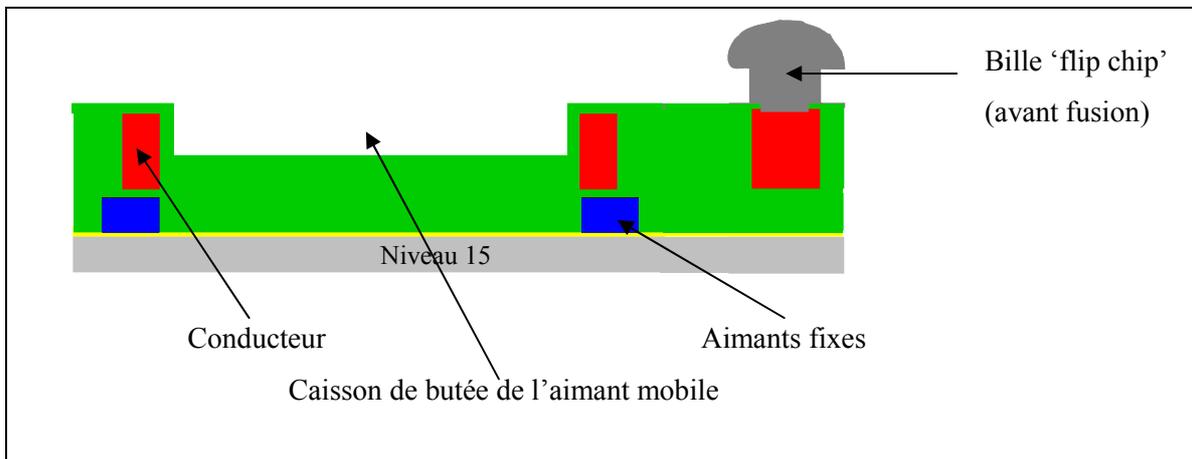


Figure IV.12

Electrolyse des billes 'flip-chip' et gravure de la sous-couche Ni

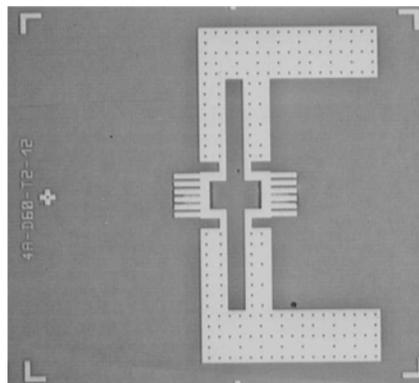
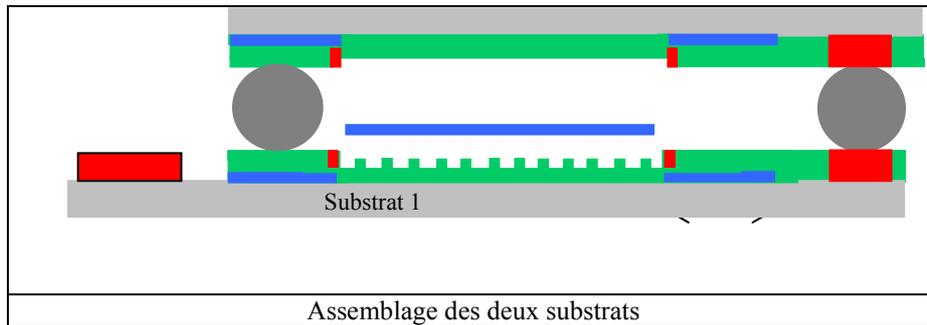


Figure IV.13

Conducteurs en cuivre du substrat 2 après CMP du cuivre

ASSEMBLAGE



Le substrat 1 est gardé tel quel, ses aimants étant libérés. Le second substrat est découpé en barrettes de cinq micro-actionneurs qui sont hybridées sur le premier substrat. La taille des puces découpées est plus petite (de 500 μm) afin d'avoir accès aux plots d'alimentation en courant lors des tests. Puis l'ensemble est chauffé afin de coller les deux substrats. La taille des billes définit donc le déplacement de la partie mobile. Cette étape semble critique puisque le chauffage doit être réalisé à basse température sans flux qui risquerait d'éjecter les aimants mobiles.

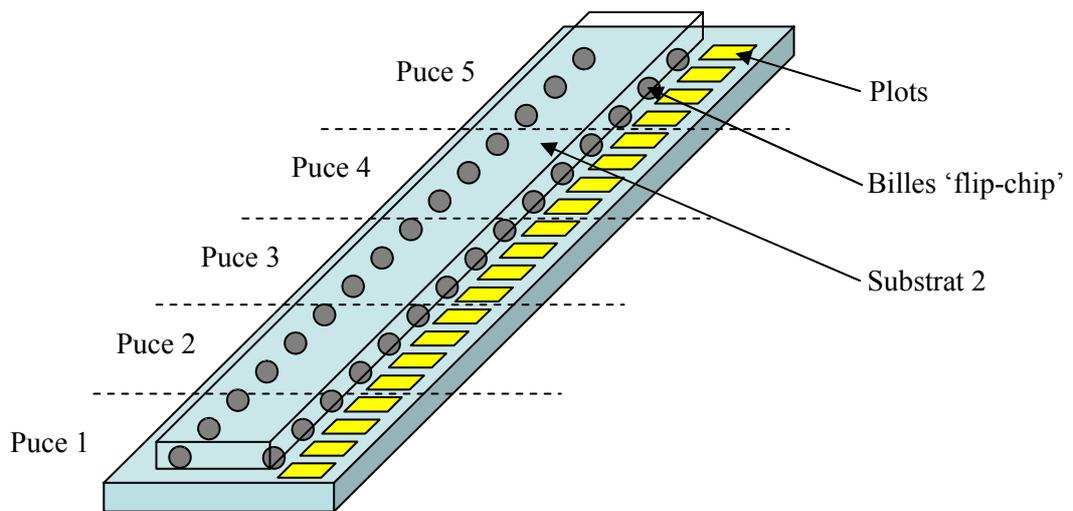


Figure IV.14

Barrette de cinq puces hybridée sur la premier substrat

Remarque : Je ne présente pas ici les étapes nécessaires à la transformation du micro-actionneur en micro-relais électrique. Il faut pour cela rajouter un niveau supplémentaire de masque plus les étapes technologiques de dépôt des contacts et d'amenée du courant.

IV.C. BRIQUES DE BASE

Lorsque l'on conçoit et fabrique un micro-système de structure complexe, on commence par étudier séparément les phases critiques de fabrication avant de réaliser l'empilement global. Cette étape s'appelle l'étude des briques de base. Dans notre cas les points critiques sont :

- ✓ La CMP du SiO₂ débouchant sur du CoPt
- ✓ Le dépôt électrolytique de CoPt
- ✓ La planarisation du cuivre
- ✓ La planarisation mécanique du CoPt
- ✓ La caractérisation magnétique des aimants
- ✓ La densité maximale de courant tolérée par les conducteurs
- ✓ La fusion des billes flip-chip
- ✓ La libération des aimants mobiles

IV.C.1. Dépôt électrolytique de CoPt

Bien que différents matériaux magnétiques durs commencent à être électro-déposés en couche mince (qq μm) comme du NdFeB-NiP [SHA05], le CoPt est relativement bien maîtrisé, parfaitement compatible avec les μ -technologies et semble, pour le moment, donner les meilleurs résultats [CoPt]. C'est ce matériau qui est actuellement développé au CEA-LETI.

Dans notre cas l'électrolyte est composé de sels de platine et de cobalt nécessaires à la formation du matériau magnétique. A cela on ajoute l'hypophosphite de sodium qui améliore les propriétés magnétique du matériau ainsi que des éléments stabilisateurs du bain. La cathode est composée du substrat silicium recouvert d'une sous-couche conductrice. L'anode est composée d'une grille de titane platinée inattaquable. Signalons enfin que les dépôts s'effectuent sous un champ magnétique de 1,2 T environ dirigé dans le plan suivant la longueur des aimants. Les aimants seront donc aimantés pendant le dépôt afin d'améliorer sensiblement leurs propriétés magnétiques.

La plaque sur laquelle on souhaite faire le dépôt est constituée d'une sous-couche conductrice en Au et les motifs sont en résine (a). La plaque subit un traitement par plasma d'oxygène afin d'améliorer la mouillabilité de la plaque et donc de favoriser le dépôt. Au début du dépôt ou si la densité de courant est suffisamment faible ($< 2,5 \text{ mA/cm}^2$), le dépôt reste homogène sur chaque motif (b).

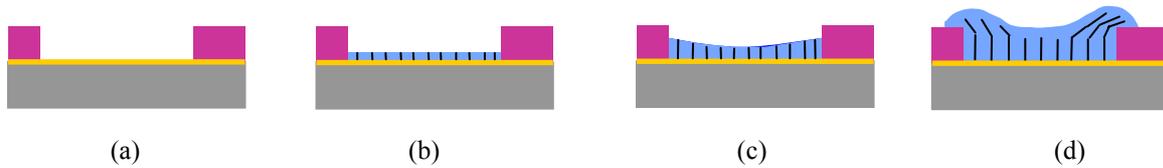


Figure IV.15

A partir d'une plaque avec une sous-couche Au (a), le dépôt commence à pousser uniformément (b) avec une structure verticale. Le CoPt croît plus vite sur les bords des motifs (c) et peut créer des oreilles néfastes aux propriétés magnétiques (d).

Mais pour obtenir de bonnes propriétés magnétiques, il faut 20% de Pt et donc augmenter la densité de courant [GAM03] jusqu'à 3,5-4 mA/cm². A cette densité, le CoPt devient non uniforme et pousse plus vite sur les bords qu'au centre du motif (c). Si la hauteur de résine n'est pas suffisante par rapport à la hauteur de CoPt désirée, le dépôt déborde et fait des 'oreilles' (d). Ces 'oreilles' nuisent gravement aux propriétés magnétiques de l'aimant car dans cette zone la morphologie du dépôt est modifiée, la croissance n'est plus verticale. Les mesures réalisées indiquent un mélange entre deux phases. De plus, lors de la formation de ces 'oreilles', la surface de dépôt est agrandie et donc la densité de courant diminue ce qui décroît la teneur en Pt.

