

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Batna
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique

Mémoire de :

Magistère en Electrotechnique

Option : *Matériaux Electrotechniques*

Présenté par :

Haouès Hocine

Licence en Electrotechnique

Thème :

Etude d'un microlevier à Actionnement Electromagnétique

Soutenu le .../.../2013

Devant le jury composé de :

Président	Dr. BENSALAH Abdeldjabar	MC Université de Batna
Rapporteur	Dr. Samir BENDIB	MC Université de Batna
Co-Rapporteur	Pr BENOUDJIT Azzeddine	Pr. Université de Batna
Examineur	Pr. Said DRID	Pr. Université de Batna
Examineur	Pr. Achour BETKA	Pr. Université de Biskra

2012/2013

Dédicaces

*Pour l'âme pure de ma mère, que
Dieu lui pardonne et l'accueille dans
son paradis.*

*Pour Ma Chère Epouse qui n'a
jamais cessé de m'encourager, de me
soutenir tout au long de mon travail.*

Pour ma sœur.

Je dédie ce travail.

Remerciements

Avant tous, je remercie le Bon Dieu qui m'a offert la force et la volonté pour commencer et finir ce mémoire.

Je tiens à exprimer d'une façon spéciale, toute ma reconnaissance, et mes remerciements sincères pour mon encadreur *Dr. Bendib Samir*, d'abord pour son encadrement, ensuite pour sa patience illimitée et son soutien tout au long de ce travail. Encore une fois un Grand Merci.

Je remercie mon épouse particulièrement pour sa patience et pour son soutien tout au long de ce mémoire.

Je remercie Mes deux amis, *Dr. Ghoggali Noureddine* et *Benzid Rida* pour leur intérêt à mon travail et les soucis qu'ils ont eu.

Je remercie encore mon Co-encadreur **Benoudjit Azzedine** qui, grâce à lui j'ai choisi le sujet de mon mémoire.

Je remercie **Dr. Bensalah Abdaldjabbar** pour les discussions très fructueuses que j'ai abordées avec lui durant le travail sur Ansys.

Je remercie également M. Bouhidel Zahereddine l'Inspecteur Général de l'éducation Nationale pour son encouragement pour faire ce travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui travaillent pour rendre l'information et la science à la portée de tous.

Introduction générale

Ils sont parmi nous mais peu de gens savent leur existence. Partout où nous allons, nous les utiliserons. Ils ont changé notre manière de vivre, on peut dire même notre manière de voir le monde. Ils sont petits, invisibles dans la plupart des cas. Ils fonctionnent en silence. Ils exécutent des tâches très complexes sans demander beaucoup d'énergie. On les appelle de différents noms, ils sont connus en Amérique comme Les MEMS, au Japon les micromachines et enfin en Europe les microsystèmes. Malgré cette divergence de nomination, on désigne le même concept et le même objet c'est les MEMS.

MEMS est l'abréviation Anglaise de microsystèmes électromécaniques. Ce sont des dispositifs de taille micrométrique qui intègrent des composants électriques et mécaniques (poutres, diaphragmes, ponts, ressorts, etc..) fabriqués en utilisant les microtechnologies.

La technologie MEMS est utilisée presque partout. Elle est la plus populaire pour le marché automobile des capteurs (airbags, systèmes de sécurité, suspension, échappement). Elle est utilisée aussi pour le marché industriel (détection des tremblements de terre, perception de choc, robots, etc.), le marché domestique (ordinateurs, portables, systèmes de navigation, etc.) et militaire (chars, avions, équipements des soldats). Le domaine le plus promoteur concerne les applications biomédicales. Les capteurs peuvent être utilisés pour mesurer la pression, ou les contraintes comme dans les instruments chirurgicaux. Les actionneurs comme les micro-pompes sont utilisés en dosage des médicaments et les analyseurs de DNA existent même sur le marché. La liste des applications est très longue.

De nombreux MEMS intègrent des micro-actionneurs pour actionner des pièces mobiles. De nombreuses méthodes existent pour générer cet actionnement. Parmi lesquelles l'actionnement électromagnétique qui s'améliore du jour en jour grâce aux procédés technologiques mis en œuvre. Il suffit juste d'injecter un courant dans une bobine ou bien utiliser un aimant permanent. L'énergie électromagnétique est simplement transformée en mouvement.

En quelques années, la situation a beaucoup évolué. De nombreuses réalisations ont été entamées, de nouvelles méthodes furent inventées et testées. Dieu seul, le sait, combien on fabrique de MEMS par jour, les premières générations de produits ont été commercialisées et améliorées plusieurs fois. On peut considérer aujourd'hui que la faisabilité est acquise et on peut s'engager dans une première grande étape de recherche-développement de produits nouveaux en vue de leur industrialisation. A ce moment même où de nouveaux dispositifs MEMS sont conçus et intégrés dans de nouveaux produits. La recherche aux laboratoires et le prototypage ne cesseront jamais. Hors le prototypage et son teste est un peu onéreux et la concurrence est pressante (course aux brevets, parts du marché...). Pour aboutir à cette fin qui un produit fiable, fonctionnel et performant et avec un minimum de fonds. Les spécialistes concepteurs de ce domaine utilisent la CAO pour minimiser les dégâts et les coûts. Ces outils sont actuellement indispensables pour

arriver à des résultats plus ou moins rapidement et facilement et une solutions adéquate exigée potentiellement par le cahier de charge.

Dans cette vision des choses, Ce mémoire a pour objectif la modélisation nuémrique d'un micro-actionneur (micro-levier) électromagnétique dans le but de pivoter une micro-miroir.ainsi que le choix des matériaux qui conviennent le mieux pour notre micro-actionneur.

En premier lieu le premier chapitre introduit les différents phénomènes physiques exploités pour gouverner les microsystemes ainsi que la synthèse des différents micro-leviers.

Le second chapitre traitera les matériaux utilisés dans la technologie des microssystemes ainsi que leurs propriétés électriques, magnétiques et mécaniques.

Le troisième chapitre traitera le comportement électromagnétomécanique de notre microlevier ainsi que la solution donnée par les éléments finis.

Le quatrième chapitre traitera la simulation de notre micro-actionneur avec le logiciel Ansys et la discussion des résultats obtenus.

Enfin, la conclusion de ce travail mettra en claire les différents points intéressants et finira par quelques propositions et perspectives.

Chapitre I :

Différents types d'actionnement

I.1 Introduction

Le thème principal des travaux développés dans ce mémoire concerne la modélisation de microsystèmes électromagnétiques (MEMS). Ces structures sont relativement récentes et constituent une partie de la grande famille des microsystèmes.

Ce chapitre a pour objectif de faire une présentation générale de ces derniers tout en portant une attention plus particulière aux MEMS électromagnétiques. Dans un premier temps, l'historique des microsystèmes sera succinctement retracé suivi d'une présentation des différentes propriétés physiques qui y sont exploitées. L'accent sera ensuite mis sur l'actionnement électromagnétique dont on détaillera les caractéristiques. Une étude comparative entre l'actionnement électrostatique et magnétique sera également effectuée, notamment en mettant en exergue les avantages et inconvénients de ces deux types d'actionnement. Enfin, des exemples d'applications dans les différents domaines d'utilisation des microsystèmes seront donnés.

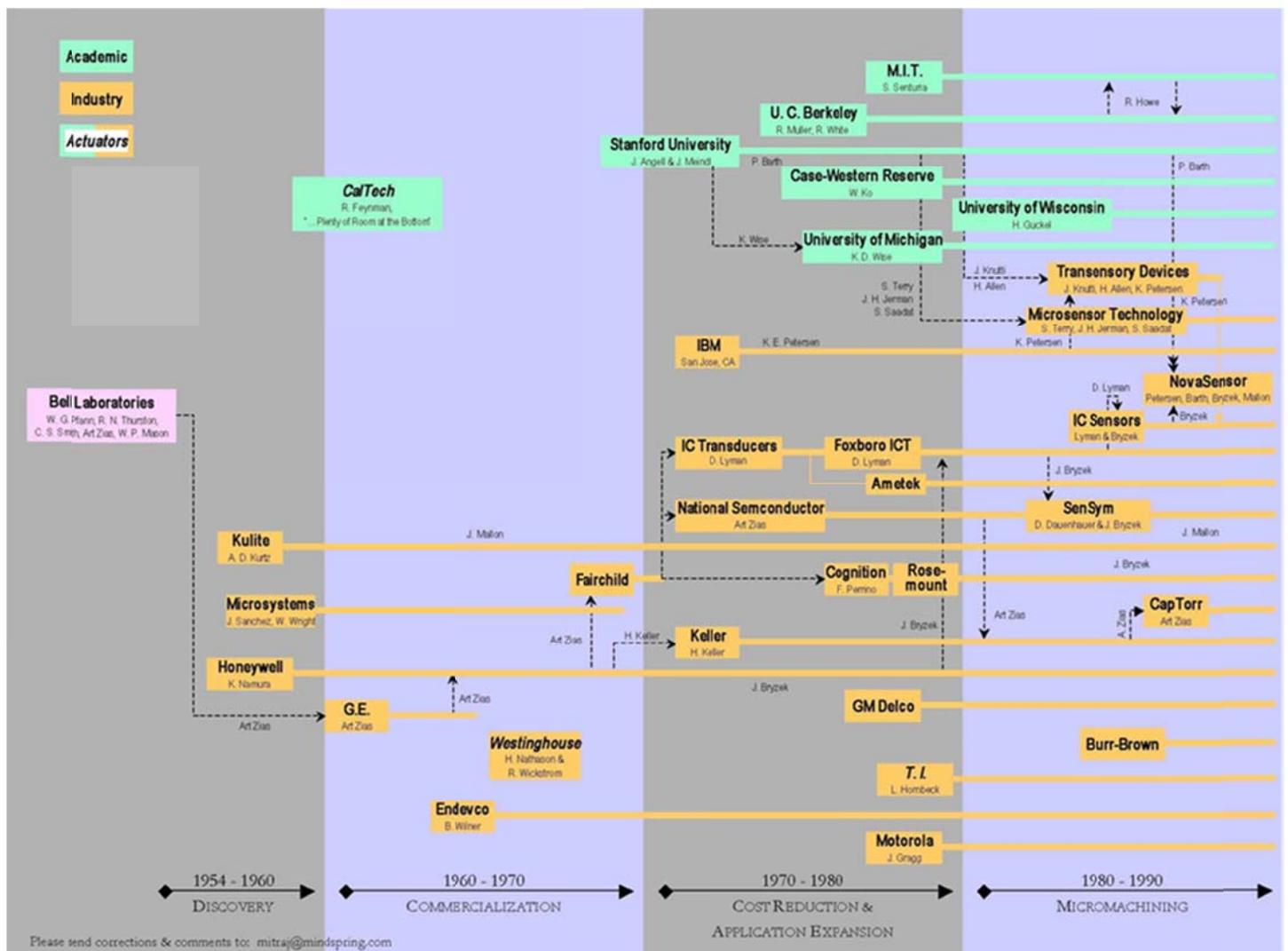
I.2 Historique

L'origine de la technologie des microsystèmes se trouve clairement dans les développements technologiques durant la Seconde Guerre Mondiale. Le développement des radars a particulièrement stimulé la recherche dans la synthèse des matériaux semi-conducteurs purs. Ces matériaux, notamment le silicium pur, sont devenus les matériaux de base des circuits intégrés et de la technologie des MEMS. Le précurseur dans ce domaine de recherche est le physicien visionnaire (prix Nobel 1965) Richard Feynman qui, lors de la réunion annuelle de l'American Physical Society à Caltech le 26 décembre 1959. Il avança dans son discours visionnaire que le monde microscopique serait un formidable champ d'investigation scientifique dès que la technologie en donnerait les Moyens. Intitulé « There is plenty room at the bottom », que l'on peut traduire par « Il y a beaucoup de place en bas », avait pour but d'attirer l'attention sur l'intérêt de la miniaturisation, non pas en terme de taille ou de volume, mais sur le fait que la miniaturisation d'un système rend possible la multiplication des fonctions réalisées par celui-ci. En effet, tout en gardant le volume occupé par un système, la miniaturisation permettra de démultiplier les tâches que celui-ci pourra assurer. Feynman est d'ailleurs le premier chercheur à avoir proposé l'utilisation de la technologie de fabrication des circuits intégrés dans le but de réaliser des machines microscopiques et ainsi pose les bases de la course de miniaturisation qui nous fournit chaque année des ordinateurs et autres gadgets plus puissants, plus fiables et moins chers, et qui nous amène vers les nanotechnologies[2].

Il est évident que les premiers acteurs du domaine ont été ceux qui, comme Feynman l'avait entrevu, possédaient les moyens technologiques, à savoir les chercheurs issus de la micro-électronique.

Les premiers travaux présentant un MEMS opérationnel, fabriqué en utilisant les mêmes techniques que celles des circuits intégrés, ont été publiés seulement 10 ans après l'invention du circuit intégré à base de transistors. Et c'est seulement au début des années 80 que les MEMS parviendront à retenir l'attention, notamment pour la fabrication des capteurs. Le début des années 2000 est marqué par la popularité des MEMS dans des applications comme les têtes d'imprimantes à jet d'encre ou encore des accéléromètres employés pour l'ouverture des airbags de voitures. Actuellement, on rencontre des applications plus complexes utilisant cette technologie, comme les vidéoprojecteurs numériques, dont on détaillera les caractéristiques ultérieurement. Aujourd'hui, les MEMS ont atteint un niveau suffisant de maturité pour l'intégration dans diverses applications industrielles [1] [2].

Le Tableau I présente un bref historique avec différents repères dans le développement des MEMS.



I.3 Un MEMS c'est quoi ?

Nous allons dans un premier temps définir ce qu'est un MEMS, leur intérêt et les différents principes de fonctionnement. Nous allons ensuite nous attarder sur les MEMS magnétiques, qui feront l'objet de cette étude.

Du point de vue des dimensions, les microsystèmes peuvent être situés entre les machines conventionnelles à l'échelle macroscopique et les nano-mécanismes futuristes. Le terme "microsystème" désigne l'assemblage, dans un même composant, et quelle que soit la technique employée, d'un **actionneur**, d'un **capteur**, et d'une **électronique de commande**. En fait, on parle encore de microsystème même si l'assemblage ne comporte qu'un capteur ou un actionneur associé à une électronique. Dans le cas où le composant ne comporte qu'un actionneur contrôlé par une électronique non intégrée, on parle plutôt de micro-actionneur. Ceci est également valable pour les capteurs.

MEMS est l'acronyme de l'expression « Micro-Electro-Mechanical Systems ». En Europe, on les appelle les microsystèmes et au Japon sont nommés les micromachines [1] [3].

Les MEMS ont pour caractéristique d'être de taille submillimétrique et d'être fabriqués de manière collective par des procédés de micro-électronique. Ils sont réalisés en salle blanche afin d'éviter le plus possible les poussières, car celles-ci sont de la taille des détails des objets qu'on souhaite obtenir. Le plus couramment, ils sont fabriqués sur des substrats de Si (typiquement de 100 ou 200 mm de diamètre) ; Un substrat contient donc en général plusieurs centaines, voire des milliers de microsystèmes.