Afin de simplifier l'empilement technologique, nous avons essayé de déposer des aimants directement dans des caissons en SiO₂. Malheureusement, le dépôt ne se passe pas de la même manière. Avec un bain neuf, les premiers dépôts sont corrects (cf. Figure IV.16 a) mais très rapidement le bain se dégrade (apparition d'un précipité noir contenant majoritairement du Pt) et le dépôt ne se fait plus dans les petits motifs (60*40 μm) (cf. Figure IV.16 b). Ce phénomène n'a pas pu être expliqué pour le moment, cette technique a donc été abandonnée au profit de dépôts en caisson résine.

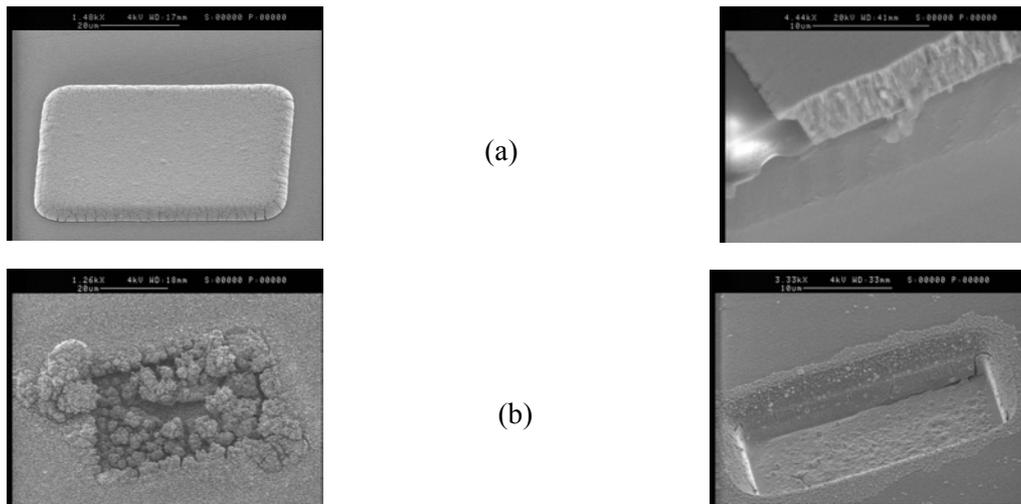


Figure IV.16
 (a) : Un dépôt dans un caisson oxyde qui se passe bien
 (b) : Mais le bain se dégrade rapidement

La durée de vie du bain est limitée. Peu à peu, et d'autant plus vite que le précipité noir se forme, la qualité du dépôt se dégrade. Les symptômes les plus courants sont des dépôts en 'choux fleurs' (cf. Figure IV.17 a) ou en lamelles (cf. Figure IV.17 b) qui se décollent. Les lamelles signalent un dépôt très riche en Pt (>80 %).

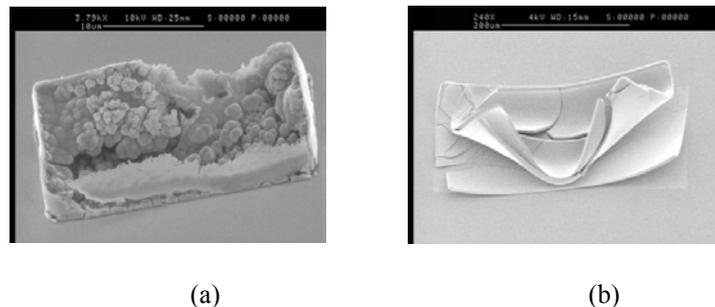


Figure IV.17
 Des signes de la dégradation du bain d'électrolyse

IV.C.2. Caissons résine

En effectuant des mesures dimensionnelles d'aimants après dépôt électrolytique (au microscope et profilomètre) nous avons remarqué de fortes différences avec les dimensions du masque. Une analyse plus poussée au MEB (Figure IV.18) montre que les flancs des aimants sont courbes au lieu d'être perpendiculaires au substrat ce qui explique les dimensions trop importantes des aimants.

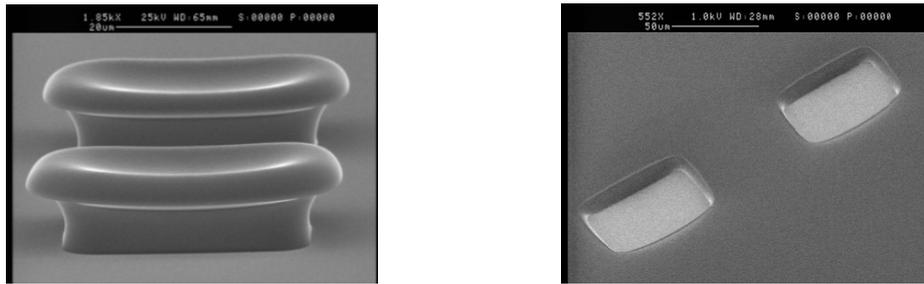


Figure IV.18

Aimant en CoPt (à gauche) ayant poussé dans un caisson de résine mal développée (à droite).

Le problème a pour source le procédé d'obtention du caisson de résine. La résine étant bien insolée et développée car il ne reste pas de traces de résine au fond des caissons, la pente ne peut venir que d'un problème de recuit. Le recuit après développement est par défaut de 115 °C sur la ligne de développement. Cette température convient à la plupart des résines mais crée des phénomènes de fluage pour la résine de 12 µm d'épaisseur. C'est-à-dire que des tensions internes à la résine se créent et déforment les motifs.

La première solution consiste à diminuer la température de recuit jusqu'à 85°C. La résine ne flue plus mais des bulles apparaissent. Celles-ci ne font pas de trous dans la résine et ne sont donc pas gênantes pour l'électrolyse. La seconde solution consiste à faire uniquement un recuit UV qui durcit la surface de la résine. Dans les deux cas les flancs de la résine deviennent quasiment verticaux (Figure IV.19).

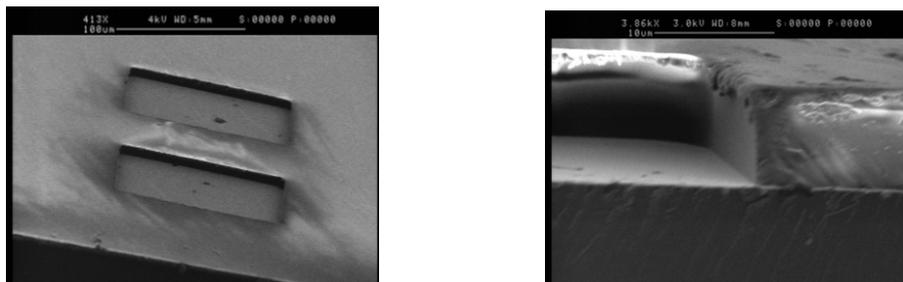


Figure IV.19

Caissons de résine 12 µm non recuit. Les flancs sont bien verticaux.

IV.C.3. Planarisation mécanique du CoPt

Après le dépôt électrolytique, l'aimant doit être planarisé. On commence par déposer une couche d'oxyde de silicium de 5 µm (après délaquage) puis on planarise l'ensemble de la plaque en frottant sur un papier d'oxyde de chrome dont les grains font 0,5 µm. Si les aimants ont débordé la résine en bord de motif, le dépôt de SiO₂ ne se fait pas sous les oreilles (Figure IV.20 (a)). Ainsi, lors de la

planarisation les poussières de CoPt et d'abrasif se coincent dans cet espace (Figure IV.20 (b)). Il est nécessaire d'utiliser un jet haute pression pour enlever ces déchets. De plus l'aimant a tendance à s'étaler et devient plus grand que les spécifications initiales. La solution est de mettre suffisamment de résine pour que l'aimant ne déborde pas durant l'électrolyse. Les étapes de lithographie doivent aussi être correctement effectuées afin d'obtenir des caissons avec des bords les plus verticaux possible.

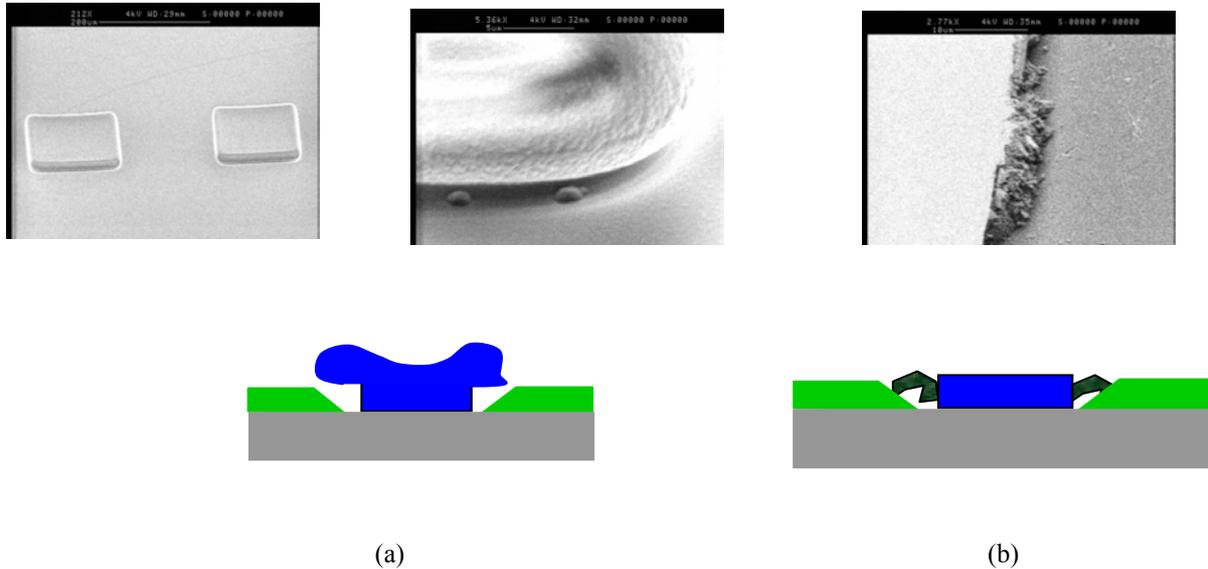


Figure IV.20

Le CoPt déposé a fait des oreilles durant le dépôt (a). On supprime ces oreilles en planarisant mécaniquement après un dépôt de SiO_2 mais des déchets de planarisation s'amalgament sur les bords.

IV.C.4. CMP du SiO_2 sur CoPt

Les aimants sont déposés dans des caissons en résine. Celle-ci est ensuite délaquée avant de déposer une couche d'oxyde PECVD. Le dépôt étant conforme, on obtient des motifs comme sur la Figure IV.21 (a).

La première étape de la CMP consiste à enlever la surépaisseur d'oxyde au dessus des aimants pour supprimer toute 'topologie'. Pour cela on utilise un produit surfactant. C'est-à-dire qu'il ne planarise l'oxyde que dans les zones où il subit de fortes pressions (ie. au dessus des aimants, cf. Figure IV.21 b).



Figure IV.21

Un aimant avant et après planarisation de la couche de SiO_2 avec un surfactant.

La seconde étape consiste à planariser simultanément l'ensemble du plan d'oxyde afin de déboucher sur les aimants. Sur la Figure IV.22, prise au microscope électronique à balayage (MEB), l'oxyde apparaît sombre et le CoPt clair. La surface a donc été bien planarisée.

Le process exact de planarisation est fourni en annexe.

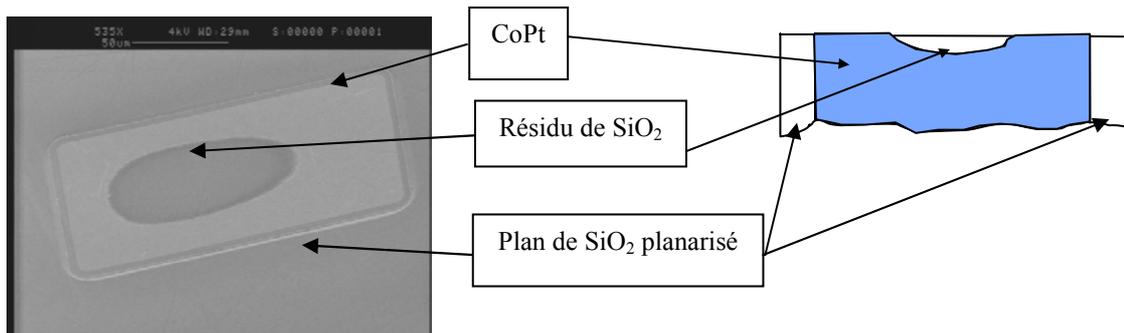
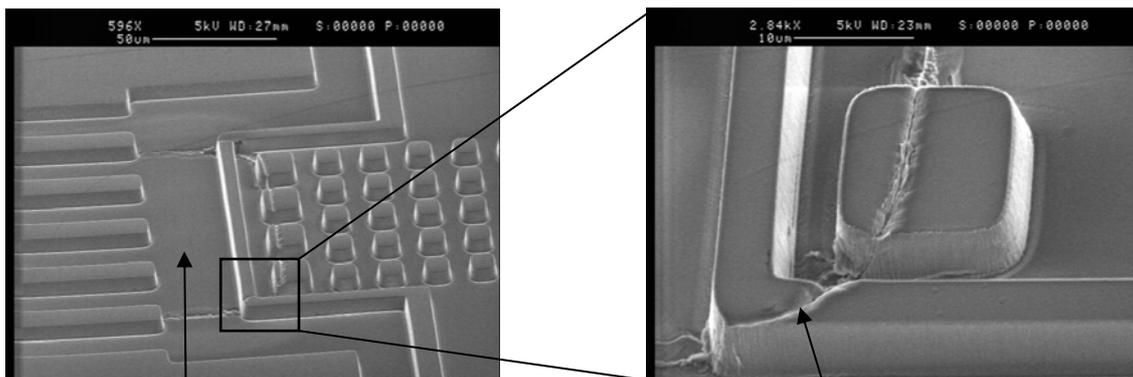


Figure IV.22
Un aimant après planarisation de l'ensemble de la surface

Une mauvaise planarisation des aimants fixes peut aboutir au cas de la Figure IV.23. Cette fissure peut sembler anodine mais lors du dépôt électrolytique des conducteurs, un pont de cuivre va se former entre la couche sacrificielle et le conducteur. D'où certainement des soucis lors de la libération.



Aimant fixe caché par l'oxyde de silicium

Figure IV.23

Réplique en SiO₂ de la fissure enterrée due aux aimants fixes mal planarisés

IV.C.5. CMP du cuivre

Les conducteurs en cuivre sont réalisés par dépôt électrolytique dans des caissons SiO_2 . Afin de simplifier la CMP, le dépôt de cuivre n'est pas réalisé sur toute la plaque mais sur des zones localisées par une couche de résine (cf. Figure IV.24 (a)). La CMP est plus rapide car la surface de dépôt à planariser est plus faible. Les détails de la CMP sont spécifiés en Annexe. Après la planarisation, on observe une surgravure (ou recess) de $0,3 \mu\text{m}$ dans le cuivre .

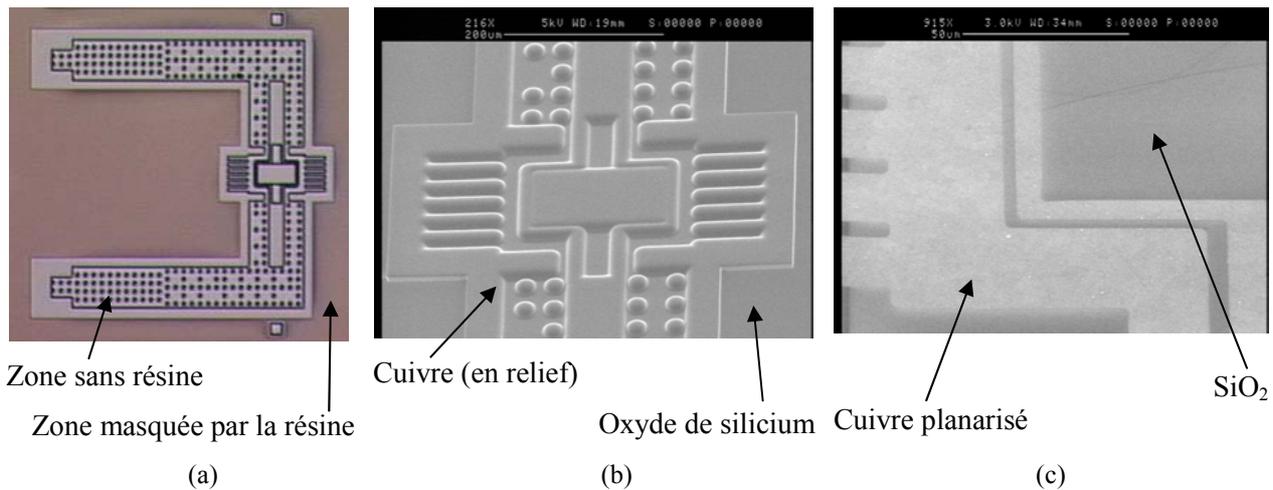


Figure IV.24

Motifs avant électrolyse avec lithographie de détournage (a), après dépôt électrolytique de Cu (b) et après CMP (c).

IV.C.6. Caractérisation magnétique

Afin de vérifier si les propriétés magnétiques de nos dépôts de CoPt sont les mêmes que celles mesurées par D. Gamet [GAM03], nous avons réalisé un dépôt sous champ magnétique ainsi que la caractérisation de ce dépôt. Des caissons de résine de $7 \mu\text{m}$ d'épaisseur sont faits par photolithographie à partir du masque des aimants mobiles. Le dépôt est réalisé à $2,4 \text{ mA/cm}^2$ pendant 2h30. L'épaisseur des aimants est d'environ $3,5 \mu\text{m}$ et la composition est de 86% Co et 14% Pt. Le VSM (Magnétomètre à échantillon vibrant) du CEA n'étant pas suffisamment sensible pour mesurer un seul aimant, le substrat est découpé et plusieurs aimants sont rassemblés pour obtenir une masse magnétique suffisante. Dans un second temps, les mesures ont été confirmées par N. Dempsey qui a mesuré des échantillons d'aimants ($400 \times 200 \times 3 \mu\text{m}^3$) au VSM du Laboratoire Louis Néel, qui est beaucoup plus sensible. Le cycle d'hystérésis dans le plan de l'aimant est présenté Figure IV.25.

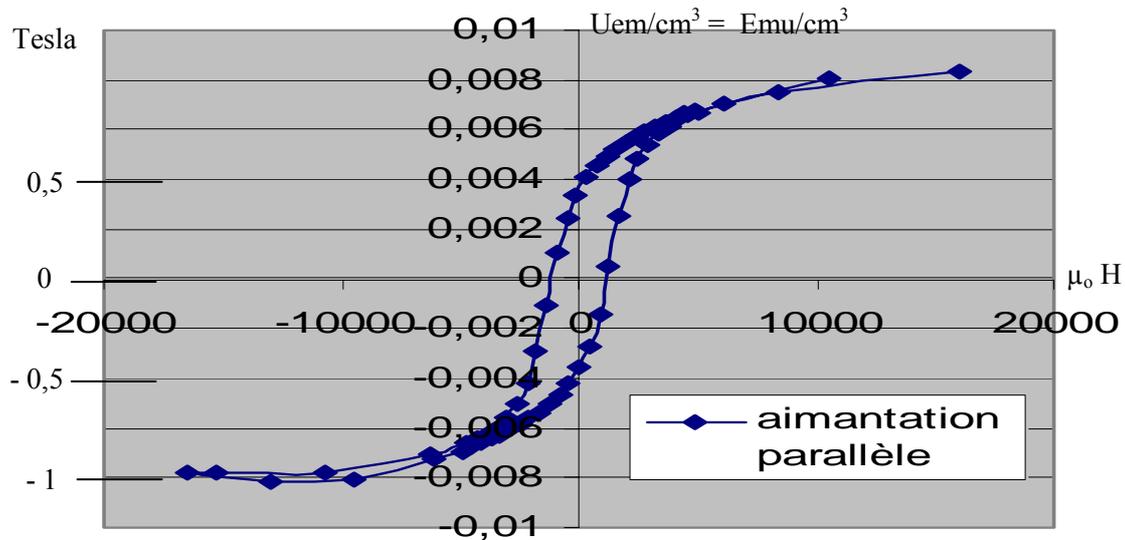


Figure IV.25
Cycle d'hystérésis du Co-Pt 86%-14%

Ce cycle est assez peu carré et la rémanence est relativement sensible au champ extérieur (la pente n'est pas verticale). Le champ coercitif mesuré est de 1250 Oe (104 kA/m) et la rémanence est comprise entre 0,4 T (mesure LLN) et 0,5 T (mesure CEA, voir (Eq. IV.1)). Les propriétés magnétiques hors du plan sont en général meilleures d'environ 10 %, notamment le champ coercitif.