Les MEMS peuvent donc se diviser en 3 catégories : les actionneurs, les générateurs et les capteurs. Parmi les actionneurs, on trouve des relais (pour l'électronique de puissance, les signaux RF ou pour des applications optiques), des moteurs ou encore des valves, des manipulateurs et des positionneurs. Parmi les capteurs, on trouve des accéléromètres (couramment utilisé dans les systèmes d'Airbag), des capteurs de pression, des capteurs thermiques, chimiques, ... L'intérêt de la petite taille des MEMS et de leur méthode de fabrication réside dans la réduction des coûts, dans la réduction des masses, de l'encombrement ou de l'énergie utilisée. Ces points sont essentiels pour leur utilisation dans des systèmes embarqués et/ou autonomes tels que les satellites, les téléphones portables ou pour des applications in vivo. Les petites tailles permettent en outre l'exploitation de propriétés amplifiées par les réductions d'échelle, voire ne se manifestant qu'aux très petites échelles [3].

Les moyens d'actionnement couramment utilisés dans les MEMS sont les actionnements :

- **Electrostatiques**
- **Thermiques**
- **Magnétiques**
- **Piézoélectriques**
- **Par alliages à mémoire de forme.**

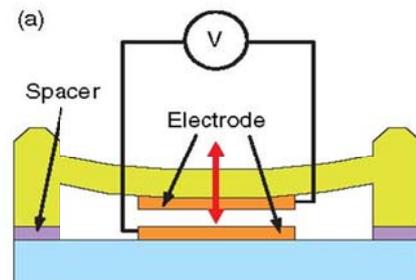
1.4 Actionnements couramment mis en jeu dans les MEMS

1.4.1 Actionnement électrostatique :

L'actionnement électrostatique exploite le principe d'un condensateur variable. En appliquant un potentiel électrique entre 2 armatures séparées par un diélectrique, des charges de signe opposé s'accumulent sur ces surfaces, et il apparaît alors une force attractive entre ces 2 surfaces. La force obtenue s'exprime sous la forme :

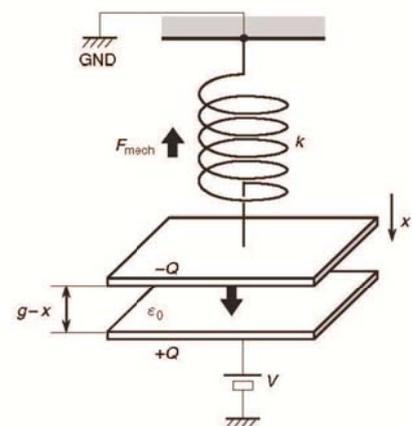
$$F = \frac{\epsilon S V^2}{2(g - x)^2}$$

Avec S la surface en regard, V le potentiel, ϵ la distance de séparation entre les armatures et ϵ la constante diélectrique. Ainsi les MEMS électrostatiques sont usuellement constitués d'une partie mobile séparée d'une partie fixe par un gap d'air [6].



ie

Les MEMS électrostatiques requièrent des champs électrostatique (et donc des tensions) importants ce qui est un inconvénient, mais la consommation est faible : outre les courants de fuite, des courants apparaissent pour charger les capacités, mais, étant donné les fortes valeurs de tensions, les intensités du courant sont généralement très faibles. Les tensions d'actionnement sont limitées par le claquage (arc électrique); la tension de claquage dépend de la pression multipliée par l'espace entre électrodes, tel qu'indiqué par la courbe de *Paschen*.



Aussi, les MEMS électrostatiques sont souvent emballés sous vide. Néanmoins, la tension est principalement limitée par les alimentations. Les MEMS électrostatiques présentent de plus l'inconvénient d'attirer les poussières.

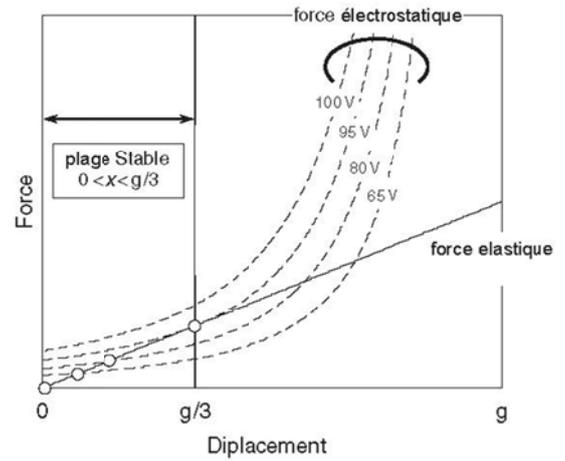
Par ailleurs, les densités de forces obtenues et donc les pressions de contact sont relativement faibles : pour une distance de séparation de $2 \mu\text{m}$ entre les surfaces du condensateur et une tension de 100 V , on obtient une pression d'environ 11000 Pa , soit 0.11 bar . Les forces sont

donc relativement faibles et décroissent rapidement avec la distance ; on peut toutefois augmenter ces forces en augmentant les surfaces en regard par des configurations en peigne («comb-drive») fig.1.4 ou par le zipping (poutre courbée en contact partiel avec le substrat).

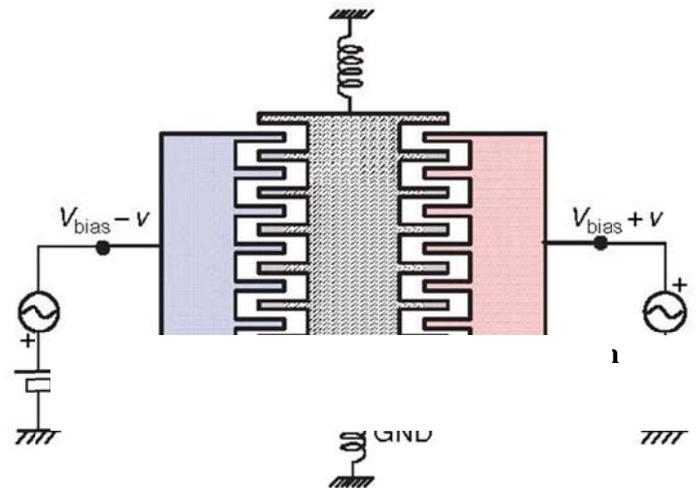
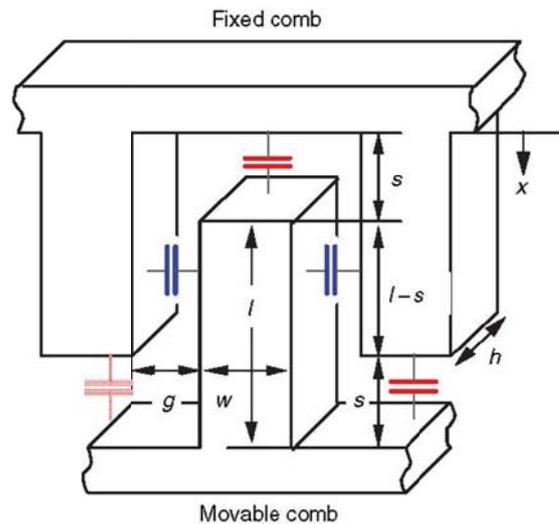
Enfin, étant donné que la force n'apparaît que lorsqu'une tension est appliquée et qu'elle est toujours attractive, la bistabilité est difficile à mettre en œuvre. Il existe toutefois des solutions, l'une d'entre elle consistant à utiliser

une poutre précontrainte avec 2 positions stables en flambage. L'actionnement électrostatique n'est alors utilisée que pour faire passer la poutre d'une position mécaniquement stable à une autre. Toutefois, cette configuration présente des difficultés liées aux contraintes dans les matériaux et à des forces de commutation très importantes. Ci-dessous, le schéma d'un actionneur électrostatique «comb drive » bistable [7]

(Figure 4). Le flambage s'obtient en appliquant une contrainte extérieure sur la poutre après sa fabrication.



en de



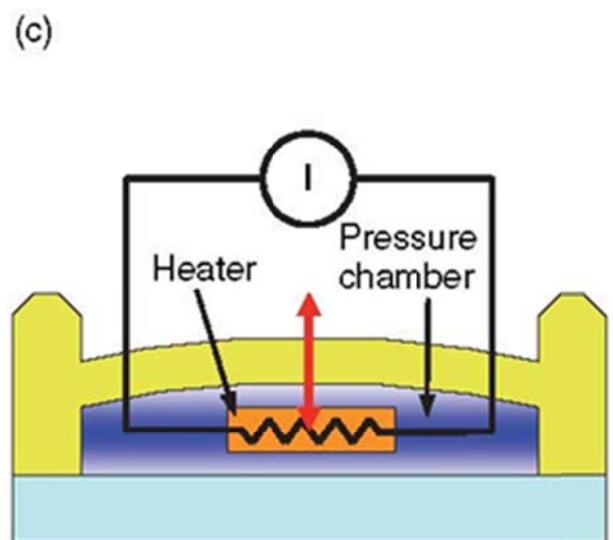
Notons aussi (mais cette remarque est vraie pour d'autres moyens d'actionnement) que les MEMS électrostatiques impliquent une déformation mécanique, la flexion d'une poutre le plus souvent. Or lorsque les dimensions sont réduites, les poutres deviennent plus rigides. La densité de force pour déformer une poutre est donnée par :

Où δF est la densité de force appliquée sur la poutre, f sa déflexion, h sa hauteur, l sa longueur et E le module d'Young. Lorsque toutes les dimensions sont réduites d'un facteur k , la densité de force augmente d'un facteur k . Vu qu'il s'agit de déformation élastique, cette énergie est stockée, néanmoins, plus on réduit les échelles, plus il faut fournir une densité de force élevée pour déformer une poutre. Par conséquent, la commutation d'une poutre en pré flambage requiert aussi des densités de force de plus en plus importantes lorsque les dimensions sont réduites. D'une manière générale, on pourra éventuellement chercher à développer des MEMS sans déformation mécanique. Malgré certains inconvénients (tensions élevées, bistabilité difficile à mettre en œuvre, l'effet de collage), les MEMS électrostatiques sont très répandus sur le marché car ils utilisent des matériaux et des techniques de fabrication très simples et très courants en micro-électronique [10].

1.4.2 Actionnement thermique

Un changement de température subit par un objet entraîne une modification de ses dimensions proportionnelle à son coefficient de dilatation thermique. C'est ce qui explique par exemple que placer un liquide très chaud dans un verre froid entraîne parfois des fissures. À l'échelle micrométrique, les scientifiques utilisent ce phénomène pour contrôler le mouvement de certains actionneurs. Une partie mécanique va être chauffée, ce qui va provoquer un mouvement du matériau. Néanmoins, dans une grande majorité des cas, une simple augmentation de la température entraîne un changement volumétrique trop faible. Il est donc nécessaire d'optimiser la structure de l'actionneur.

Pour cela, les concepteurs font généralement appel à l'une des quatre techniques suivantes [10].

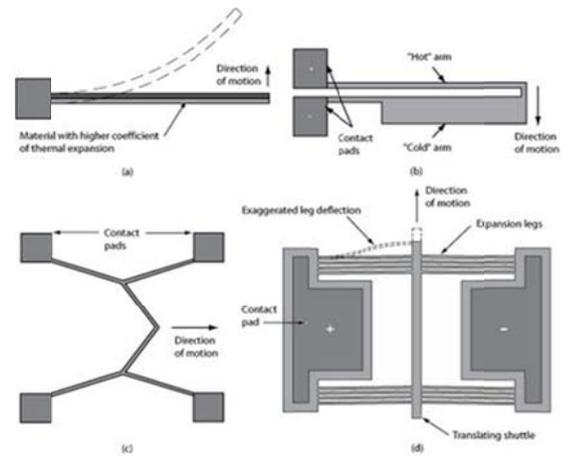


1.4.2.1 Exploiter les différences de coefficients d'expansion thermique

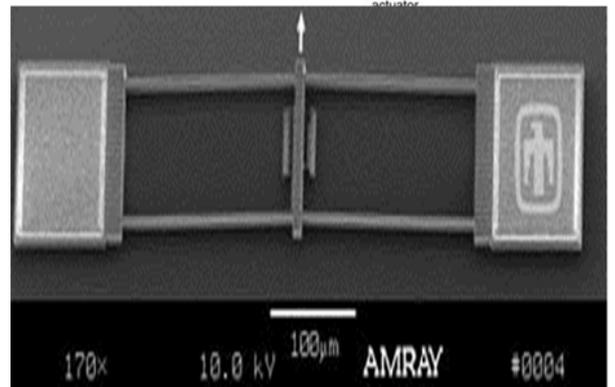
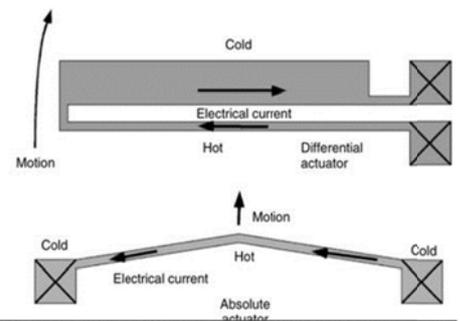
La première méthode consiste à coller deux matériaux possédant des coefficients de dilatation différents. On appelle cela des actionneurs bilames. Si l'on souhaite que la partie mécanique monte, on place le matériau avec le plus grand coefficient d'expansion thermique en bas. Par exemple, un actionneur bilame peut être composé d'une couche inférieure de dioxyde de silicium et une couche supérieure de chrome. En chauffant l'ensemble, la couche du dessous va connaître un changement volumétrique plus important que celle du dessus ce qui va entraîner une flexion, c'est-à-dire que l'actionneur va se plier pour compenser la différence. Le problème est que cette technique demande des processus de fabrication complexes, car il y a un risque que les deux matériaux se décollent [3].

Le deuxième système est l'actionneur thermique classique. Contrairement au premier, on utilise un seul matériau, donc un seul coefficient de dilatation thermique, mais on crée plusieurs parties. Sur la photo ci-contre, le même matériau à deux branches, une plus fine que l'autre. La branche fine va chauffer plus rapidement et entraîner une flexion de l'actionneur. C'est donc le même principe que l'actionneur bilame, mais avec des contraintes technologiques moins importantes [1].

De nouveaux micro-actionneurs thermiques classiques utilisent une structure légèrement modifiée avec deux bras fins et un bras épais qui n'est pas traversé par le courant électrique. L'avantage de cette structure est qu'il est possible générer des mouvements plus amples tout en consommant moins. On parle en moyenne d'un déplacement de 12 µm pour 30 mW. Les avantages des actionneurs thermiques bilames et classiques et que l'on obtient une flexion de dizaines de micromètre avec une puissance de moins de 50 mW. Les mouvements des actionneurs électrostatiques sont plus restreints, souvent moins de 10 µm. Les températures atteintes lors des mouvements des actionneurs thermiques peuvent dépasser les 800 °C dans les cas extrêmes [2].

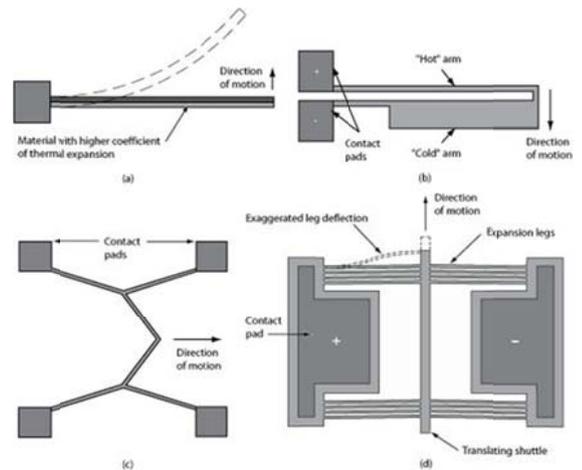


nces de



1.4.2.2 Les actionneurs thermiques géométriques

La troisième technique est celle de la poutre courbe. Elle consiste à placer une structure en V (la poutre) entre deux points de contact qui sont ancrés dans le substrat. Les deux bouts de cette structure sont refroidis par le substrat et gardent donc une température inférieure à celle du centre de la poutre. Le courant va être appliqué à un des points de contact et il va traverser la poutre courbe et atteindre l'autre point de contact. La température de la structure va augmenter et déplacer l'actionneur dans la direction de la pointe du V. La courbure permet ainsi d'influencer le mouvement de flexion dans la direction que l'on souhaite.

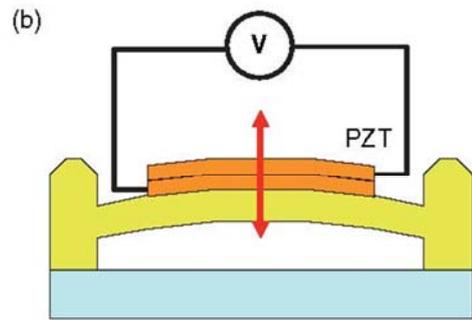


Enfin, la quatrième technique est celle du micro-actionneur thermomécanique (Thermomechanical In-plane Microactuator or TIM) qui repose sur le même principe que la poutre courbe. De fines branches courbées attachées à un point d'ancrage sont légèrement courbées et sont reliées à une poutre centrale. Lorsque le courant va traverser les branches, l'augmentation de la température va les mettre en mouvement et déplacer la poutre. Ce système a l'avantage de proposer une plus grande marge de manœuvre. En jouant sur le nombre de branches, on peut ajuster les forces en jeu pour accroître ou décroître le déplacement de la poutre centrale [52].

L'actionnement thermique peut générer des forces importantes, mais ce mode d'actionnement est assez lent à l'échelle centimétrique (toutefois la réduction des échelles réduit l'inertie thermique et permet des vitesses d'actionnement plus rapides). Étant donné les faibles valeurs de dilatation thermiques, il est le plus souvent utilisé en bilame. On exploite alors la différence de déformation entre 2 matériaux qui sont chauffés par effet Joule à des températures différentes et/ou ont des coefficients de dilatation thermique différents. Pour les mêmes raisons que précédemment, la bistabilité est difficile à mettre en œuvre. On peut toutefois, comme cela a été déjà mentionné, utiliser une structure avec une poutre en flambage. Ce principe de bistabilité convient particulièrement à ce principe d'actionnement étant donné les forces importantes générées [51].

1.4.3 Actionnement piézoélectrique :

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux qui se déforment lorsqu'on leur applique une tension. Ils sont capables de délivrer des forces importantes, ont des temps de réponse rapide et consomment peu si les courants de fuite sont bien contrôlés, ce qui est le cas en quasi-statique. Toutefois ils présentent de petites déformations (<0.2% en couche); aussi, on les utilise couramment dans les MEMS selon le principe du bilame [7]. Ainsi, une faible déformation longitudinale du piézoélectrique peut entraîner une déflexion transversale importante d'une poutre. Le principe est illustré Figure 0-4.



ue

Le composé le plus couramment utilisé est le PZT, une céramique de composition (ex. quartz, $\text{Pb}((\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (dit « PZT »)). D'autres matériaux tel l'AlN ou le ZnO sont aussi utilisés[59].

Les actionneurs piézoélectriques ont été utilisés par exemple pour des micro-pompes, des applications médicales ou pour des têtes d'imprimante.

Etant donné qu'il n'y a pas de force générée en l'absence de tension appliquée, la bistabilité est difficile à mettre en œuvre. Toutefois, le principe de poutre précontrainte peut être utilisé, avec les difficultés déjà soulignées [52].

1.4.4 Actionnement magnétostrictif

Les matériaux magnétostrictifs sont des matériaux qui se déforment en présence d'un champ magnétique. Le principe est le même que pour les matériaux piézoélectriques, à la différence que c'est un champ magnétique et non plus un champ électrique qui provoque une déformation. L'avantage, par rapport à l'actionnement piézoélectrique, est qu'il n'y a pas besoin de liaisons électriques [52].

Les matériaux couramment utilisés sont des alliages de terres rares et de métaux de transition telle Terfenol-D (TbDyFe). Ils présentent des déformations très faibles (exemple: 0.03 % pour un film de TbFe rapporté par Tiercelin).

L'actionnement magnétostrictif utilise lui aussi couramment le principe du bilame. Il permet de faire des actionneurs comme des micro-pompes [6] ou des capteurs de champs magnétiques. On a fabriqué un magnétomètre grâce à une poutre en Si recouverte de Terfenol-D. ce dispositif permet de mesurer un champ magnétique soit en mesurant la déflexion statique de la poutre, soit en mesurant

la fréquence de résonance sous un champ magnétique alternatif. La précision de ce magnétomètre est de $11\text{-}\mu\text{T}$.

1.4.5 Alliages à mémoire de forme (AMF)

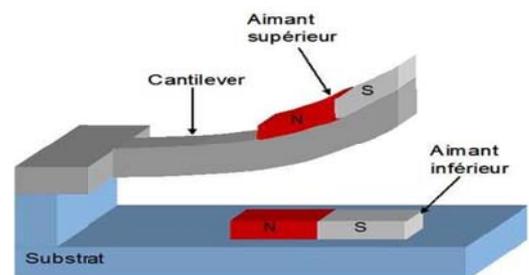
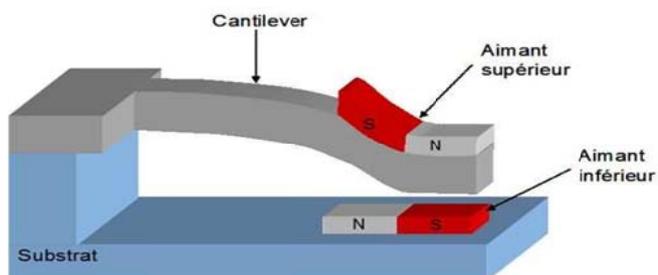
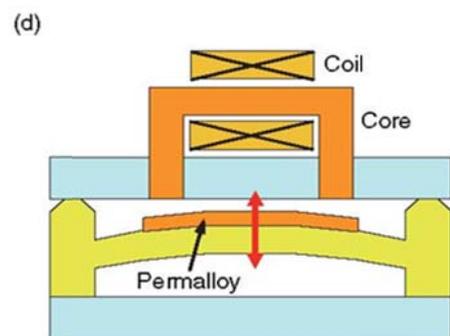
Les alliages à mémoire de forme sont des matériaux dont la déformation irréversible se fait par changement de phase cristallographique. Ils possèdent une phase dite martensitique et une phase dite austénitique, cette dernière possédant une symétrie plus importante. En chauffant un AMF après déformation, on induit un changement de phase vers la phase de départ, ce qui permet au matériau de retrouver sa forme avant déformation [1][21].

Les AMF peuvent produire des forces très importantes et ont une vitesse d'actionnement lente [7]. Un alliage très couramment utilisé pour ce type de propriété est le TiNi.

Un des problèmes majeurs pour utiliser ces matériaux dans des MEMS est qu'il faut coupler l'AMF avec un actionnement supplémentaire pour, au départ, induire la déformation dans l'AMF[11].

1.4.6 Actionnement magnétique

Le champ magnétique créé par un courant circulant dans une spire peut être employé pour manipuler des objets magnétiques. Ce principe est utilisé dans le fonctionnement des micro-actionneurs magnétiques. De manière similaire, le courant induit peut être utilisé pour détecter le mouvement d'un aimant. Ce principe étant à la base du fonctionnement des micro-capteurs magnétiques[6].



ant

D'un point de vue applicatif, les microsystèmes magnétiques sont utilisés avec succès pour le stockage/enregistrement de données, comme par exemple dans les têtes d'enregistrement de disques durs. Ces microsystèmes sont également intégrés dans des capteurs de champ magnétique, ou de dispositifs inductifs et dans des micro-relais ou micro-actionneurs. On les retrouve de façon très

courante dans le domaine de l'automobile, pour des applications de contrôle de vitesse, de systèmes de freinage (ABS) ou de stabilité électronique (ESP) et même dans des systèmes de navigation [52].

L'actionnement magnétique est très largement utilisé dans les systèmes macroscopiques (moteur à courant continu, moteur à induction...). Comme cité en haut dans les MEMS, on utilise principalement la force électromagnétique créée par la circulation d'un courant dans une boucle conductrice, afin d'agir sur un aimant permanent ou un matériau ferromagnétique placé dans le champ magnétique ainsi obtenu. Les forces sont importantes et génèrent des déplacements conséquents (plusieurs dizaines de microns pour quelques centaines de mA). Malgré tout il n'est pas aisé d'obtenir un champ magnétique puissant (nécessité d'un bobinage) et de déposer des matériaux ferromagnétiques de bonne qualité.

Ils peuvent requérir des géométries tridimensionnelles qui nécessitent de nombreuses et coûteuses étapes de microtechnologie [10].

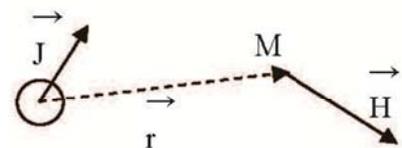
L'autre difficulté vient des matériaux spécifiques mis en jeu. Les matériaux magnétiques doux (FeNi par exemple) sont à présent couramment intégrés dans des microsystèmes, mais le dépôt de matériaux magnétiques durs (aimants) pose toujours problème. Les micro-technologues se sont pour l'instant concentrés sur différentes nuances de CoPt. Ce matériau dur, contrairement à ceux contenant des terres rares, peut être intégré par voie électrochimique. Toutefois, le coût de ce matériau est élevé à cause du Pt et les performances sont relativement limitées.

Bien que la miniaturisation des systèmes magnétiques présente des problèmes technologiques, les lois d'échelles sont très avantageuses pour l'actionnement magnétique, comme l'ont montré J. Delamare et al [15]. Nous allons donc maintenant analyser ces lois d'échelle pour des interactions entre aimants et des interactions entre aimants et conducteurs.

1.4.6.1 Lois d'échelle

Considérons un moment magnétique de volume V et de polarisation magnétique J . Celui-ci génère un champ H à un point M de l'espace qui s'exprime par la formule suivante :

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



Si on fait une réduction homothétique d'un facteur k de toutes les échelles, le volume V est divisé par k^3 , le terme du dénominateur de même, le second facteur de l'équation est un terme directionnel qui reste inchangé, et donc le champ H reste le même.

La densité de force δF produite par l'interaction d'un champ \vec{H} avec un moment magnétique de polarisation J s'exprime par:

Lorsque les dimensions sont réduites d'un facteur k , la polarisation J' , qui représente une densité, reste inchangée, le champ magnétique local H aussi s'il est produit par un moment magnétique, comme cela a été montré précédemment, et donc le gradient de H se retrouve multiplié par un facteur k .

La réduction d'échelle est donc avantageuse pour l'interaction aimant-aimant: les densités de forces augmentent d'un facteur k lorsque les échelles sont divisées par un facteur k [52].

Les forces de Laplace qui s'exercent entre un champ magnétique H et un conducteur de longueur l parcouru par un courant I , s'expriment ainsi :

Avec F la densité de force, j la densité de courant et H le champ magnétique. En réduisant les échelles, H est conservé s'il est généré par un moment magnétique, j , la densité de courant, aussi et donc l'opération reste neutre. Les densités de force de Laplace sont aussi importantes qu'à grande échelle.

Toutefois, la densité de courant admissible dans un conducteur peut être augmentée lorsqu'on réduit les échelles. En effet, le conducteur dissipe mieux la chaleur : le rapport de la surface de refroidissement sur le volume chauffant augmente lorsque les dimensions sont réduites, la diffusion de la chaleur est proportionnelle au gradient de la distribution en température et ce gradient augmente d'un facteur k lorsque les dimensions sont homothétiquement réduites, car la distance entre 2 points de températures différentes est diminuée d'un facteur k .

En régime dynamique, comme c'est le cas avec les micro actionneurs tels que ceux qui nous intéressent (bistable, à commutation rapide), d'une part, la dissipation de la chaleur est plus efficace, d'autre part, on a besoin de courant seulement pendant un temps restreint (la commutation), donc le conducteur chauffe par effet Joule, mais seulement pendant une durée limitée : l'énergie accumulée reste faible [61].

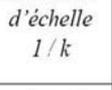
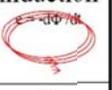
On peut augmenter les densités de courant, et donc les densités de force d'interaction courant-aimant d'un facteur k_i lorsque les dimensions sont réduites.

En première approximation, ce facteur k_i peut être pris égal à k , mais il dépend de nombreux facteurs. En plus d'avoir des lois d'échelle favorables, les densités de force des interactions magnétiques sont importantes. A titre de comparaison avec le cas des forces électrostatiques, si on prend 2 aimants d'aimantation 1 T, allongés dans le sens de l'aimantation pour avoir un rapport de forme favorable, et qu'on les met bout à bout en contact comme montré sur la Figure K0-5 (on compte une séparation de 2 μm de matériau amagnétique pour tenir compte de l'imperfection du contact et de la présence d'un autre matériau, un bon conducteur électrique par exemple), on obtient, de manière permanente, une pression de contact de 3.35 bar, soit 30 fois plus que dans le cas électrostatique avec une tension de 100V et un entrefer de 2 μm entre les électrodes. Cette pression supérieure devrait permettre d'obtenir

un meilleur contact électrique par rapport au cas électrostatique, et ce, sans dépenser d'énergie.

Le Tableau ci-contre résume l'évolution des interactions magnétiques lorsque les échelles sont divisées par un facteur k .

Y sont aussi pris en compte les interactions avec des matériaux doux et l'induction[52].

Réduction d'échelle $1/k$	aimant	courant	fer	induction
aimant	 $\times k$	 $\times k_1$	 $\times k$	 $/k$ \times vitesse
courant	$\times k_1$	$\times k_1 \times k_2 / k$	$\times k_1 / k$	$\times k_1 / k^2$ \times vitesse

actions
les par

1.4.6.2 Comparaison des actionnements électrostatique et magnétique

A une échelle que l'on peut qualifier de « naturelle » (dans laquelle les phénomènes physiques mis en jeu peuvent être décrits par une approche macroscopique), les actionneurs électromagnétiques, grâce aux densités d'énergie volumiques supérieures qu'ils peuvent développer, ont été largement privilégiés au détriment des actionneurs électrostatiques. Cependant, à l'échelle du micromètre, ce sont les actionneurs électrostatiques qui connaissent le plus grand développement.

Comme spécifié ci-dessus, plusieurs raisons peuvent être avancées pour expliquer cet état de fait dont deux sont les plus importantes. Premièrement, les actionneurs électrostatiques sont compatibles avec les technologies dérivées de la fabrication de circuits intégrés et sont par conséquent très faciles à fabriquer sans nécessiter le développement de technologies spécifiques. Deuxièmement, les lois de réduction d'échelle privilégient, a priori, les forces électrostatiques ou autrement dit, l'actionnement électrostatique [Niarchos 2003]. Concernant ce dernier aspect, deux visions différentes coexistent actuellement. Celles-ci sont présentées ci-dessous afin d'avoir une idée plus claire et ainsi mieux appréhender l'actionnement électrostatique à ces échelles. A l'échelle macroscopique, pour une taille de système donnée, les densités d'énergies magnétiques (et par conséquent de forces) sont prépondérantes par rapport aux densités d'énergies électrostatiques [Niarchos 2003]. Ces densités élevées sont obtenues grâce à l'utilisation de matériaux ferromagnétiques doux (Fe, Ni, alliages de Fe, ...) [Cugat 2002]. Ces derniers, caractérisés par une perméabilité magnétique très élevée, permettent de réduire les courants d'alimentation et l'énergie électrique réactive consommée. Par ailleurs, les matériaux ferromagnétiques durs (aimants) permettent le stockage de l'énergie magnétique de manière permanente et présentent l'avantage de créer des forces relativement importantes, même en l'absence d'alimentation.