Les simulations sont faites en supposant une coercivité de 0,3 T. Les caractéristiques réelles devraient donc être meilleures que celles simulées car la force des conducteurs est proportionnelle à l'aimantation des aimants. Mais le faible champ coercitif risque de faciliter la désaimantation des aimants après plusieurs impulsions de courant.

Ces valeurs sont un peu faibles en comparaison de celles rapportées par [DEC04] qui obtient des propriétés entre 2000 et 3000 Oe de coercivité et de 0,3 à 1,1 T de rémanence. Les conditions de dépôt sont donc à travailler afin d'améliorer les propriétés magnétiques. C'est-à-dire qu'il faut augmenter le pourcentage de platine jusqu'à 20%. Pour cela, il faut augmenter la densité de courant qui entraîne l'apparition 'd'oreilles' sur les aimants.

Echantillons de 400 x 200 x 3,5 μm	}	(Eq. IV.1)
Le volume des 35 échantillons est de :		
$400 \times 200 \times 3,5 \times 35 = 9,8 \times 10^6 \mu\text{m}^3$		
$M_r = 4 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$		
$1000 \text{ A/m} = 1 \text{ emu/cm}^3$		
D'où $M_r = 0,5 \text{ T}$		

Conversion en Tesla de l'aimantation mesurée en Emu.
Voir aussi en Annexe les équivalences des unités magnétiques.

R. Grechishkin a mis au point une méthode permettant de mesurer de manière magnéto-optique le champ autour d'un aimant [GRE04]. Le point fort de sa méthode est qu'elle n'est pas tributaire du volume du matériau. Il est donc capable de quantifier le champ magnétique autour de micro-aimants et ceci de manière globale en une seule image. Un premier échantillon de $400 \times 200 \mu\text{m}$ que nous lui avons remis a démontré ses propriétés en tant qu'aimant. Mais la Figure IV.26 nous montre que les oreilles des aimants modifient gravement les propriétés magnétiques et font apparaître des aimantations parasites. D'autres aimants, planarisés et libérés sont en cours de mesure.

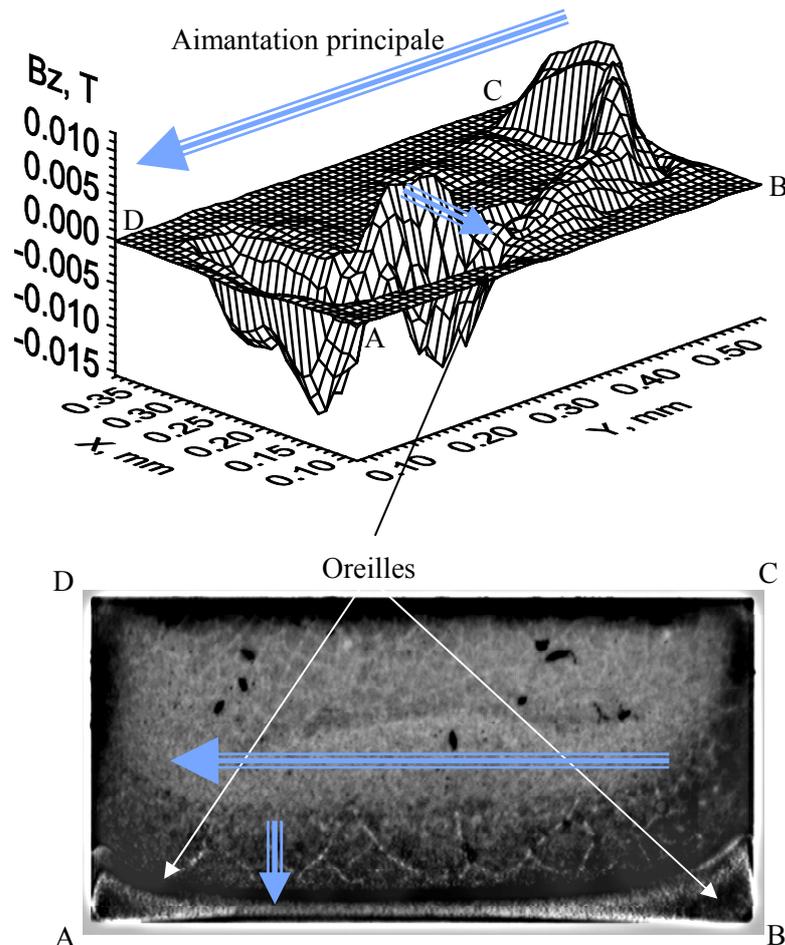


Figure IV.26

Image de l'aimant et de son champ magnétique (B_z) à $15 \mu\text{m}$ au dessus.

IV.C.7. Fusion des billes flip-chip

Le micro-actionneur monté est composé de deux puces superposées et assemblées par flip-chip. Le montage en flip-chip est un assemblage entre deux éléments grâce à des billes en matériau fusible (étain-plomb) qui permettent à la fois de régler l'espace entre les deux puces, de permettre le passage du courant et de coller les puces [PAS04, FAH04]. C'est le réglage de l'espace entre les deux puces

qui permet de régler la distance parcourue par l'aimant mobile entre les positions stables basse et haute.

Ces billes sont obtenues par fusion d'un matériau préalablement déposé par électrolyse. Les conditions d'électrolyse (épaisseur de résine, temps de dépôt) et géométriques (espace minimum entre les billes) sont obtenues grâce à la simulation. Le Tab. IV.1 récapitule les règles de construction pour les quatre diamètres de billes souhaités.

Déplacement souhaité (μm)	Pas (μm)	Garde (μm)	Epaisseur d'électrolyse (μm)	Hauteur de bille (μm)	Hauteur hybridée (μm)
30	90	30	20	36	31
60	190	68	35,8	72	61
90	270	88	51	108	90
120	300	56	67	144	121

Tab. IV.1
Conditions standard d'électrolyse des billes flip-chip pour une résine de 5 μm

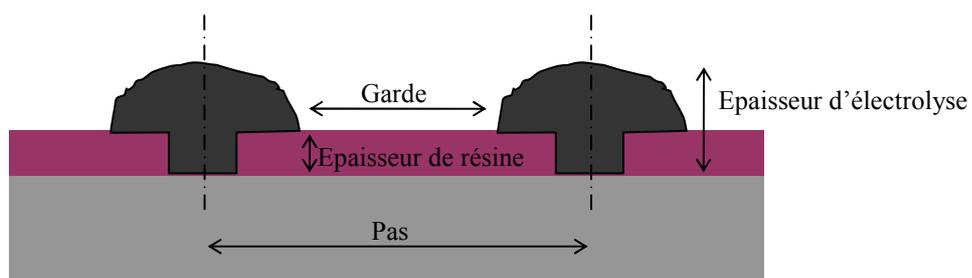


Figure IV.27
Variables du Tab. IV.1

L'électrolyse des billes SnPb débute sur une sous-couche de Ti/Ni/Ti d'assez forte épaisseur. L'une des étapes critiques consiste à enlever chimiquement cette sous-couche afin d'éviter les courts-circuits. Les risques sont les mêmes que pour la libération de l'aimant mobile, à savoir que les conducteurs en cuivre risquent d'être gravés si il y a des infiltrations chimiques sous les billes. Les

premiers essais sont concluants autant du point de vue de l'électrolyse que de la gravure chimique de la sous-couche (Figure IV.28).

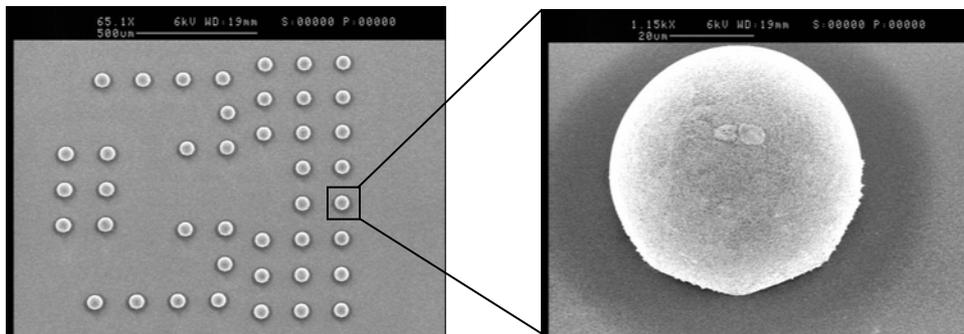


Figure IV.28

Ensemble des billes sur une puce et zoom sur une bille (remarquer la base hexagonale)

IV.C.8. Libération de l'aimant mobile

La libération de l'aimant est l'étape finale de l'empilement du substrat inférieur. A partir du moment où les aimants sont libres les plaques doivent être manipulées avec beaucoup de précaution afin de ne pas les perdre.

La libération a lieu par gravure chimique du cuivre entourant l'aimant (Figure IV.29).

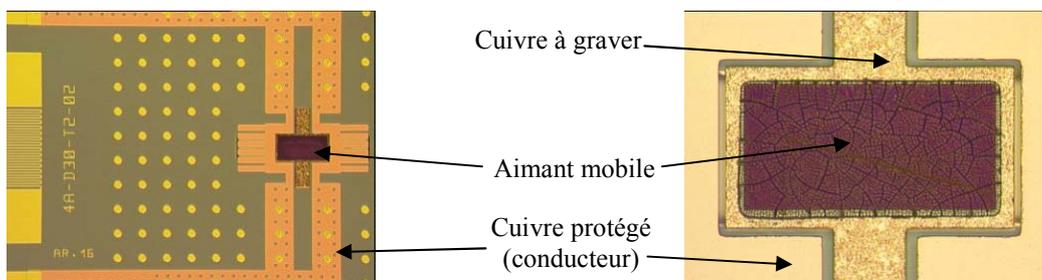


Figure IV.29

Vue d'une puce et zoom sur l'aimant mobile avant libération

La plaque est alors trempée dans un bain à base d'ammoniaque qui attaque le cuivre mais est sélectif vis-à-vis de l'or, de l'oxyde de silicium, du cobalt et du platine. Cette étape est critique car la moindre infiltration par le biais d'une fissure ou d'un mauvais alignement dans les conducteurs rend ceux-ci inutilisables (Figure IV.30).

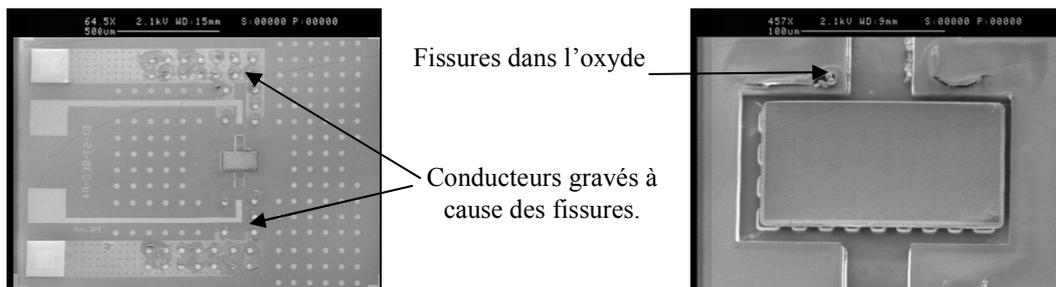


Figure IV.30

Après libération : Fissuration de la couche protectrice d'oxyde et infiltration de la sauce de gravure

Enfin le temps de gravure est important à maîtriser afin de ne pas augmenter les risques d'infiltration et de permettre néanmoins la libération d'un maximum d'aimants (Figure IV.31). La manipulation et le séchage après libération doivent être minutieux afin de ne pas perdre les aimants (Figure IV.32). Le rinçage se fait à l'alcool et le séchage sur une plaque chauffante.



Figure IV.31

La gravure chimique a été trop courte pour pouvoir libérer certains aimants



Figure IV.32

Aimant libéré perdu et aimant libéré en dehors de son caisson (collé à l'envers sur un aimant fixe)

Les premières plaques ont mis à jour des défauts d'alignement ainsi que des fissures dans l'oxyde qui conduisent à la destruction des conducteurs pendant la gravure. Un essai avec une plus grande épaisseur d'oxyde ($0,6 \mu\text{m}$ au lieu de $0,3 \mu\text{m}$) n'a pas permis de supprimer les fissures. La Figure IV.33 montre les causes probables de l'infiltration de la sauce de gravure dans les conducteurs.

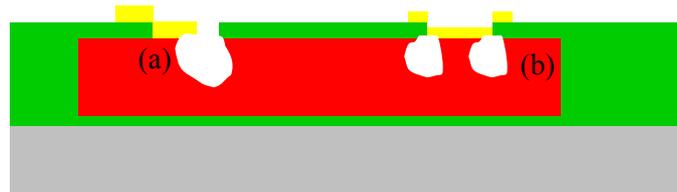


Figure IV.33

Deux causes de la gravure des conducteurs : le désalignement (a) et un dépôt d'or peu conforme (b)

Un mauvais alignement des masques en lithographie (a) ou encore le dépôt de l'or par pulvérisation qui n'est pas assez conforme et pas assez épais (b). C'est-à-dire que l'or est pulvérisé verticalement et qu'il ne se dépose pas sur les flancs du caisson en oxyde. La sauce de gravure peut donc s'infiltrer entre l'or et l'oxyde.

Le remède envisagé est de déposer d'abord la couche d'or avant celle d'oxyde puis de redéposer une nouvelle couche d'or par-dessus (Figure IV.34). L'oxyde est très conforme et va donc bien épouser les formes de l'or. Et on rajoute une autre couche d'or pour avoir la bonne dimension des plots d'alimentation en courant.

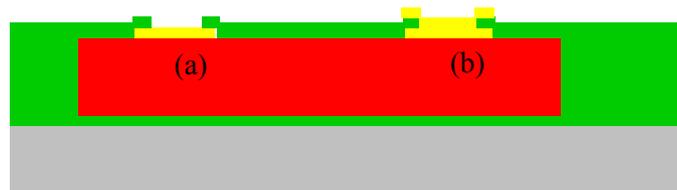


Figure IV.34

Une solution pour empêcher la gravure chimique des conducteurs

Une seconde voie d'exploration a consisté à changer la sauce de gravure chimique afin de limiter la détérioration des conducteurs. Nous avons ainsi réussi à obtenir de bons résultats : les conducteurs sont très peu gravés (Figure IV.35). Mais cette nouvelles technique est plutôt lente et nécessite un bain pour la gravure du cuivre (

Figure IV.36 gauche) et un bain pour la gravure du titane (

Figure IV.36 droite) de la sous-couche d'électrolyse.

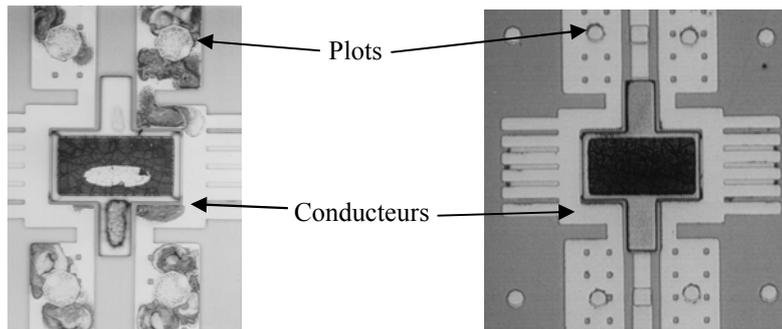


Figure IV.35

A gauche, l'ancienne gravure chimique grave également les conducteurs au niveau des plots
A droite, avec la nouvelle sauce de gravure, les conducteurs sont très peu attaqués

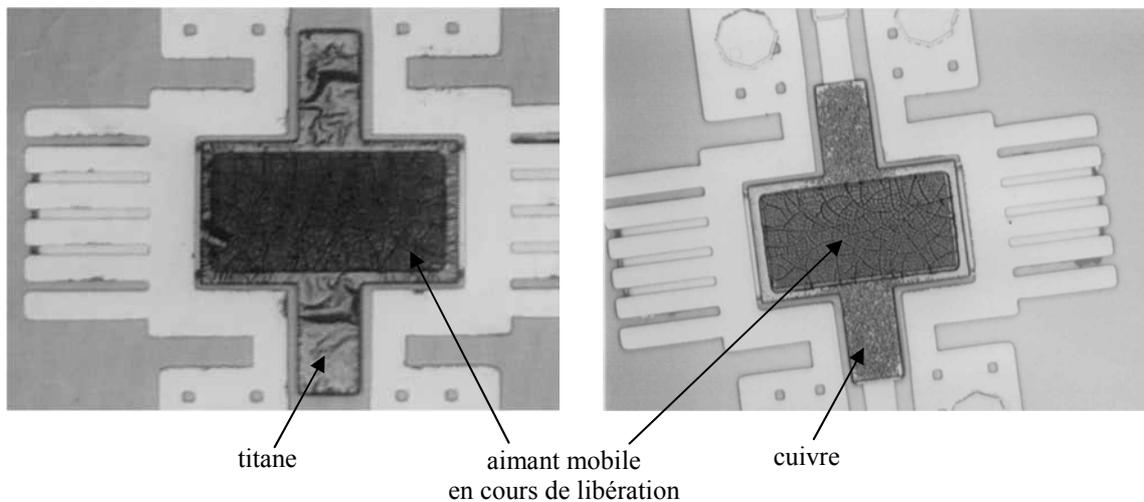


Figure IV.36

A gauche, une première couche de cuivre a été gravée, celle-ci débouche sur du Ti
A droite, le cuivre est en cours de gravure

IV.D. AVANCEE DES TRAVAUX :

Le premier substrat est pratiquement terminé. Seule la dernière étape de libération pose encore quelques difficultés. Une fois ce problème résolu la majorité des aimants devrait être libérée. Mais il va malheureusement rester certains dispositifs qui ne fonctionneront pas. Les causes sont :

- Epaisseur de cuivre entre l'aimant et l'oxyde trop faible (problème de gravure chimique)
- Désalignement entre l'aimant mobile et le caisson de libération (l'aimant reste 'collé' d'un côté)
- Les flancs de résine du caisson de l'aimant mobile ne sont pas droits (angle de 70°), l'aimant est donc plus grand que prévu.

Un mélange de ces trois problèmes donne le résultat Figure IV.37. L'aimant semble soudé aux bords du caisson en oxyde.

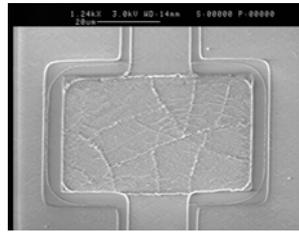


Figure IV.37
Les puces dont les aimants mobiles font $60 \times 40 \mu\text{m}$ sont inutilisables.

Le second substrat est en bonne voie de réalisation. Les essais sur les billes flip-chip ont été menés avec succès et les plaques sont presque terminées. Mais les manipulations des substrats en verre sont plus délicates car ils sont plus fragiles que les substrats silicium même s'ils sont plus épais. Ainsi, ils sont sensibles aux contraintes dues au dépôt de matériaux (SiO_2), à la planarisation et aux chocs (manipulation des substrats par les machines).

Les premiers tests sur les aimants libérés ont été menés sur le substrat inférieur seul. L'objectif étant de voir le comportement de l'aimant mobile lors d'impulsions de courant. Nous avons ainsi vérifié que les aimants peuvent être éjectés de leur caisson (à plusieurs millimètres). Mais les courants utilisés sont de l'ordre de 6 A pour des impulsions de l'ordre de $500 \mu\text{s}$, ce qui est loin des 1 A simulés. De plus, les forces en jeu sont très faibles (qq μN) et donc l'aimant ne bouge pas s'il n'est pas parfaitement libéré (voile de titane, SiO_2 mal gravé, gravure du cuivre incomplète).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Tout au long de ces chapitres nous avons démontré qu'il est possible de réaliser un micro-actionneur intégré bistable dont le déplacement peut aller jusqu'à 100 μm et dont le temps de commutation reste inférieur à la milliseconde.