En appliquant d'une manière systématique les lois de réduction d'échelle, associées aux contraintes physiques, il est possible de déterminer le seuil à partir duquel les forces électrostatiques deviennent prépondérantes par rapport aux forces magnétiques. Une comparaison entre les densités d'énergies

électrostatique et magnétique, en fonction de la largeur de la zone d'interaction des champs (i.e. zone de création des forces), est donnée sur la Figure 8. Dans cette comparaison, la densité d'énergie électrostatique correspond au maximum réalisable avant d'atteindre les niveaux de tensions entraînant le phénomène de claquage. La densité d'énergie magnétique, quant à elle, correspond à l'énergie maximale produite par un actionneur magnétique fabriqué en alliages à base de fer ou de nickel. Sur la Figure 8, la largeur de la zone d'interaction des champs constitue la distance séparant les électrodes dans le cas électrostatique et l'entrefer dans le cas électromagnétique. On remarque que l'actionnement électrostatique devient plus intéressant pour des distances inférieures à $2\mu\text{m}$. Or, comme énoncé précédemment, cette distance correspond à l'énergie électrostatique avant le claquage. Dans le cas où on considère le fonctionnement d'un actionneur classique, l'énergie mise en œuvre est nettement inférieure. La distance de séparation peut alors être réduite. Celle-ci est classiquement inférieure à $1\mu\text{m}$ pour des niveaux de tensions de l'ordre de la centaine de volts.

Cette première approche simpliste conclut à la supériorité de l'actionnement électrostatique à des échelles inférieures au millimètre. Ceci peut se concevoir facilement suite aux limites intrinsèques de la valeur de l'induction magnétique dans les matériaux ferromagnétiques.

Tableau 2 : Caractéristiques principales des différents types d'actionnement.

Type d'actionnement	Avantage(s)	Inconvénient(s)
Electrostatique	<ul style="list-style-type: none"> • facilement intégrable sur silicium • faible consommation 	<ul style="list-style-type: none"> • tension élevée • faible déplacement
Thermique	<ul style="list-style-type: none"> • force et déplacement importants 	<ul style="list-style-type: none"> • forte consommation • réponse lente
Piézoélectrique	<ul style="list-style-type: none"> • faible tension • faible consommation • réponse rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • faible déplacement • nécessite des matériaux spécifiques
Mémoire de forme	<ul style="list-style-type: none"> • force et déplacement importants 	<ul style="list-style-type: none"> • forte consommation • réponse lente
magnétique	<ul style="list-style-type: none"> • directement commandable à distance • force et déplacement importants 	<ul style="list-style-type: none"> • nécessite des matériaux spécifiques et un dispositif externe

I-6 Conclusion

Un résumé de ces différentes caractéristiques est donné dans le tableau 2. Pour obtenir un système autonome, seuls les actionnements électrostatiques et piézoélectriques sont intéressants du fait de leur faible consommation de puissance et leurs facile technologie de fabrication.

Par rapport aux autres systèmes d'actionnement, l'actionnement magnétique présente certains avantages décisifs : Mouvements de grande amplitude, rapidité de commutation. Ils présentent cependant 2 inconvénients : la géométrie et les matériaux spécifiques mis en jeu. Les géométries 3D utilisées dans le monde macroscopique sont difficilement transposables, toutefois, des MEMS magnétiques présentant des géométries 2D ont été conçus comme on l'a montré dans le paragraphe précédent. Le principe de ce MEMS est donc très intéressant, c'est pourquoi nous allons nous pencher plus particulièrement sur les micro-leviers magnétiques.

Un résumé de ces différentes caractéristiques est donné dans le tableau 2. Pour obtenir un système autonome, seuls les actionnements électrostatiques et piézoélectriques sont intéressants du fait de leur faible consommation de puissance.

Comme indiqué en introduction, cette étude permet de connaître pour divers actionnements le profil d'une poutre (et pas seulement la déflexion de l'extrémité libre) ainsi que les contraintes en tout point. Les expressions analytiques obtenues permettent de quantifier l'influence de chaque paramètre (courant, tension, épaisseur, longueur, matériaux, etc.). Ces résultats peuvent être employés par les concepteurs, à partir d'un cahier des charges fixé, il est possible de choisir le principe d'actionnement le plus adapté, de dimensionner la structure et de déterminer l'excitation nécessaire au bon fonctionnement.

Chapitre II

Synthèse des

Matériaux et leurs propriétés

magnéto-mécaniques

INTRODUCTION :

Notre micro-actionneur sera constitué de parties mécaniques qui se déplacent ou se déforment sous l'action d'une force électromagnétique. Nous avons traité au cours du chapitre précédent des systèmes simples constitués de micro-poutres caractérisées par leur rigidité. Cette dernière dépend de la forme géométrique des poutres ainsi que des propriétés des matériaux. Or, lors des procédés de fabrication, on observe des variations importantes de ces mêmes propriétés, telles que le module d'Young et les propriétés magnétiques. Dans cette vision des choses, nous allons décrire d'une manière synthétique certains matériaux nécessaires pour notre étude en se concentrant sur les polymères et les matériaux magnétiques utilisés au sein des microsystèmes, et de leurs caractéristiques en faisant le point sur la technologie des PDMS[23].

2.1 Des matériaux magnétiques

Les matériaux magnétiques montrent plusieurs et uniques propriétés telle qu'une perméabilité élevée des matériaux magnétique doux ainsi qu'un coercivité élevée aussi des aimants permanents. Il est bien connu par exemple que les matériaux doux améliorent l'induction magnétique au sein de la matière que dans le vide par l'application de la même valeur de champ H, dans l'actionnement magnétique, il est nécessaire de fabriquer des composants qui génèrent des champs magnétiques que ce soient des aimants permanents ou bien des aimants électromagnétiques avec des propriétés bien précises[62].

2.1.1 Grandes classes de matériaux pour aimants permanents

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques peuvent être classés en deux grandes familles :

2.3.1.1 Les matériaux magnétiques doux

(Alliages magnétiques doux), qui ne présentent des propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation magnétique extérieure, et dont font partie les matériaux utilisés dans les transformateurs [63] ;

2.3.2.2 Les matériaux magnétiques durs

qui présentent des propriétés magnétiques même en absence d'une excitation magnétique extérieure, et dont font partie les matériaux pour support d'enregistrement magnétique, ainsi que les aimants permanents.

Lorsqu'un matériau magnétique est placé dans un champ magnétique extérieur H, il se crée une induction magnétique B propre au matériau, qui est due à la polarisation des domaines magnétiques, petites régions dans lesquelles les moments magnétiques ont une orientation commune. La polarisation des moments magnétiques crée une aimantation M, dont dépend l'induction propre B. Lorsque l'on supprime le champ

magnétique extérieur, un matériau magnétique dur conserve une aimantation résiduelle, appelée aimantation rémanente. L'aimantation rémanente d'un matériau magnétique doux est pratiquement nulle. Les courbes $M(H)$ ou $B(H)$, relatives à chaque type de matériau, sont appelées cycles d'hystérésis en aimantation, ou en induction. La fig.1 montre la forme des courbes $B(H)$ caractéristiques pour ces deux familles de matériaux [47].

Il existe une grande variété de matériaux pour aimants permanents dont les propriétés et les applications sont très diverses. Les aimants permanents, qui peuvent être des matériaux céramiques ou des matériaux métalliques, sont caractérisés par leurs propriétés magnétiques macroscopiques (appelées également propriétés extrinsèques) :

- induction rémanente B_r ;
- champ coercitif de l'aimantation H_{cJ} ;
- champ coercitif de l'induction H_{cB} .

Ces propriétés sont liées aux propriétés magnétiques intrinsèques des phases magnétiques constitutives de l'aimant :

- aimantation à saturation M_s ;
- champ d'anisotropie H_a ;
- température de Curie T_c .

Elles sont également liées à la microstructure de l'aimant (forme et dimensions des grains). De plus, les caractéristiques mécaniques ou physico-chimiques des aimants influent largement sur leurs domaines d'applications.

Quatre familles de matériaux pour aimants permanents conduisent à l'essentiel des applications sur le marché. Ce sont les alnicos, les ferrites durs, les samarium-cobalt et les néodyme-fer-bore. Les propriétés de ces matériaux sont présentées dans les tableaux suivants.

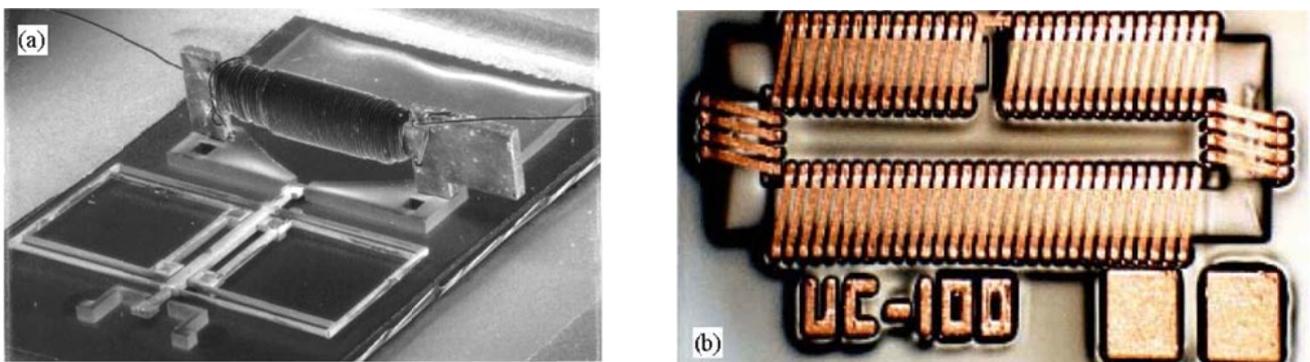


Fig. 1 Des micro-moteurs utilisant des micro-bobines

D'autres matériaux existent, mais leurs applications sont très restreintes. Ce sont les alliages ductiles, les alliages manganèse-aluminium-carbone, les aciers durs martensitiques, ou les aimants à base de micro-poudres. Les propriétés de ces matériaux sont présentées dans les paragraphes suivants[62].

2.1.2 Propriétés magnétiques

Un aimant permanent est caractérisé par son cycle d'hystérésis $B(H)$. Plus particulièrement, le second quadrant du cycle, appelé *courbe de désaimantation* (fig.2), donne toutes les caractéristiques magnétiques macroscopiques, ou intrinsèques, de l'aimant :

- l'induction rémanente B_r , qui représente l'induction résiduelle en circuit fermé ; c'est une indication de la puissance potentielle de l'aimant ;
- le champ coercitif de l'induction H_{cB} , qui est le champ démagnétisant annulant l'induction B ; c'est une indication de la stabilité de l'aimant ;
- le produit d'énergie volumique BH qui définit la valeur énergétique de l'aimant par unité de volume, dont on tire la densité d'énergie volumique $(BH)_{max}$, valeur maximale du produit d'énergie volumique BH ; $(BH)_{max}$ correspond au point de fonctionnement optimal de l'aimant, associé aux valeurs B_m et H_m (fig.2).

Ces trois paramètres sont déterminants dans le choix qui peut être effectué par l'utilisateur. Il est possible de classer les différents types d'aimants en fonction des valeurs de leur champ coercitif de l'aimantation H_{cJ} et de leur densité d'énergie volumique $(BH)_{max}$

(fig.3). Ces paramètres sont, avec l'induction rémanente B_r ,

Les paramètres qui déterminent le choix d'un aimant pour une application donnée. Les valeurs de ces grandeurs magnétiques sont données dans le tableau 1 pour les quatre familles d'aimants. La température maximale d'utilisation d'un aimant est déterminée

par la température de Curie T_C et par les variations en température des paramètres H_{cJ} et B_r . [62] Les valeurs correspondantes sont également reportées dans le tableau 1 :

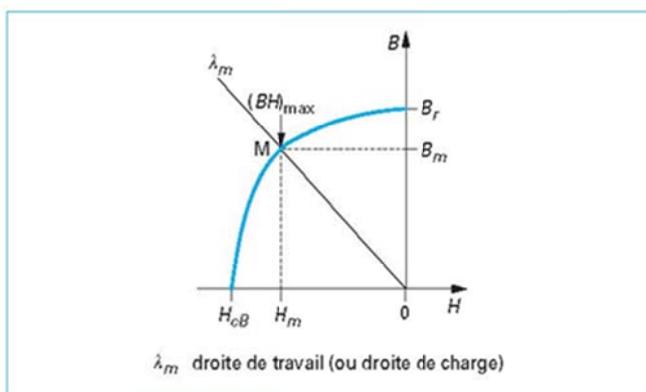


Fig.2 : courbe de désaimantation d'un aimant pour aimant permanent.

Tableau 1 : Les valeurs numériques des principales grandeurs magnétiques des grandes familles d'aimants à température ambiante

Valeurs numériques des principales grandeurs magnétiques des grandes familles d'aimants à température ambiante							
Famille	Température de curie (°C)	Température maximale d'utilisation (°C)	(BH) _{max} (KJ/m ³)	H _{cJ} (KA/m)	B _r (T)	Coefficient de Température de H _{cJ} (%/K)	Coefficient de Température De B _r (%/K)
Alnico	740 à 860	450 à 540	35,8 à 43,8	64 à 103	1,1 à 1,3	+0,03 à -0,07	-0,02
Ferrites(Sr)	450 à 460	250 à 300	25,5 à 40,6	200 à 400	0,38 à 0,46	-0,30 à -0,50	-0,18 à -0,20
Sm-Co 1-5	700 à 750	250	135,5 à 151,2	960 à 1600	0,82 à 0,87	-0,15 à -0,30	-0,045 à -0,050
Sm-Co 1-5	800 à 850	450 à 550	159,1 à 354,6	490 à 790	0,92 à 1,16	-0,15 à -0,30	-0,030 à -0,035
NdFeB	310 à 330	80 à 180	199,0 à 310,3	880 à 1990	1,0 à 1,3	-0,55 à 0,65	-0,11 à -0,13

2.1.3 Propriétés mécaniques

En général, les aimants permanents sont des matériaux qui présentent certains inconvénients du point de vue des propriétés mécaniques. La plupart sont fragiles, telles les ferrites qui sont des matériaux céramiques, ainsi que les aimants métalliques (alnico, samarium-cobalt, néodyme-fer-bore). Les aimants métalliques sont de plus très durs, et présentent donc d'importantes difficultés d'usinage, nécessitant l'emploi de meules diamantées. L'obtention de tolérances mécaniques serrées et d'un bon état de surface revient alors très cher.

Tableau 2: Valeurs numériques des principales grandeurs mécaniques et physico-chimiques des grandes familles d'aimants .