Nous avons commencé par étudier les différents types d'actionnements utilisés dans les technologies MEMS, à savoir l'électrostatique, la thermique, la piezoélectricité et le magnétisme. A nos yeux seul le magnétisme peut remplir ce cahier des charges. En effet, un actionnement de 100 μm demande a priori une interaction efficace même à grande distance ce que permet de réaliser l'actionnement magnétique. De plus la bistabilité est facile à mettre en œuvre avec des aimants. Nous avons ainsi conçu un premier modèle d'actionneur basé sur des aimants et commandé par impulsion de courant. La partie mobile n'a aucune liaison mécanique (de type poutre en flexion, par exemple), dans le but de limiter la taille des puces mais surtout afin de commuter plus rapidement. Notre choix s'est aussi porté sur un déplacement vertical de l'aimant mobile, ce qui induit un report de substrat avec des billes 'flip-chip'. L'actionnement se fait donc simultanément au niveau des deux butées, et la taille des billes détermine la distance de commutation (de 30 μm à 120 μm pour notre filière).

Nous avons ensuite étudié différents modèles analytiques magnétiques afin de calculer les forces, les couples ainsi que le champ magnétique d'aimants ou de conducteurs électriques. En choisissant parmi ces modèles, nous avons mis en place un programme décrivant le mouvement de la partie mobile pendant la commutation. Ce programme utilise la méthode des surfaces qui est basée sur l'intégrale d'un champ magnétique sur les surfaces d'un aimant. A partir du calcul des forces et des couples, nous avons réalisé un modèle dynamique du micro-actionneur. Ainsi nous avons réussi à dimensionner correctement le micro-actionneur et à en étudier le comportement. L'étude a montré la stabilité de l'aimant mobile en butée ainsi que pendant la commutation. Ce modèle dynamique, qui permet de visualiser des animations réalistes, a également été couplé au logiciel analytique intégral Dipôle3D. Mais ce modèle est trop basique et trop lent pour pouvoir effectuer une optimisation globale des dimensions du micro-actionneur car cela demande de multiples itérations. L'optimisation a donc été effectuée grâce au logiciel Pro@Design au sein de l'équipe Conception & Dimensionnement Intégrés (CDI) du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble. Outre un dimensionnement optimisé

pour minimiser le courant de commutation, l'optimisation a aussi mis en avant la nécessité d'utiliser de fortes densités de courant dans les conducteurs.

Cette découverte pose le problème de l'échauffement des conducteurs durant les impulsions de courant qui sont certes très courtes en durée ($< 500 \mu\text{s}$) mais dont la dissipation par effet Joule n'est pas négligeable. Cette optimisation n'ayant été faite qu'en courant, il faudra la refaire en cherchant à optimiser l'énergie, c'est-à-dire en optimisant aussi la résistance du conducteur.

Nous avons donc mené une étude expérimentale et théorique de l'échauffement d'un conducteur de taille micrométrique pendant une impulsion de courant. Cette étude a démontré l'utilité des radiateurs intégrés aux conducteurs permettant d'absorber la chaleur sans modifier la densité de courant. Ainsi la densité de courant critique (c'est-à-dire juste avant que les conducteurs ne fondent) est passée de 40000 A/mm^2 à 90000 A/mm^2 . L'étude expérimentale a permis de déterminer la constante thermique des matériaux. Le modèle sous Flux 2D a montré une bonne corrélation avec l'expérimentation.

Fort d'un système dimensionné et modélisé, nous avons mis au point le flow-chart de la filière puis lancé la réalisation d'un prototype du micro-actionneur dans les salles blanches du CEA-LETI. Nous avons tout d'abord conçu et dessiné les masques. Chaque puce fait 3 mm^2 , ce qui fait 6 mm^2 de substrat utilisé par puce hybridée à double substrat. Puis les briques de bases ont été développées en salle blanche. Parmi ces briques de base, on peut noter le dépôt électrolytique des aimants en CoPt qui est développé au LETI depuis plusieurs années. Après l'échec du dépôt en caisson d'oxyde de silicium, nous avons conclu que les aimants doivent être déposés en caisson résine. La plupart des autres briques de bases (Planarisation mécano-chimique, dépôt électrolytique du cuivre) ont été validées sans grandes difficultés.

Toutefois le prototypage du premier substrat, c'est-à-dire l'assemblage de toutes les briques de base, nous a réservé de nombreuses surprises. Notamment la libération chimique du cuivre emprisonnant les aimants mobiles qui est compliquée car l'attaque chimique libère les aimants mais s'infiltré aussi dans les conducteurs en cuivre et les détériorent. Nous avons trouvés des solutions en modifiant l'empilement technologique et la sauce de gravure. Néanmoins les premiers échantillons devraient être prêts courant 2005.

Et après...

Prototyper et tester ce micro-actionneur n'est qu'un objectif à court terme. Cette réussite montrerait non seulement la forte capacité du CEA/LETI à intégrer des aimants dans des micro-systèmes mais surtout le grand intérêt à développer des MAGMAS. L'objectif à moyen terme est de définir un nouveau cahier des charges et trouver des partenaires industriels pour réaliser un produit fini : un micro-relais RF ou de puissance très efficace par exemple (temps de commutation $< 5 \mu\text{s}$, déplacement $> 10 \mu\text{m}$, faible résistance de contact). Pour cela nous disposons d'excellentes connaissances en micro-technologie ainsi que des salles blanches on ne peut mieux équipées. Les

matériaux magnétiques en jeu sont primordiaux : une forte collaboration entre le Laboratoire Louis Néel et le LETI nous permettra d'intégrer les meilleurs matériaux magnétiques existant (CoPt électrodéposé ou bientôt SmCo pulvérisé). Grâce à ses connaissances en simulation et optimisation ainsi qu'à sa collaboration avec le CEA/LETI et le Laboratoire Louis Néel, le Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG) est capable de concevoir, modéliser, dimensionner et optimiser la consommation en énergie des micro-structures magnétiques. Ce micro-actionneur devra être le plus simple possible afin de réduire au possible le temps de prototypage mais également pour rendre attrayantes les solutions magnétiques aux yeux des industriels.

Un des moyens pour réduire le temps de commutation et l'énergie de commutation est d'utiliser des aimants très performants. Par exemple le SmCo est 30% moins dense que le CoPt et a une rémanence proche de 1,2 T, soit 3 fois plus que le CoPt. Ceci signifie que pour un micro-actionneur donné, remplacer le CoPt par du SmCo avec un volume identique revient à diviser par 3 le courant de commutation (si on veut garder la même force des conducteurs sur l'aimant mobile) et donc l'énergie de commutation est simplement divisée par 9 uniquement grâce au courant ! De plus l'aimant mobile est 30% plus léger, ce qui diminue d'environ 50% le temps de commutation et donc divise encore par deux l'énergie de commutation ! Sur un micro-actionneur optimisé, cela signifie que le courant de commutation sera inférieur à 100 mA pour un temps de commutation de l'ordre de 150 μ s et un déplacement de 100 μ m de la partie mobile.

Pour en revenir à la base du problème, il est important de rappeler que le point de départ qui se situe bien avant cette thèse est de faire des micro-commutateurs à contact métallique réel par rapport aux 'interrupteurs statiques' comme le transistor ou le thyristor. En effet, les produits issus du silicium dopé n'assurent ni une résistivité nulle en mode passant, ni infinie en mode ouvert et il y a aussi une perte de linéarité en mode passant et une chute de tension aux bornes du composant (0,3 à 0,7 V). Les relais métal classiques ont ces avantages mais coûtent cher et sont très difficiles à miniaturiser tels quels. Les MEMS et les MAGMAS peuvent apporter des solutions à ce problème car ils sont petits (qq mm^2), totalement intégrés et permettent d'obtenir un vrai contact métallique comme sur les relais classiques. C'est pour cela que les micro-switchs mécaniques, et magnétiques dans notre cas, sont promis à un grand avenir. Deux solutions ont déjà été développées entre le LEG et le LETI : un MAMBA qui se déplace horizontalement de 10 μ m et un MIAM qui se déplace verticalement d'une centaine de μ m. Et les applications ne se limitent pas au micro-relais mais aussi à des composants dynamiques plus complexes.

On peut imaginer commuter l'aimant mobile avec le courant qui circule dans le relais. Si ce courant est de type sinusoïdal, l'aimant mobile va commuter à chaque inversion de courant. On pourrait ainsi réaliser un redresseur de courant qui fonctionne avec une tension très faible et automatiquement. Ce redresseur pourrait résoudre des problèmes typiques pour les micro-sources d'énergie autonomes et portables comme le micro-turbo-générateur planaire développé au LEG ou au MIT. Il est aussi possible de hacher des signaux ou de faire des commutateurs de signaux ultra faibles

pour les mesurer à la détection synchrone, signaux qui autrement se perdraient dans les impédances des circuits de traitement classiques.

Dans le cas du MIAM, la grande distance de commutation (100 μm , voire plus) permettra de commuter des grandes tensions, ce qui n'est pas classique dans les micro-relais existants. Un redimensionnement de l'actionneur permettrait de commuter également de forts courants. Ainsi, un aimant mobile plus grand améliore les surfaces en contact ainsi que la stabilité durant la commutation. Il est aussi envisageable de contrôler la coupure du contact ou son amorce. De plus, si la force de contact due aux aimants fixes n'est pas suffisante, il est possible de l'augmenter fortement en utilisant les conducteurs électriques non plus seulement pour commuter mais aussi pour renforcer le contact.

Dans un avenir encore plus lointain, il serait intéressant d'étudier des techniques de fabrication et d'intégration moins onéreuses et plus simples que le CoPt ou le SmCo. Le savoir acquis dans ce domaine peut aussi profiter à d'autres type d'actionneurs que les micro-relais. Nous pouvons imaginer des micro-valves magnétiques intégrées dans des micro-pompes magnétiques, des bio MAGMEMS pour déplacer des cellules vivantes grâce à des effets magnétiques...