Valeurs numériques des principales grandeurs mécaniques et physico-chimiques des grandes familles d'aimants .						
Famille	Résistivité (Ω.m)	Masse volumique (10 ³ kg.m ⁻³)	Coefficient de dilatation linéique (1) (10 ⁻⁶ k ⁻¹)	Dureté HV : Vickers (2)	Résistance à l'oxydation (3)	Résistance à la corrosion (3)
Alnico	60.10 ⁻⁸	7,3 à 7,4	13	450 à 550	Bonne	Moyenne
Ferrites(Sr)	10 ⁴	4,9 à 5,1	15	3 Mohs	Bonne	Moyenne
Sm-Co (1-5)	53.10 ⁻⁸	8,1 à 8,3	6	450 à 500	Moyenne	Moyenne
Sm-Co (2-17)	86.10 ⁻⁸	8,3 à 8,5	8	500 à 600	Moyenne	Moyenne
NdFeB	130.10 ⁻⁸	7,3 à 7,5	5,2	550 à 650	Médiocre	Médiocre

(1) Valeur mesurée dans la direction de facile aimantation.

(2) La dureté d'un matériau peut être donnée dans plusieurs unités, en Vickers (HV), en Rockwell(HR) (Valeurs numériques sensiblement dix fois plus faibles qu'en HV) ou en Mohs (unité habituellement utilisée dans le cas des ferrites).

(3) Les résistances à l'oxydation et à la corrosion sont données pour le NdFeB sans protection.

2.1.4 Propriétés physico-chimiques

Les propriétés physico-chimiques des aimants sont des paramètres tels que la masse volumique, la résistivité électrique, le coefficient de dilatation linéaire, la résistance à l'oxydation, la résistance à la corrosion... De ces différents points de vue, les aimants permanents présentent des propriétés très diverses. Les valeurs de ces différents paramètres sont regroupées dans le Tableau 2 [62] :

2.1.5 AIMANTS PERMANENTS AU SEIN DES MICROSYSTEMES :

On distingue trois types d'aimants permanents :

- des aimants frittés micro usinés (dits massifs).
- des aimants en poudre, moulés par le biais d'un liant.
- et finalement des aimants déposés en couches grâce aux microtechnologies.

2.1.5.1 Aimants massifs :

Des aimants massifs, mécaniquement usinés, sont normalement utilisés en électrotechnique [39]. Puisqu'il s'agit ici des aimants frittés, leur aimantation ne se réalise qu'après le processus de frittage. Ces aimants sont relativement faciles à fabriquer, ils ont les meilleures propriétés magnétiques et de très bonnes propriétés mécaniques, même s'ils restent assez sensibles aux hautes accélérations tangentielles propres aux systèmes tournants. Ils ont aussi été utilisés dans certains microsystèmes magnétiques ; ils y sont donc micro usinés en des cubes ou des cylindres submillimétriques.

Toutefois, ces aimants présentent certaines difficultés d'utilisation dans les microsystèmes, D'une part, leurs géométries restent difficiles à réaliser; la fabrication de ces aimants de taille millimétrique demeure fort coûteuse et reste hors du circuit de fabrication en parallèle propre aux microsystèmes. D'autre part, les forces générées avec ces aimants restaient importantes.

Finalement, les caractéristiques magnétiques à la surface de l'aimant peuvent être considérablement affectées par effet du micro-usinage, lorsqu'il s'agit de géométries très fines.

2.1.5.2 Aimants en poudre :

Une autre approche de fabrication de micro-aimants consiste à mélanger de la poudre d'aimant permanent dans une résine époxy. Lagorce et son équipe ont reporté l'obtention d'une poudre de ferrite céramique d'anisotropie élevée, noyée dans une résine époxy. La taille des grains variant entre 1,15 et 1,5 μm , la concentration volumique obtenue est de 80%. Une technique équivalente a été mise au point au Laboratoire Louis Néel . Cette méthode, très simple, d'élaboration des aimants moulus peuvent offrir de

nouvelles applications aux microtechnologies magnétiques. Afin de conserver à tout moment la coercivité du matériau, il est nécessaire d'utiliser des poudres nanostructures. Ces poudres sont généralement moulées à partir de rubans amorphes [40]. Les aimants moulés sont donc directement obtenus à partir d'un mélange entre la poudre d'aimant et la résine d'époxy, l'étape de frittage étant ainsi éliminée.

Ces premiers aimants ont donc été réalisés à partir de NdFeB. La taille typique des grains de poudre est de quelques 30 μm et le coefficient de concentration du matériau magnétique dans la poudre est estimé à environ 60 %. L'aimantation rémanente du matériau est d'environ 0,4 T. Des travaux de recherche ont été entrepris afin d'obtenir, par le même procédé, des aimants en SmCo, dont la taille typique serait d'environ 5 μm .

2.1.5.3 Aimants en couches minces :

Le dépôt des matériaux en couches constitue l'un des principaux axes qui ont permis le développement des microsystèmes. Des métaux purs d'abord, suivis des alliages complexes, ont été déposés en couches par des techniques de lithographie (dépôt, gravure), permettant ainsi de créer des systèmes mécaniques à l'échelle microscopique. Des aimants permanents déposés en couches minces sont, eux aussi, actuellement développés ; le développement de ce type d'aimants constitue un défi et un atout potentiel majeur dans les microsystèmes magnétiques. Les propriétés de ces aimants demeurent toutefois fort restreintes, les épaisseurs déposées sont toujours limitées à quelques micromètres : à partir de 1,5 μm et jusqu'à 300 μm . Même si les propriétés magnétiques sont également limitées (souvent en dessous du Tesla), [41], on a pu obtenir des coercivités importantes qui permettraient de surmonter un champ extérieur opposé, tel que l'action démagnétisante ou la proximité d'un autre aimant à aimantation opposée. Le fonctionnement de l'aimant à aimantation quasiment constante est ainsi assuré.

Malheureusement, ces dépositions d'aimant n'étant obtenues à l'heure actuelle que dans des laboratoires spécialisés.

En conclusion, parmi les matériaux utilisés au sein des microsystèmes : le Permalloy.

2.1.5.3.1 Le Permalloy

Le permalloy est un alliage de nickel et de fer possédant des propriétés particulièrement intéressantes. Le nickel et le fer présentent des magnétostrictions non nulles et opposées. Si on mélange 20% de fer, les contributions magnétostrictives des deux éléments se compensent, en donnant un phénomène semblable à l'anisotropie magnétocristalline.

De point de vue de l'amortissement, le Permalloy présente deux avantages : l'addition de fer dans le nickel permet même en petite quantité de s'affranchir des diffusions interbandes qui donnent une relaxation importante.

Ces propriétés présentent un avantage pratique considérable : la distribution aléatoire des axes cristallins (auxquels sont liés les axes d'anisotropie et de magnétostriction) se traduit en général par des propriétés magnétiques assez complexes. Les joints de grains peuvent par exemple gêner la propagation des parois de domaine, ce qui se traduit par une coercivité élevée.

ne présentant ni anisotropie ni magnétostriction (matériau dit « doux »), le Permalloy jouit des propriétés nettement idéales : une forte perméabilité initiale qui en a fait un matériau de choix, une faible magnétostriction et une faible coercivité, des pertes modérées et une petite anisotropie (champs d'anisotropie de l'ordre de 0.5×10^{-1} mT).

2.2 Les polymères

2.2.1 Origine et synthèse :

2.2.1.1 le monomère et le polymère

ce sont les composés de bases des polymères. Relevant de la chimie organique, ils associent par des liaisons covalentes des atomes de carbone et des atomes d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, plus éventuellement des atomes de chlore, de fluore, de soufre, etc. Chaque atome de carbone, tétravalent, est relié aux atomes voisins par quatre liaisons covalentes, orientés dans l'espace vers les quatre sommets d'un tétraèdre régulier. Ces molécules réagissent par des réactions dites de polymérisation pour conduire à un polymère, cette polymérisation peut être par addition et ce sera alors par polyaddition ou bien par condensation, dans ce cas elle dite polycondensation.

Les polymères organiques sont synthétisés au départ de monomères qui sont des molécules réactives de faible masse molaire qui, par polymérisation ou par polycondensation, engendrent des structures macromoléculaires. Celles-ci sont linéaires, ramifiées ou pontées, et elles donnent naissance à divers types de matériaux de synthèse: *thermoplastiques amorphes ou semi-cristallins, élastomères, fibres* à haute résistance mécanique, etc., qui sont les supports matériels indispensables à un grand nombre de technologies modernes.

2.2.2 Principaux types de matériaux polymères

Il existe deux grandes classes de matériaux polymères:

Un polymère est une molécule de masse moléculaire importante, dans laquelle un motif, appelé également monomère, est répété un grand nombre de fois (jusqu'à plusieurs milliers) : $-[\text{motif}]_n$. Le

motif répété n fois constitue la chaîne polymérique. Il existe trois familles de polymères classées suivant leurs propriétés physiques :

- **élasticité (les élastomères)** : polymère ou copolymère organique élastique dont il existe différentes familles selon, les propriétés mécaniques, thermiques ou diélectriques. Leur mise en oeuvre se fait par autoclave, l'opération de vulcanisation créant l'élasticité, (ex : polyisoprène, polyuréthane),
- **thermoplasticité (les thermoplastiques)** : se dit des matières plastiques acquérant une certaine plasticité lorsqu'elles sont chauffées. Les polymères thermoplastiques ont des structures linéaires qui sont composées de chaînes qui, avec l'élévation de température, peuvent glisser les unes par rapport aux autres, (ex : polyéthylène basse densité PEBD, polyéthylène haute densité PEHD),
- **thermodurcissable** : type de matières plastiques perdant irréversiblement leur plasticité lorsqu'elles sont chauffées. Le polymère obtenu est réticulé, dur, insoluble dans les solvants et ne peut être fondu, (ex : époxy, silicone, bakélite).

2.2.3 Propriétés des polymères

Les polymères se caractérisent par leur basse énergie superficielle qui assure un faible niveau d'énergie inter faciale en présence des métaux. Cela leur confère des propriétés antiadhésives et un faible facteur de frottement. Les plus utilisés pour la réalisation de pièces frottantes sont les:

- thermoplastiques: polyacétals, polycarbonates, polyamides, polyéthylènes, polyphénylène, résines fluorées (PTFE, PCTFE), polyetheretherkétone, polyethersulfone;
- thermodurcissables: alkyd polyester, résines époxies, résines phénoliques, polyimides.

2.2.4 Propriétés mécaniques des polymères

Les propriétés mécaniques des polymères peuvent varier énormément. Certains sont des solides rigides, d'autres des solides hautement élastiques ou encore des liquides visqueux. Ces propriétés dépendent de la structure moléculaire du polymère et de la température.

A basse température, la plupart des polymères présentent un état vitreux : ils sont rigides. Lorsque la température augmente, ils passent par un état de transition : pour une zone de température spécifique du polymère, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit. Cette température est appelée température de transition vitreuse, notée T_g . A une température plus élevée, le polymère passe par un plateau caoutchoutique : son comportement est visco-élastique. À cet état, les forces de Van der Waals et la réticulation entre les chaînes servent de force de rappel lorsque l'on déforme le matériau (élasticité). Enfin, lorsque la température de polymères peu réticulés est élevée, nous assistons à une phase d'écoulement visqueux, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce

dernier comportement est utilisé pour mettre en forme les matières plastiques. Le tableau suivant donne un aperçu sur les grandeurs physiques de quelques polymères.

2.2.4.1 Comportement pseudo plastique

La pseudo plasticité est d'autant plus marquée que la masse molaire du polymère sera élevée. Il est habituel de rendre compte de la décroissance de la viscosité en fonction du taux de cisaillement à l'aide de la loi d'Ostwald donnée par l'équation II-1 :

$$\eta = k\dot{\gamma}^{m-1}$$

K : la consistance du polymère.

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement

m : indice de pseudoplasticité, généralement compris entre 0,2 et 0,5.

La loi puissance rend compte correctement de la décroissance linéaire de la viscosité en fonction du taux de cisaillement. Le comportement pseudoplastique, ou rhéofluidifiant, a des implications très importantes dans les procédés : les pressions dans les outillages évolueront modérément en fonction du débit. Les machines de mise en oeuvre des polymères auront ainsi une plage de fonctionnement étendue [58].

2.2.4.2 Comportement viscoélastique

Le comportement viscoélastique recouvre une large classe de phénomènes : tel que les phénomènes transitoires, comme le retard à l'établissement ou la relaxation de la contrainte en cisaillement simple dû à l'existence d'un ou de plusieurs temps caractéristiques pour le polymère. L'un des effets les plus spectaculaires est l'apparition d'une importante force d'écartement quand on cisaille un polymère entre un disque fixe et un disque en rotation .

Les différents phénomènes viscoélastiques ont une incidence très importante sur les procédés de mise en forme des polymères. Ils sont responsables du gonflement du polymère en sortie de filière qui rend par exemple délicate la mise au point de la fabrication de profilés. Ils sont à l'origine des « défauts d'extrusion » observés à haut débit. L'augmentation de la viscosité élongationnelle avec le taux d'élongation permet de stabiliser les étirages et autorise la fabrication de fibres et de films à taux d'étirage élevé [58].

2.2.4.3 Comportement plastique :

La déformation plastique, ou plus précisément la ductilité apparente, est accessible par l'amorçage local dans l'amorphe, de micro domaines déformés qui autorisent, suivant les matériaux, des processus élémentaires de type craquelures, bandes de cisaillement ou plus complexes de type cavitation.

La multiplicité des processus donne à la « plasticité » des polymères des caractéristiques que nous résumerons ici :

- Forte sensibilité à la température et à la vitesse de sollicitation ; C'est-à-dire que le seuil est d'autant plus élevé que la vitesse est grande ou la température est basse ;
- L'existence de transition « ductile / fragile », car tous les processus de plasticité locaux ne conduisent pas à une même ductilité apparente. Ainsi le polymère peut apparaître fragile en traction et ductile en compression ou cisaillement. Notons que généralement un chargement triaxial peut fragiliser les polymères.
- La dépendance des surfaces de charge avec le terme de pression hydrostatique ou, en d'autres termes, la dépendance du seuil de plasticité envers le mode de sollicitation (plus élevé en compression qu'en traction par exemple) ;
- L'existence de variations de volume en cours de déformation plastique, ce qui a une répercussion forte sur la modélisation du comportement des polymères. Durant sa phase de déformation plastique le polymère peut, de plus, être le siège d'un durcissement structural, associé à l'orientation moléculaire et à la texturation du cristal (quand il existe) voire à la cristallisation induite par la déformation. Il peut aussi être le siège de processus d'endommagement.

En conclusion, dans la famille des polymères on peut trouver une multitude de comportements différents. On ne devrait pas parler d'un comportement des polymères mais de plusieurs comportements des polymères. Cette complexité explique certaines difficultés de dimensionnement de structures polymères.

Durant sa phase de déformation plastique le polymère peut, de plus, être le siège d'un durcissement structural, associé à l'orientation moléculaire et à la texturation du cristal (quand il existe) voire à la cristallisation induite par la déformation. Il peut aussi être le siège de processus d'endommagement.

En conclusion, dans la famille des polymères on peut trouver une multitude de comportements différents. On ne devrait pas parler d'un comportement des polymères mais de plusieurs comportements des polymères. Cette complexité explique certaines difficultés de dimensionnement de structures polymères.

2.2.4.4 Paramètres influents sur les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des polymères sont liées aux conditions de mise en oeuvre et aux conditions de sollicitation (sens, vitesse) ou d'environnement (température, pression, milieu environnant). Pour étudier et gérer les polymères et leur comportement, on doit prendre compte de, [26] :

- L'architecture du polymère ;
- La formulation du polymère ;
- La mise en oeuvre du matériau ;
- Les conditions d'utilisation.

Ceci dit, tous ces paramètres ne sont pas tous indépendants puisque, dans une certaine mesure, la nature des chaînes conditionne leur organisation et leur comportement.