BIBLIOGRAPHIE

Chapitre I :

[PAS89] : F. Pashchen , Über die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff and Kohlensäure bei verschiedenen Drücken erforderliche Potentialdifferenz", Weid. Annalen der Physick, Vol 37, pp. 69-96, 1889

: <http://www.luxfamily.com/hv/paschen.pdf>

[BER] : Université de Berkeley, USA

http://www.cchem.berkeley.edu/editor/Publications/journal/volume10/no2/tanhall_maboudian.htm

[FUJ00] : http://toshi.fujita3.iis.u-tokyo.ac.jp/Home_page.html

[CHE02]: Wen-Chih Chen, J.Hsieh and W.Fang, A novel single-layer Bidirectional out of plane electrothermal microactuator, 2002 IEEE

[BIL03]: C.Billard, 5th annual review of LETI, Overview of RF MEMS at LETI, 2003

[LAB03]: <http://www.univ-fcomte.fr/actualite/en-direct/num171/rech1.htm>

[LOY]: http://www.wtec.org/loyola/mcc/mems_eu/Pages/Chapter-5.html

[LEE04] : H.C. Lee, J.Y Park, K.H. Lee, H.J. Nam, J.U. Bu, Silicon Bulk Micromachined RF MEMS Switches with 3,5 Volts operation by using Piezoelectric Actuator, IEEE MTT-S Digest, pp; 585-588, 2004

[TAK00] : S.Takeuchi, I.Shimoyama, A three dimensional shape memory alloy microelectrode with clipping structure for insect neural recording, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.9, no 1, pp 24-31, March 2000

[KOH04] : M.Kohl, D.Brugger, M.Ohtsuka, T.Takagi, A novel actuation mechanism on the basis of ferromagnetic SMA films, Sensors and Actuators A 114, pp 445-450, 2004

[CUG02] : O.Cugat, Microactionneur électromagnétiques – MAGMAS, collection Hermes-Science / Lavoisier ISBN 2-7462-0449-5,2002

[DEL04] : J. Delamare, G. Reyne, O.Cugat , H. Rostaing, Magnetic down-scaling laws, micro-magnets and applications of magnetic micro-actuators (MAGMAS), HPMA '04, Annecy, France, september 2004, pp 767

[LUO04]: Y.Luo, Current Status of global NdFeB magnet industry, HPMA '04, Annecy, France, september 2004, pp 28

[HOS94] : H. Hosaka, H.Kuwano, K.Yanagisawa, Electromagnetic microrelays: concepts and fundamental characteristics, Sensors and Actuators A, 40 (1994) pp. 41-47

[MAT00] : T. Matsuura, Silicon micro optical switching device with an electromagnetically operated cantilever, sensor and actuator 83,p 220-224, 2000

[YOU01] : J.Young, K.Kweon, Fabrication and Experiments on Electromagnetic Micromirror Array with Bulk Silicon Mirror Plate and Aluminum Spring, TRANSDUCERS '01 EUROSENSORS XV, The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, June 10 – 14, 2001

[FIS01] : K. Fischer, B. Chaudhuri, S. McNamara, H. Guckel, Y.h Gianchandani, D. Novotny, A latching, bistable optical fiber switch combining LIGA technology with micromachined permanent magnets, TRANSDUCERS '01 EUROSENSORS XV, The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, June 10 – 14, 2001

[WRI98] : J. A. Wright and Y. Tai, Micro-Miniature Electromagnetic Switches Fabricated Using MEMS Technology, *Proceedings: 46th Annual International Relay Conference: NARM '98*, Oak Brook, Illinois, pp.13-1 to 13-4, April 1998.

[MIC02] : <http://www.microlab.net>

[DIE04] : C.Dieppedale, B.Desloges, H.Rostaing, J.Delamare, O.Cugat, J.Meunier-Carus , Ultra-fast levitating Magnetic Bi-stable Micro-Actuator with Integrated Permanent Magnets, HPMA proceedings, Annecy, France 1st Sept. 2004

[DEL01] : J. Delamare, O. Cugat, C. Locatelli, 2001 Micro-actionneur bistable utilisant le guidage magnétique et des aimants, patent CEA/INPG N° FR 01 10 81 registered on 27/07/2001

[BREZ03] : I. Brezaneau, étude d'un micro-relais magnetothermique, DEA, LEG, 2003

[CHO03] : H.J Cho and C. H Ahn, Magnetically-driven bi-directional optical microscanner, J. Micromech. Microeng, 13 383–389, 2003

[YAN04] : J.Yan, S.Luanava, V.Casasanta, Magnetic Actuation for MEMS Scanners for Retinal Scanning Displays, SPIE proceedings 4985, MOEMS Display and Imaging Systems, ISBN 0-8194-4785-4.

[BEN04] : N.Bencheikh, C.Prelle, F.Lamarque, Electromagnetic mini-actuator for positioning stage, 6th Japan-France & 4th Asia-Europe Mechatronics Congress, 2003, pp. 44-48

[PAG00] : PA.Gilles, O.Cugat, J.Delamare, C.Divoux, V.Fernandez, 3-phase coil for planar brushlessmicromotor, Actuator 2000, pp. 181-184 Bremen 2000

[ACH03] : N. Achotte, H. Raisigel, J. Delamare, O. Cugat 2003 Characterization of planar brushless μ -motors / μ -generators, Proc. MECHATRONICS 03, Sendai, pp179-183, Sept 2003

[SEIKO] : <http://www.seikowatches.com/collection/kinetic/k1.html>

THESES ou ARTICLES de micro-actionneurs lus après la rédaction de thèse:

[QIU03] : Jin Qiu, An Electrothermally-Actuated Bistable MEMS Relay for Power Applications

M.S. Mechanical Engineering, M.I.T. 1999
B.S. Electrical Engineering, Nanjing University 1997
Massachusetts Institute of Technology
June 2003

[GAR04] : Gary D. Gray Jr., Paul A. Kohl, Magnetically bistable actuator Part 1. Ultra-low switching energy and modelling, Received 26 July 2004; received in revised form 19 October 2004; accepted 21 October 2004, Sensors and Actuators A xxx (2004) xxx–xxx

[GAR04] : Gary D. Gray Jr., Eric M. Prophet, Lingbo Zhua, Paul A. Kohl, Magnetically bistable actuator Part 2. Fabrication and performance Received 26 July 2004; received in revised form 19 October 2004; accepted 21 October 2004, Sensors and Actuators A xxx (2004) xxx–xxx

[BER04] : Jonathan J. Bernstein, *Senior Member, IEEE*, William P. Taylor, *Member, IEEE*, John D. Brazzle, *Member, IEEE*, Christopher J. Corcoran, Gregory Kirkos, Jefferson E. Odhner, Ajay Pareek, Marc Waelti, and Marvin Zai, Electromagnetically Actuated Mirror Arrays for Use in 3-D Optical Switching Applications , JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 13, NO. 3, JUNE 2004

Hyoungh J. Cho and Chong H. Ahn, A Bidirectional Magnetic Microactuator Using Electroplated Permanent Magnet Arrays, Journal of MicroelectroMechanical Systems, Vol. 11, No. 1, February 2002

Chapitre II :

[CHE04] : H. Chetouani, Choix de structures et outils pour les microsystèmes magnétiques, DEA optimisation, LEG, 2004

[GAM03] : D. Gamet, Elaboration par voie électrochimique, caractérisation et intégration pour applications industrielles, d'aimant permanent à base de CoPt, Thèse, CEA Grenoble/LETI/LCMI, 2003

[DEL02] : J. Delamare, O. Cugat, H Rostaing, C Locatelli, Microactionneur magnétique à déplacement vertical, Déposé le 02/08/2002 sous le N° FR 02 09 882
Brevet CEA/INPG

[STE05] : J. Stepanek, Asservissement d'un microsystème magnétique, Thèse, LEG, 2005

[STE03] : J. Stepanek, H. Rostaing, B. Delinchant, J. Delamare, O. Cugat, 3D calculation of forces and torques affecting permanent magnets – application to microsystems, submitted to sensors and actuators A (Physical), 2003

[DEL93] : J. Delamare, E. Rullière, J.P. Yonnet, 3D calculation of permanent magnet interactions, IMACS'1 Canada, p 289-292, 1993

[AKO84] : G.Akoun and J.P.Yonnet, 3D analytical calculation of the forces between two cuboidal Magnets, IEEE transactions on magnetics, vol. MAG-20, no. 5, septembre 1984.

[BAT] : J-L Batoz et G. Dhatt, Modélisation des structures par éléments finis, volume1, solides élastiques,Page 196-200.

[MCD] : <http://www.mathsoft.com/>

[DELI04] : B.Delinchant, J.Stepanek, L.Rakotorison, J.Delamare, O.Cugat, F.Wurtz, Capitalizing on computation tools to improve design and knowledge sharing of magnets based devices, HPMA proceedings, Annecy, France 1st Sept. 2004

[RAD] : http://www.esrf.fr/machine/groups/insertion_devices/Codes/Radia/Radia.html
<http://www.wolfram.com/>

Chapitre III :

[BEL59] : R.B. Belser and W.H. Hicklin, Temperature coefficients of Resistance of Metallic films in the temperature range 25°C to 600°C, journal of applied physics, March 1959.

[MAC00] : K. Mackay, M. Bonfim,a) D. Givord, and A. Fontaine, 50 T pulsed magnetic fields in microcoils, Journal of applied physics, Volume 87, Number 4, 15 february 2000.

[QIA04] : Qiao Lin, Fukang Jiang, Xuan-Qi Wang, Yong Xu,Zhigang Han, Yu-Chong Tai, James Lew and Chih-Ming Ho, Experiments and simulations of MEMS thermal sensors for wall shear-stress measurements in aerodynamic control applications. J. Micromech. Microeng. 14 (2004) 1640–1649 PII: S0960-1317(04)77983-8

[KOS97] : A.B Kos, S.E Russek, Young K. Kim, R. W. Cross, High current density measurements of giant magnetoresistive spin-valves for magneto recording and sensor applications.

[WU01] : W. Wu, S.H. Kang, J.S. Yuan, A.S. Oates, Solid-State Electronics 45 (2001) 59±62, Thermal effect on electromigration performance for Al/SiO₂, Cu/SiO₂ and Cu/low-K interconnect systems

[CHA03] : C W Chang, C.L.Gan, C VThompson, K.L. Pey, W. K. Choi, Observation of Joule Heating-Assisted Electromigration Failure Mechanisms for Dual Damascene Cu/SiO₂ Interconnects.