2.2.5 Les polymères magnétique

Les micros aimants sont largement utilisés dans microsystèmes. Ils sont composés de poudres de ferrite ou de terres rares. Ces microaimants sont rigides et fragiles, et ils ne peuvent être obtenus que dans des formes relativement simples. Des polymères magnétiques ont été développés afin de pouvoir réaliser des formes complexes. Ceux-ci sont composés d'une matrice polymère (PVC, Polyamide, PA, PPS, Polysulfure de phénylène, PPS, PMMA, PDMS, ...) et de particules magnétiques (ferrite ou terres rares). Leurs propriétés magnéto-mécaniques dépendent notamment de la forme des particules et de leur nature chimique, avec une température d'utilisation pouvant être plus élevée.

Ces polymères magnétiques peuvent être mis en oeuvre par les procédés traditionnels de la plasturgie. Ils apportent une augmentation de la résistance à l'impact par rapport aux aimants métalliques et permettent la réalisation de pièces flexibles. Les polymères magnétiques sont, en général, utilisés dans les micro-actionneurs et les micro-capteurs.

Contrairement aux polymères conducteurs électroniques, les polymères présentant des propriétés magnétiques intrinsèques sont encore au stade d'expérience au laboratoire.

En 2004, des chercheurs anglais ont fabriqué le premier polymère magnétique à température ambiante. Jusqu'à cette date, les polymères développés ne présentaient des propriétés magnétiques qu'à très basse température (70 °C).

Tableau 3 Les types de Polymères et leurs caractéristiques physiques

Type de polymère	Masse vol. (Mg/m ³)	Temps. De trans. Vitreuse (°C)	Temp . de fusion (°C)	Condu. Therm. (W/m.K)	Permit. relative
Polyoléfines					
PEbd	0,92 à 0,95	-110 à -100	115	0,35	2,25 à 2,35
PEhd	0,95 à 0,98	-110 à -100	130	0,52	2,3 à 2,4
	0,90	-30 à -10	170	0,2	2,2 à 2,6
Polyvinyliques					
PVC	1,4	75 à 105	160	0,15	2,7 à 3,3
Polytyréniques					
PS	1,1	90	-	0,1 à 0,15	2,4 à 3,1
ABS	1,03 à 1,08	110	-	0,14 à 0,22	2,4 à 2,9
Polyacryliques					
PMMA	1,2	120	225	0,2	2,6 à 3,2
Polymères fluorés					
PTFE	2,2	125	330	0,25	2,0 à 2,1
Polyoxyméthylènes					
POM	1,41	-50	170	0,22 à 0,35	3,6 à 4
Polyamides					
PA6-6	1,14	70	250	0,2 à 0,25	3,3 à 3,6
Polyesters saturés					
PETP	1,32 à 1,38	70	255	0,15 à 0,34	3 à 3,6
Polycarbonates					
PC	1,24	150	230	0,18 à 0,22	2,9 à 3,1
Polysulfones					
PSU	1,24	190	-	0,19 à 0,27	3,1 à 3,2
Cellulosiques					
CA	1,26	120	-	0,17 à 0,32	5 à 5,5

2.2.6 Avantages des polymères dans le domaine des microsystemes :

Les polymères ont les caractéristiques suivantes : plus légers, moins fragiles, souples, insensibles aux champs magnétiques, faible consommation énergétique, biocompatibles, transparents. Parmi les applications, on peut citer les muscles artificiels, les enceintes audio, les pompes, les capteurs, et finalement les générateurs électriques. Cette dernière application s'inscrit dans l'initiative de la Darpa «micro power génération» afin d'alimenter les équipements électroniques des soldats américains.

L'idée fondamentale est d'utiliser l'énergie perdue lors de la marche (sans impliquer d'effort supplémentaire) et de la transformer en électricité via un module placé dans le talon de la chaussure (figure II.8). Le module est un cylindre rempli d'un gel et fermé supérieurement par le polymère. Sous l'effet du poids, le cylindre se comprime, exerçant une contrainte déformant le polymère, qui génère de l'électricité. Aujourd'hui, ce système pourrait produire 1 Joule par pas, soit une puissance de 1 W pour une cadence de 1Hz.

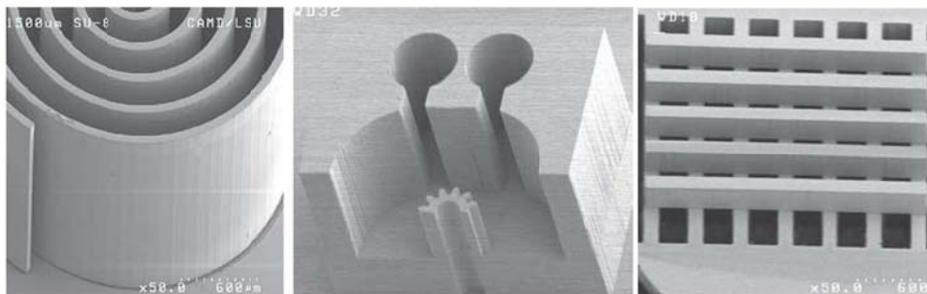
2.2.7 Polymeres utilises au sein des microsystemes :

2.2.7.1 Polyméthylméthacrylate (PMMA) :

Connu commercialement sous les noms : Lucite, Perspex, Plexiglas, le PMMA est un thermoplastique amorphe, transparent et sans couleur qui est dur et rigide mais fragile et sensible à l'entaillage. Il a une bonne résistance à l'abrasion et aux UV, et une excellente transparence optique mais une résistance médiocre aux basses températures, à la fatigue et aux solvants. Bien que combustible, la quantité de fumée qu'il émet est faible.

] *Bharat Bhushan*. Springer Handbook of Nanotechnology. Second edition. Springer.2007

Dans ses qualités courantes, il peut être extrudé et coulé par injection. On utilise également le doulage monomère qui permet d'atteindre des masses moléculaires bien plus élevées avec des propriétés améliorées. C'est un polymère thermoplastique utilisé dans plusieurs secteurs, il peut servir de matière de base pour la préparation de certaines résines utilisées en lithographie.



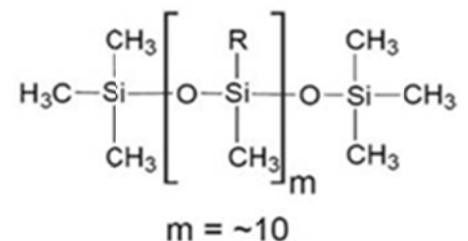
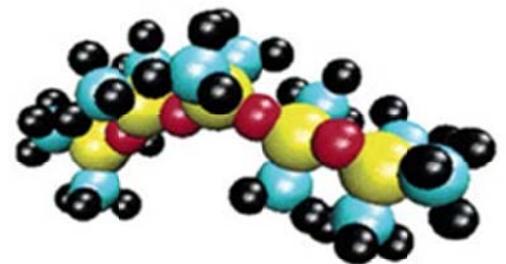
2.2.7.2 Polydiméthylsiloxane (PDMS):

Le Polydiméthylsiloxane appelé PDMS ou diméthicole est un polymère très utilisé pour la fabrication de puces microfluidiques. C'est un polymère organo-minéral (une structure contenant du carbone et du silicium) de la famille des siloxanes (mot dérivé de silicium, oxygène et alkane). On lui adjoint un agent réticulant ou durcissant dans des proportions massiques à définir pour obtenir un matériau transparent solide.



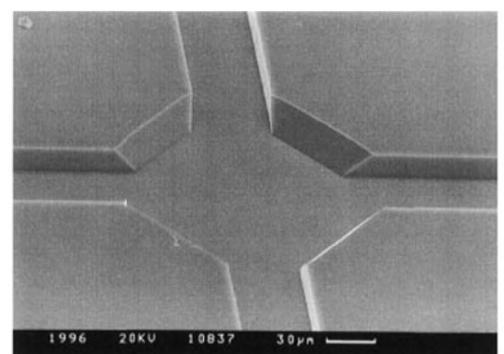
En dehors de la microfluidique il est utilisé comme additif alimentaire (E900), dans les shampoings, comme anti-moussant dans les boissons ou dans les huiles lubrifiantes. Pour la fabrication de dispositif microfluidiques, le PDMS (liquide) mélangé à un agent réticulant est versé sur un moule microstructuré et chauffé afin d'obtenir une réplique du moule en élastomère (PDMS réticulé) [7].

On appelle polysiloxane le polymère dont le squelette macromoléculaire est fondé sur l'enchaînement (-Si-O-Si-). Le Silicium étant tétravalent, il porte deux groupements supplémentaires comme par exemple deux groupements méthyle dans le polydiméthylsiloxane.



On appelle « activation » le traitement consistant en une oxydation de la surface du polymère. Cette étape, réalisée par les radicaux libres "O" hautement réactifs présents dans le plasma Oxygène, se traduit à l'échelle moléculaire par le remplacement des fonctions méthyl par des fonctions alcool au niveau très localisé de la surface du polymère. Le polymère, devenu hydrophile en surface, adhère alors parfaitement sur lui-même ou sur des surfaces oxydées par liaison hydrogène ou par liaison covalente (Si-O-Si) (Figure II.10). Cette technique, très communément utilisée pour la fabrication de laboratoires sur puce, permet un assemblage aisé de canaux tout-PDMS réalisés par moulage.

re du



s en
cal

Fig.6 : Relation de la force relative avec la longueur relative sans dimensions pour un cantilever.

- 1-petite deflexion.
- 2- courte poutre.
- 3- differente charge.

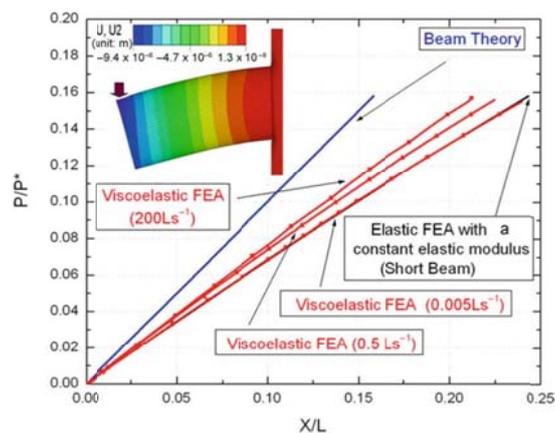


Fig. 4.6 Dimensionless form of force-displacement relationships for PDMS microcantilever shown by: (1) small deflection beam theory, (2) the elastic FEA model for short beams, and (3) the viscoelastic FEA model with different loading rates (Reprinted with permission from: [153], copyright 2008, American Institute of Physics)

2.3 Choix du materiau :

Le choix des matériaux est une étape cruciale pour la construction d'un microsysteme car c'est de cette étape que vont découler les performances mécaniques d'une part, et les problèmes de rupture d'autre part (fiabilité).

Le Silicium est le matériau privilégié en technologie microsysteme car il présente les atouts suivants :

- son histoire avec la micro-électronique.
- possède des propriétés mécanique, physique et chimique très intéressantes outre celle de la semi-conductivité exploré en micro-électronique.
- son prix réduit a cause de son abondance dans la nature.

Cependant dans d'autres microsystemes tel que la micro-fluidique, l'utilisation du silicium présente des limites. Par exemple, le Silicium est relativement cher pour des systemes qui seraient jetables, opaques dans le spectre visible et ultraviolet ce qui pose des problèmes pour certaines applications comme la chromatographie et l'électrophorèse.

Pour ces raisons, de nombreuses équipes ont développé de nouvelles filières technologiques plus simples, plus rapides à utiliser et moins coûteuses dites technologies « douces » ou « molles », pour le prototypage de microsystemes fluidiques, dans lesquels la présence des polymères est en augmentation. Ils jouent le rôle de matériau structurel ou fonctionnel complémentaire et quelques fois alternatif aux matériaux traditionnellement utilisés pour des applications biologiques et biomédicales (verre, quartz ou silicium).

Tableau II-2 : Propriétés des materiaux utilisés pour la réalisation du micro-levier d'après[1][18]

	PDMS	Polyimide	PMMA	Silicium
Module d'Young (Gpa)	0.00036-0.003	2.5	03	160
Density (g/cm ³)	0.97	1.42	1.3	2.4
Poisson constante	0.5	0.34	—	0.22
Permittivité relative	2.3-2.8	—	—	11.7

2.4 Fabrication de la poutre en PDMS :

La fabrication d'un microsysteme en PDMS utilise une technique largement connue ; il s'agit de la lithographie molle ou « soft lithography » qui se déroule de la manière suivante :

- Le dessin de la membrane est imprimé sur une feuille de transparent à l'aide d'une imprimante à haute définition
- Grâce à ce masque, une résine photosensible, préalablement étalée sur une plaque de Silicium ou wafer, est mise en forme pour constituer le moule.
- Le PDMS liquide est étalé sur le moule et durci à 75°C pendant 2 heures.
- La poutre en PDMS est alors démoulée et collée sur un substrat.

Chapitre III
Etude analytique
et
Analyse
Comportementale

1 Modèle mécanique

1.1 Modèle mécanique de la poutre

Selon la théorie des poutres (Gere and Timoshenko 1997) le déplacement u sous une force distribuée $f(x)$ comme montrée dans la figure 2 est simplement modelée par l'équation suivante :

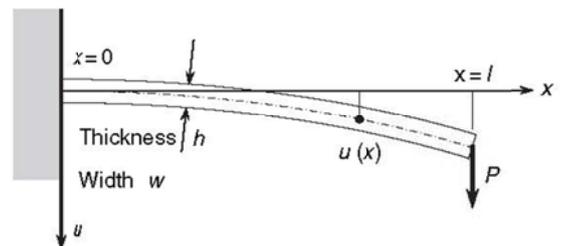
$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{f(x)}{EI} \quad [3.1]$$

Ou E c'est le module d'Young (160 GPa pour le Si selon $\langle 110 \rangle$ et 130 GPa selon la direction $\langle 100 \rangle$), I et le moment d'inertie, quand la section de la poutre est rectangulaire avec une largeur w (latérale) et une hauteur h (verticale) et forcée de fléchir selon la direction de son épaisseur (hors plan), le moment d'inertie s'écrit :

$$I = \frac{wh^3}{12} \quad [3.2]$$

Quand la poutre est fléchit selon la direction de sa largeur, le moment d'inertie sera :

$$I = \frac{hw^3}{12} \quad [3.3]$$



sole

Nous utilisons le modèle poutre en console et l'application d'une force concentrée sur l'extrémité libre voir figure ci-dessus.

Quand la force concentrée est appliquée en bas sur la poutre au point $x=l$,

Comme montré sur la figure 2.1 la poutre subit une force réaction au point d'encastrement pour $x=0$, l'équation [2.1] sera écrite :

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = f\delta(x) + f\delta(x - l) \quad [3.4]$$

Où $\delta(x - a)$ est la fonction delta qui est définie comme suit :

$$\delta(x - a) = \begin{cases} 1 & (x = a) \\ 0 & (x \neq a) \end{cases} \quad \text{and} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - a) = 1$$

Par l'intégration de l'équation [2.4]

$$EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = -f + C1 = -Vx \quad (\text{Force de cisaillement}) \quad [3.5]$$

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = (-f + C_1)x + C_2 = -Mx \text{ (Moment de flexion)} \quad [3.6]$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{1}{2}(-f + C_1)x^2 + C_2x + C_3 \quad [3.7]$$

$$Elu(x) = \frac{1}{6}(-f + C_1)x^3 + C_2x^2 + C_3x + C_4 \quad [3.8]$$

L'utilisation des conditions aux limites :

$y=0$ et $\frac{dy}{dx}=0$ au point $x=0$ dans les équations [2.7] et [2.8], respectivement, nous trouverons que $C_3 = C_4 = 0$.

Parce que la force du cisaillement $EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$ est égale à $-f$ partout dans la poutre, $C_1 = 0$. en plus, l'extrémité libre de la poutre ne subit aucun moment ;

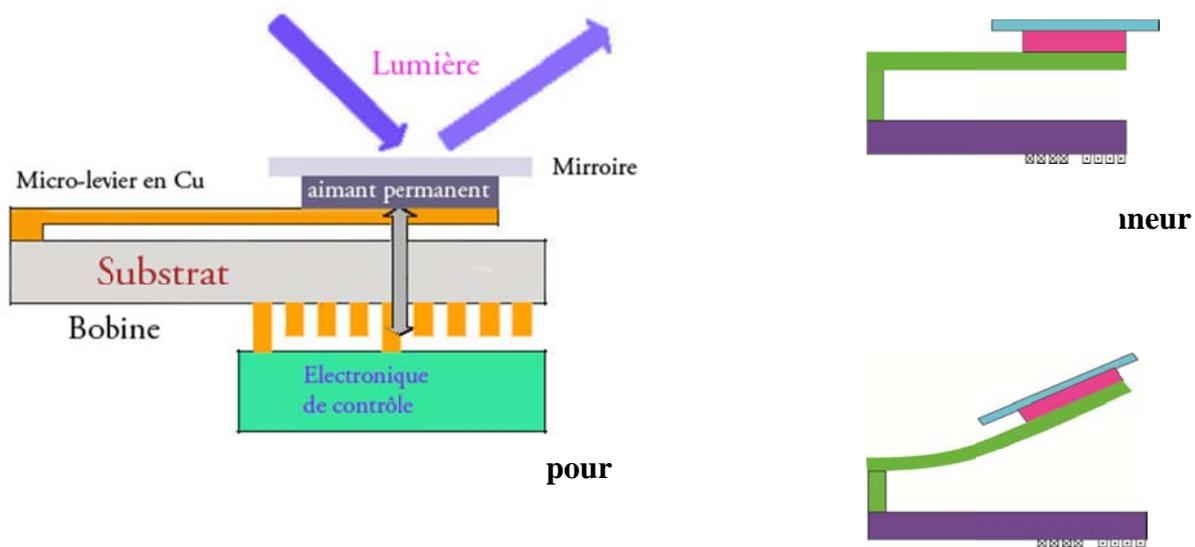
$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=l} = 0 \text{ et ainsi } C_1 = \frac{P}{l}.$$

Et par la suite, l'équation pour la poutre en console en flexion sera écrite :

$$y(x) = \frac{f}{EI} (3lx^2 - x^3) \quad [3.9]$$

2. Modèle électromagnétique :

Notre micro-actionneur à une structure qui est constituée d'un micro-levier est représenté dans la figure 3 qui normalement est réalisé pour faire pivoter un commutateur optique :



2.1 Actionnement magnétique possible :

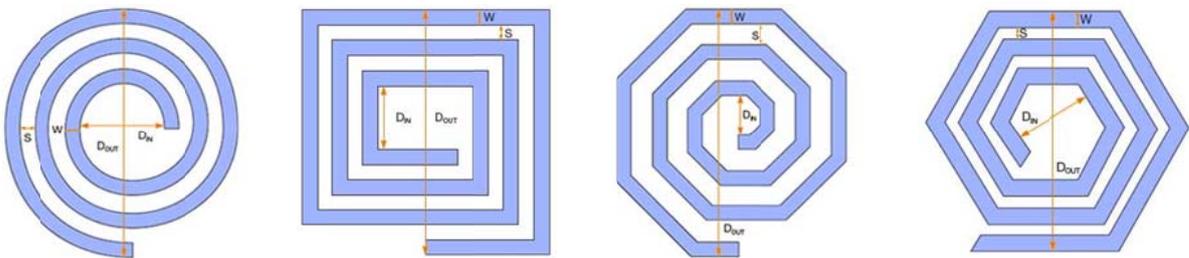
A priori, deux types d'actionnements magnétiques sont envisageables :

-génération d'une force localisée en bout de poutre en plaçant le système dans une région où règne un champ magnétique et en faisant circuler un courant dans un conducteur déposé sur la poutre. Cette force est commandable par variation du courant I ou du champ magnétique B.

-génération d'un couple à la surface de la poutre en la plaçant dans un champ magnétique et en déposant dessus un couche aimantée. Cette action n'est commandable que par variation du champ magnétique B. le couple généré n'est pas uniforme et dépend de la déflexion du point considéré. Deux cas de figure se présentent en fonction de la réalisation technologique et de l'aimantation dans la couche.

2.1.1 Expression analytique d'une inductance spirale plate :

Selon que notre aimant électromagnétique soit une spirale circulaire, une spirale rectangulaire, octogonale ou bien hexagonale nous utiliserons la formule de Wheeler modifiée selon [53][64] par :



$$Lw = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{moy}}{1+k_2 \rho} \tag{3.10}$$

Ou ρ est le coefficient de remplissage, il est défini comme suit :

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \tag{3.11}$$

Et d_{moy} est le diamètre moyen et il est défini comme suit :

$$d_{moy} = \frac{d_{out} + d_{in}}{2} \tag{3.12}$$

n est le nombre de tour de la spirale.

L'épaisseur du conducteur w à une influence négligeable sur l'inductance, donc elle peut être ignorée dans la suite.

Les constantes K_1 et K_2 dépendent de la forme de la spirale utilisée. elles sont données par le tableau suivant selon [64] :

Forme de la spirale	K_1	K_2
hexagonale	2.33	3.82
rectangulaire	2.34	2.75
octogonale	2.25	3.55

Ayant l'inductance, on peut facilement le champ B crée par la bobine spirale si on lui injecte un courant I , alors B aura la valeur :

$$B = \frac{L.I}{S} \quad \text{et} \quad B = \mu H \quad [3.13]$$

La mise en mouvement est effectuée grâce à la force exercée sur l'aimant permanent qui est conçu de matière polymère. Afin de pouvoir générer cette force F , il faut avoir à disposition un champ magnétique (ce qui est garanti par la bobine plate précédente). La poutre immergée dans un flux magnétique B est soumise à une force F égale :

$$F_{ze} = M_z \int_v \frac{dH_z}{dz} dv, \quad [3.14]$$

Ou M_z est la magnétisation, H_z (qui en général non-linéaire) est composante suivant z de l'induction magnétique produite par la bobine spirale planaire [Mechatronics handbook].

Nous savons bien que le micro-levier subit un couple T tel que :

$$T = is \times B = m \times B \quad [3.15]$$

Tel que :

i est le courant et m est moment dipolaire magnétique [Am^2]

Et la force électromagnétique sera ainsi :

$$F = \int_l idl \times B \quad [3.16]$$

Après calcul et simplification on trouvera que le couple de force sera d'après [Mechatronics handbook]. :

$$T_e = 4R^2 t_{tf} M H_p \cos \theta \quad [3.17]$$

Ou R et t_{tf} sont respectivement le rayon et l'épaisseur de l'aimant permanent sous forme de disque. M est la magnétisation de l'aimant permanent ; et H_p est la valeur de l'induction produite par la bobine spirale planaire ; θ est le déplacement angulaire.

Ainsi, la rotation du micro-levier est donnée par :

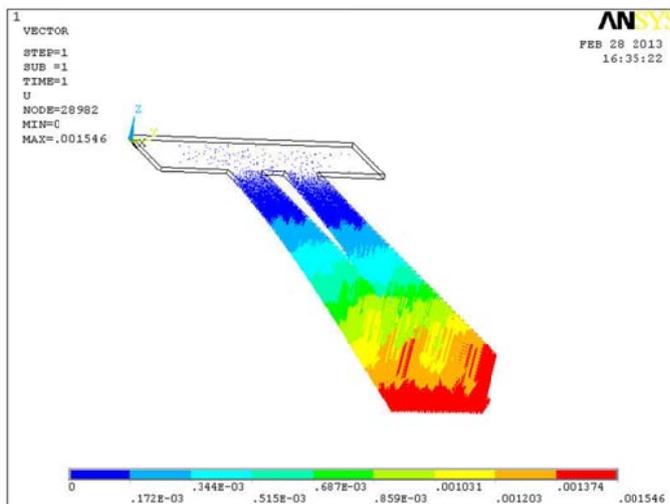
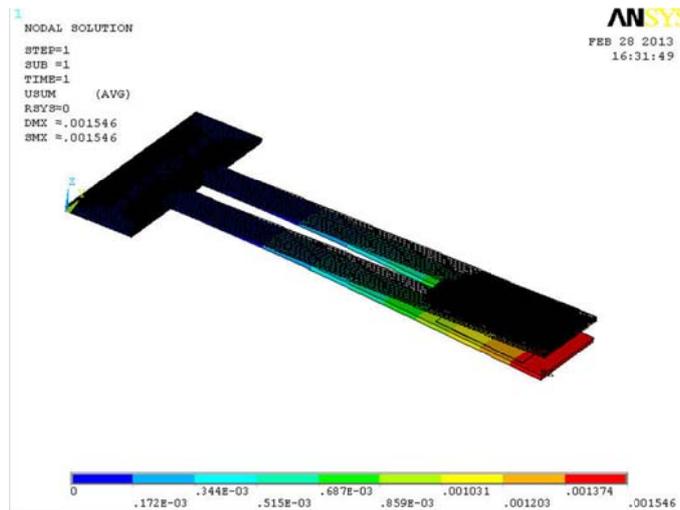
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{I}(T_e - T_L) \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad [3.18]$$

Ou T_L est couple de charge y inclus les frottements et d'autres perturbations ; I est le moment d'inertie équivalent d micro-levier avec l'aimant permanent et le miroir.

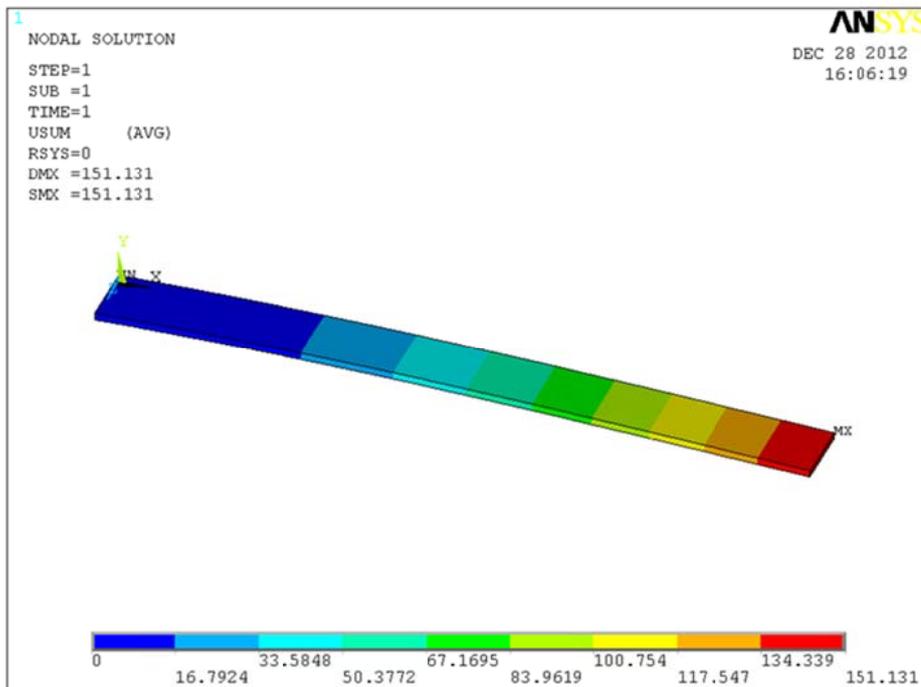
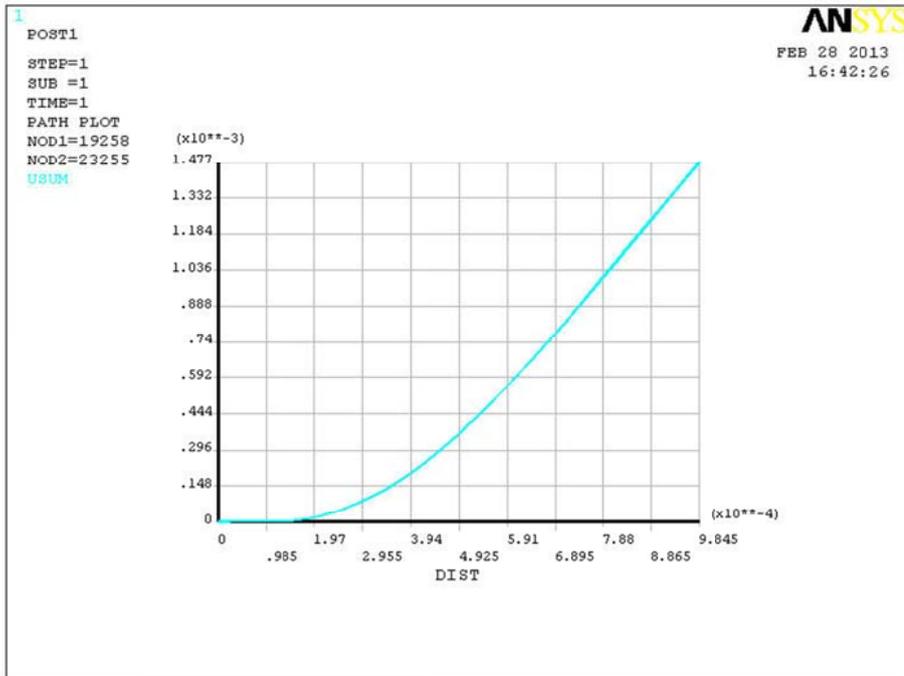
2.2. MODELISATION NUMERIQUE de la structure étudiée

Dans le but de valider notre structure, nous avons procédé à des simulations de la poutre en PDMS encastrée, et nous avons obtenu les résultats suivants

Les figures ci-dessous montrent la flèche pour une poutre et un micro-aimant assemblé :



Et les figures ci-dessous illustres le déplacement de la poutre pour une pression de 100Pa.



2.3. Analyse modale :

2.3.1. Fréquence de la résonance

L'analyse modale consiste à trouver les différents modes de la déformation de la membrane c.a.d les différentes fréquences et d'en déduire la fréquence de résonance.

A partir de la loi de conservation de l'énergie $\sum W = C^{st}$ ou l'énergie totale {Energie potentielle + Force vive} se conserve :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{k}{2}y^2 = c^{st} \quad [3.19]$$

Près la dérivation :

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + Ky = 0. \quad [3.20]$$

La force vive, représente le travail T de la force d'inertie ou la quantité $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ pour un point matériel pesant animé d'une vitesse v . On représente la masse totale de la poutre par $(m = \rho \cdot SL)$.