Chapitre IV :

[DEC04] : E. Dechaseaux, Propriétés magnétique du CoPtP en dépôt électrolytique, DRT, CEA Grenoble LETI/LCMS, 2004

[GAM03] : D. Gamet, Elaboration par voie électrochimique, caractérisation et intégration pour applications industrielles, d'aimant permanent à base de CoPt, Thèse, CEA Grenoble/LETI/LCMI, 2003

[GRE04] : R. M. Grechishkin, S. S. Soshin, S. E. Ilyashenko, S. A. Chigirinsky, High resolution magneto-optic field mapping of miniature magnets with indicator films- Application to magnetic microsystems, HPMA proceedings, Annecy, France 1st Sept. 2004

[PAS04] : Daniel N. Pascual, Flip-Chip Bonder for MEMS Assembly
SÜSS MicroTec
228 Suss Drive
Waterbury Center, VT 05677
Phone: (802) 244-5181, Fax: (802) 244-5103, dpascual@suss.com

[FAH04] : F.F. Faheem, Y.C. Lee, Tether- and post-enabled flip-chip assembly for manufacturable RF-MEMS, Sensors and Actuators A 114 (2004) 486–495

[SHA05] : G. Shan, J. N Bradley, Fabrication of hard magnetic microarrays by electroless codeposition for MEMS actuators, Sensors and Actuators A 118 (2005) 307–312

[COPT] :

Park S-E., Jung P-Y., Kim K-B., “Magnetic properties and microstructural analysis of sputter-deposited and annealed Co-Pt alloys”, *J. Appl. Phys.*, vol.77, n°6, p 2641-2647, (1995)

Aboaf J.A., Herd S.R., Klokholm E., “Magnetic properties and structure of cobalt-platinum thin films”, *IEEE Trans. Magn.*, vol.19, n°4, p 1514-1515, (1983)

Yamamoto T., Tezuka T., Nishimaki M., Ishigiro T., “Effects of annealing on the magnetic properties and structures of sputtered Co-Pt alloys thin films”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.37, p 5980-5983, (1998)

Cavalotti P.L., Bucher P., Lecis N., Zangari G., Machado J.M., Sa M.A., “Microstructure and magnetic properties of electrodeposited Co-Pt and Co-Pt-P alloys thin films”, *ECS Proceedings*, vol.95, n°18, p 169-180, (1995)

Bozzini B., De Vita D., Sportoletti A., Zangari G., Cavalotti P.L., Terrenzio E., “Electrodeposited Co-Pt thin films for magnetic hard disks”, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol.120, p 300-304, (1993)

Bozzini B., Martelli A., Zangari G., Cavalotti P.L., Terrenzio E., Visigalli P.G., “Electrodeposition of Co-Pt thin films for magnetic recording”, in “*Magnetic materials*,”

processes and devices”, Romankiw L.T., Herman D.A.Jr (eds), ECS Inc., vol.92, n°10, Pennington NJ, p 69-85, (1992)

Byun C., Rauch G.C., Young D.J., Klepper C.A., “Effects of hypophosphite contents and surface treatment on electroplated Co-Ni-P thin films”, *J. Appl. Phys.*, vol.73, n°10, p 5575-5577, (1993)

Zangari G., Bozzini B. Cavalotti P.L., Fontana G., Maisto P.G., Terrenzio E., “Coercivity and microstructure in Co-Pt and Co-Pd thin films”, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol.133, p 511-515, (1994)

Bel J.B., “Elaboration d’aimants permanents en CoPt par dépôt électrolytique”, *rapport de stage du laboratoire CMI, LETI-CEA-Grenoble*, (1999)

Gamet D., “Elaboration électrochimique et caractérisation d’aimants permanents en cobalt-platine”, *rapport de stage du laboratoire CMI, LETI-CEA-Grenoble*, (2000)

Baragatti C., “Dépôt électrolytique et caractérisation d’aimants permanents en CoPt”, *rapport de stage du laboratoire CMI, LETI-CEA-Grenoble*, (2000)

Gamet D., “Elaboration par voie électrochimique, caractérisation et intégration pour applications industrielles, d’aimants permanents à base de Co-Pt”, *mémoire de thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble*, (2003)

Tang L., Laughlin D.E., Lambeth D.N., “Microstructure and magnetic properties of CoCrPt/Cr films on ultrasmooth NiP/AlMg substrates”, *J. Appl. Phys.*, vol.79, n°6, p 5348-5350, (1996)

Zana I., Zangari G., Shamsuzzoha M., “Influence of Cu(100) substrate on growth, morphology, structural and magnetic properties of high coercivity electrodeposited Co-Pt-P thin films”, *J. Elec. Soc.*, vol.151, n°10, 10 pages, (à paraître)

PUBLICATIONS ISSUES OU EN RELATION DIRECTE AVEC CETTE THESE**Brevets**

H. Rostaing, J. Delamare, O. Cugat, C. Locatelli
 Actionneur magnétique à lévitation
 Déposé le 02/08/2002 sous le N° FR 02 09 882
 Brevet CEA/INPG

Articles dans des revues avec comité de lecture

J. Stepanek, **H. Rostaing**, J. Delamare et O. Cugat
 Fast dynamic modeling of a magnetic micro-actuator,
 J. Mag. Mag. Mat - Vol 272-276P1 pp 669-671

H. Rostaing, J. Stepanek, M. Audoin, C. Dieppedale, O. Cugat
 High Current Densities for Magnetic Micro-Actuators
 Soumis, en cours de révision pour JMEMS

H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, J. Delamare, O. Cugat
 Conception, modélisation et prototypage d'un micro-relais bistable magnétique
 Soumis, révisé, accepté, pour la RIGE (Revue Internationale de Génie Electrique)

O. Cugat, J. Delamare, **H. Rostaing** et G. Reyne,
 MAGnetic Micro-Actuators & Systems MAGMAS
 À paraître dans Sensors & Actuators
 (Contribution orale invitée à European Magnetic Sensors & Actuators EMSA 04, Cardiff, juillet 2004)

Conférences internationales avec actes publiés et comité de lecture

H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, , O. Cugat
 Magnetic Out-of-Plane Bi-Stable Magnetic-Actuator
 HPMa Conference, Annecy, France, September 2004, pp 929

H. Rostaing, J. Stepanek, O. Cugat, C. Dieppedale, J. Delamare
 Magnetic, out of plane, totally integrated magnetic micro-actuator
 Transducers', Seoul, June 2005, Accepté pour un poster

C. Dieppedale, B. Desloges, **H. Rostaing**, J. Delamare, O. Cugat, J. Meunier-Carus
 Ultra-fast levitating magnetic bistable micro-actuator with integrated permanent magnets
 HPMa, Annecy, France, 1^{er} Sept. 2004, pp 408

J. Delamare, G. Reyne, O. Cugat, **H. Rostaing**
 Magnetic down-scaling laws, micro-magnets and applications of magnetic micro-actuators (MAGMAS)
 HPMa '04, Annecy, France, september 2004, pp 767

ANNEXES

Annexe I : Systèmes d'unités magnétiques

Symbole	Grandeur physique	Unité SI	Unité CGS	Conversion
B	Induction magnétique	T	G	$10^4 \text{ G} = 1 \text{ T}$
E	Energie	J	erg	$10^{-7} \text{ J} = 1 \text{ erg}$
M	Aimantation	A.m⁻¹	emu.cm⁻³	$1 \text{ emu.cm}^{-3} = 10^3 \text{ A.m}^{-1}$
H	Champ magnétique	A.m⁻¹	Oe	$1 \text{ Oe} = 1 \text{ G} = 80 \text{ A.m}^{-1}$
K_u	Constante d'anisotropie	J.m⁻³	erg.cm⁻³	$1 \text{ J.m}^{-3} = 10 \text{ erg.cm}^{-3}$

μ_0	Constante de perméabilité du vide	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	$\mu_0 = 1$
---------------------------	-----------------------------------	--	-------------------------------

Relation entre B et H :

Unité SI	Unité CGS
$B = \mu_0 (H + M)$	$B = H + 4\pi M$

Unités :

T = Tesla
 J = Joule
 A = Ampère
 G = Gauss
 Oe = Oersted

Annexe II : Modélisation

Le programme réalisé sous mathcad est disponible sur demande en version 'papier'.

Conception, Modélisation et Fabrication d'un Micro-Actionneur Magnétique, Bistable et hors plan.

Au sein de l'équipe Microsystèmes Magnétiques du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, nous avons conçu et modélisé un micro-actionneur bistable entièrement intégré, ayant une partie mobile se déplaçant de 120 μm en moins de 500 μs et de surface inférieure à 10 mm^2 . L'actionnement est magnétique. La partie mobile, constituée d'un micro-aimant en CoPt, se déplace verticalement sans aucun contact mécanique (lévitation) entre ses deux butées, également constituées de micro-aimants. La modélisation statique puis dynamique (6 DDL) a été faite grâce à deux logiciels : Dipole 3D et Mathcad. L'optimisation avec Pro@Design des paramètres géométriques du micro-actionneur a permis de fortement réduire le courant et donc l'énergie de commutation (20 μJ). Une étude thermique expérimentale et théorique du micro-actionneur montre que les conducteurs peuvent être alimentés par des impulsions de courant de 90000 A/mm^2 pendant 500 μs . Les briques de bases technologiques ont été mises au point et validées dans les salles blanches du CEA-LETI. Le micro-actionneur est en cours de prototypage.

Designing, modeling and prototyping of a magnetic, bistable, out of plane micro-actuator.

Magnets are gradually appearing in the world of micro-actuators and power MEMS, particularly for applications such as micro-switches. This PhD is devoted to the design, simulation and prototyping of a fully integrated micro-actuator with high vertical displacement, based on CoPt permanent magnets. Its main characteristics are: high displacement (in excess of 100 μm), low switching time (300 μs for 100 μm) and bistability. The commutation pulsed current is optimized for the lowest possible energy per pulse (minimum of 15 μJ). The main innovation of this design is that the moving part has no mechanical connection and is guided by magnetic levitation. The PhD addresses about the problems involved in the design (bistability, static and dynamic study), the thermal study (model and experiments) of the conductors supplied with high current densities (up to 90000 A/mm^2), and the prototyping of our actuator in the LETI-CEA clean rooms (development and validation of the technological steps). The final steps and assembly are currently being finalised in CEA-LETI.

Mots-cles

Micro-relais, micro-Aimant, CoPt, MAGMAS, densité de courant, micro-actionneur, MEMS

Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble
BP 46
38402 Saint Martin d'Herès