Dans notre cas le travail vaut :

$$T = \frac{1}{2} \int_{x=0}^L \rho S \left(\frac{dy(x)}{dt} \right)^2 dx. \quad [3.21]$$

Et l'énergie potentielle

$$E_p = \int_0^{y_0} F dy_0 \quad \& \quad F = 8 \frac{EI}{L^3} y_0. \quad [3.22]$$

Après les intégrations, on trouve l'équation des mouvements propre d'oscillation de la poutre :

$$\left(\frac{104}{405} m \right) \frac{d^2 y_0}{dt^2} + 8 \frac{EI}{L^3} y_0 = 0 \quad \text{Sous forme} \quad M \frac{d^2 y_0}{dt^2} + Ky_0 = 0 \quad [3.23]$$

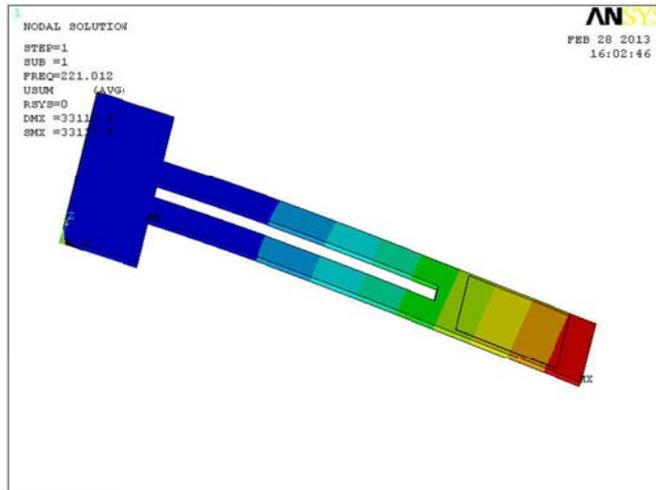
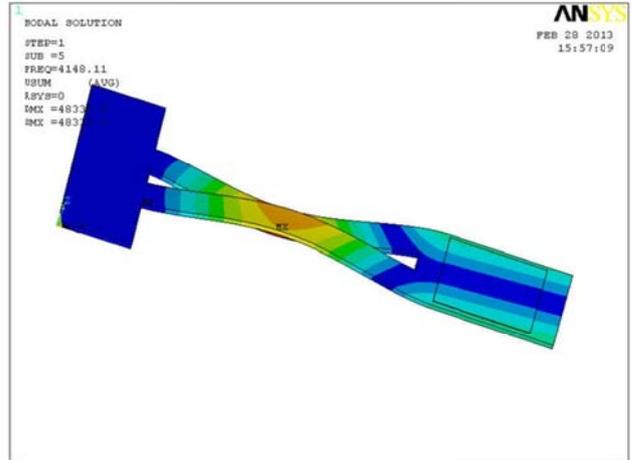
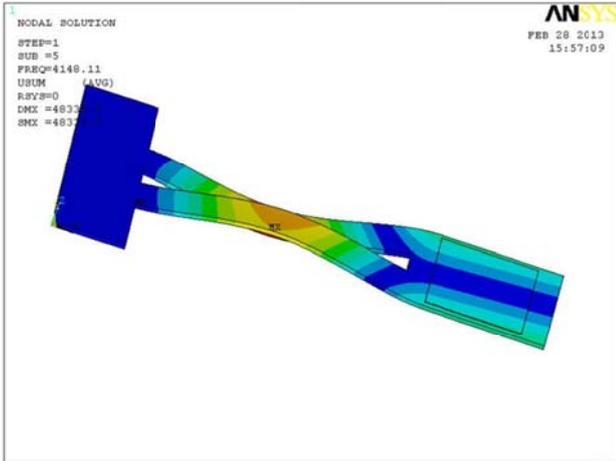
Avec $M = \frac{104}{405} m = \gamma \cdot m$ la masse efficace de la poutre, $K = 8 \frac{EI}{L^3}$ la raideur équivalente de la poutre et le rapporte $\left(\gamma = \frac{\text{masse efficace}}{\text{masse réelle}} \right)$.

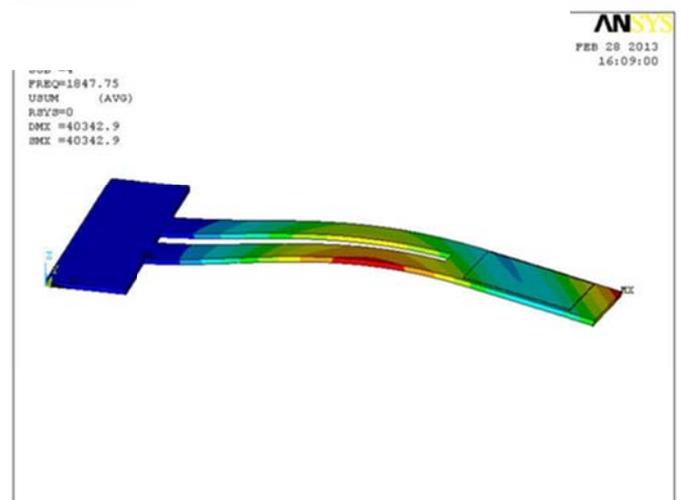
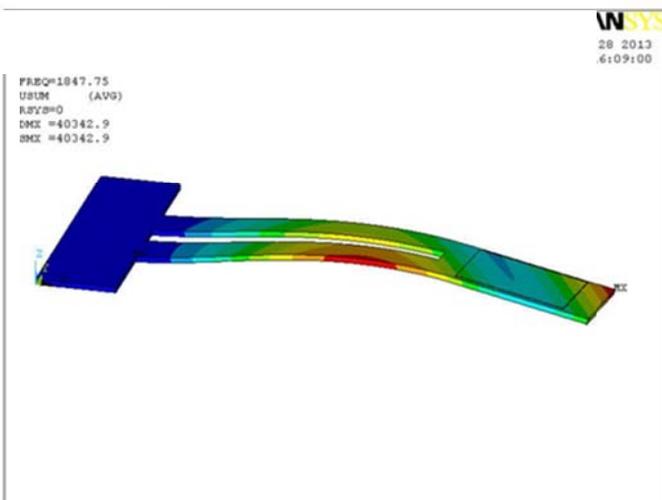
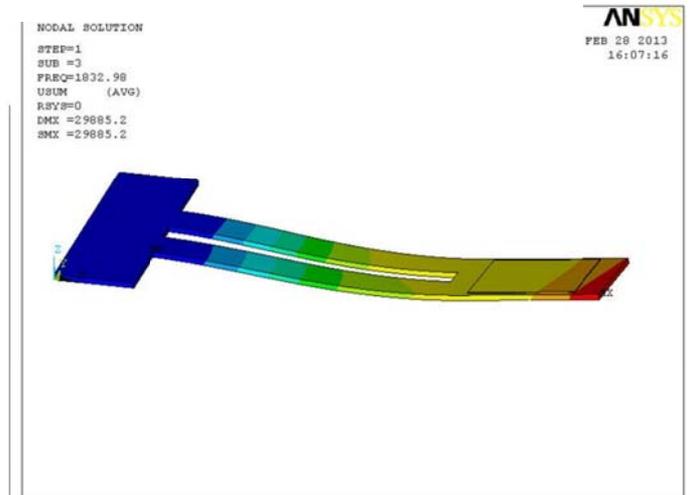
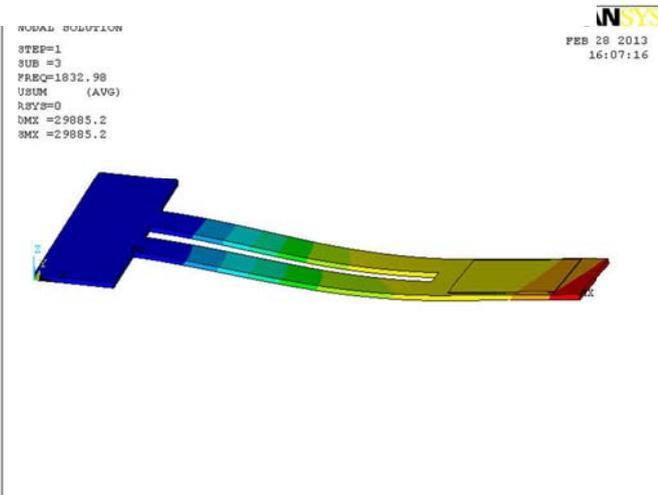
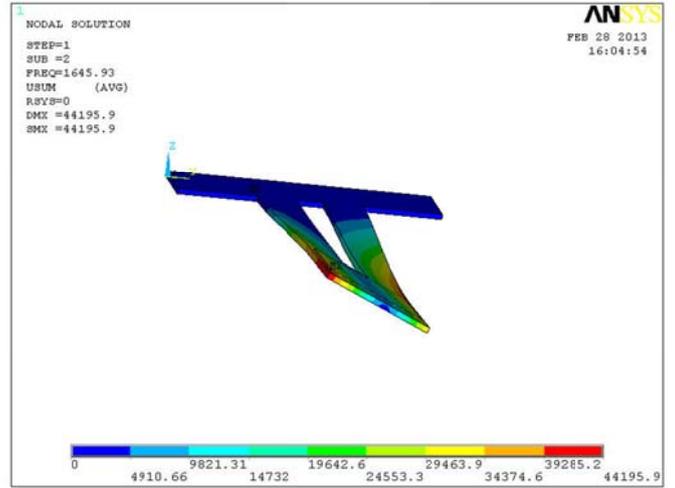
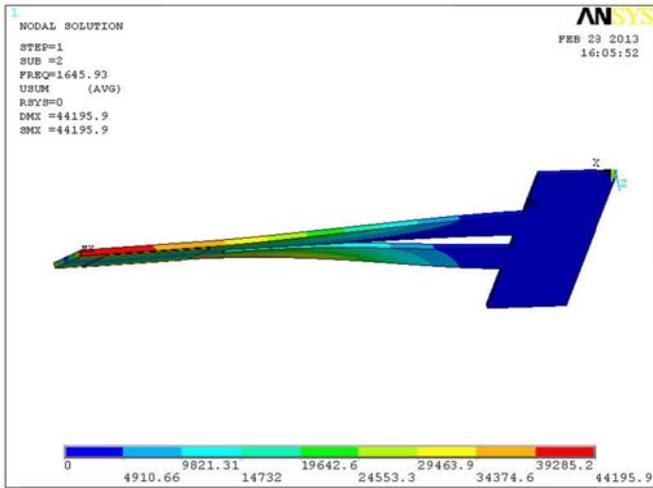
Donc la fréquence propre fondamentale :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{9}{4\pi} \sqrt{\frac{5 E}{39 \rho}}.$$

La résonance mécanique du système (membrane-aimant) permet un déplacement important. Les simulations numériques des différents modes de résonance des structures sont présentées dans l'ordre :

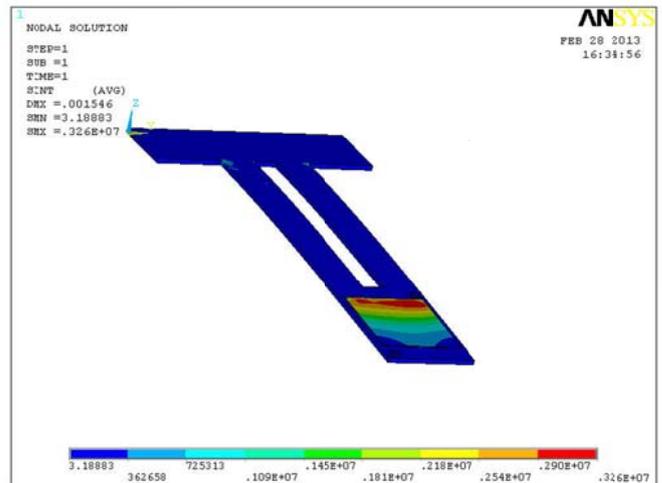
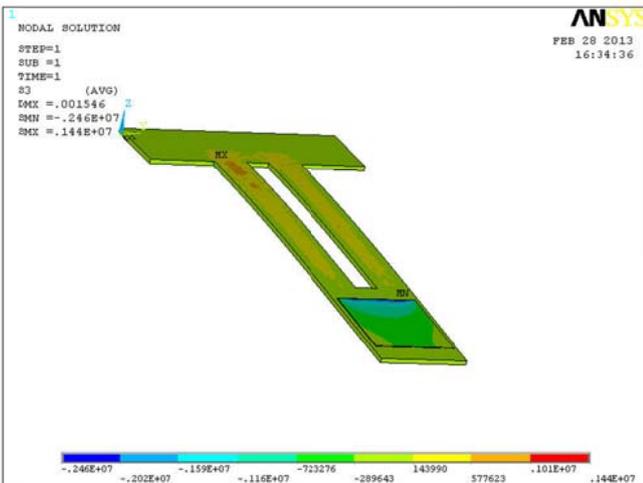
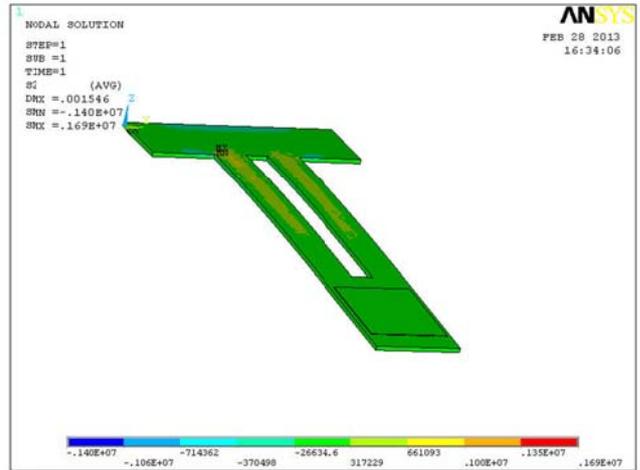
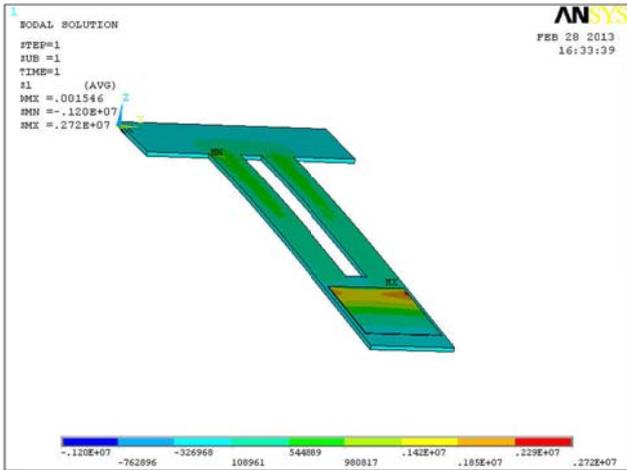
2.3.1. Poutre en pdms et aimant permanent d'une épaisseur de 2 μ m.





2.4. ETUDE DES CONTRAINTES :

Les figures suivantes donnent les contraintes exercées sur la poutre :



3. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons exposés les résultats de la simulation de la flèche, des contraintes et des modes propres de la poutre formée par le PDMS et l'aimant .nous avons constatés que la flèche dépend de l'intensité de l'induction magnétique et les propriétés élastique de l'ensemble PDMS aimant, ainsi que de la fréquence d'excitation de la bobine par rapport au mode de vibration (dans notre cas c'est le mode numéro 2).

Chapitre IV

Modélisation numérique du Micro-actionneur électromagnétique

4. Formulation en elements finis

4.1 INTRODUCTION

La méthode des éléments finis permet de résoudre un problème dont la solution analytique ne peut éventuellement pas être déterminée. Elle fournit une solution approchée de la solution exacte. Le milieu étudié est discrétisé en plusieurs éléments reliés entre eux par des nœuds. La géométrie d'un élément est caractérisée par un nombre fini de nœuds sur son périmètre. La résolution d'un problème par la méthode des éléments finis consiste à trouver les déplacements (par exemple les translations et les rotations) de ces nœuds. Le champ de déplacement en tout point est déterminé par interpolation entre les valeurs déterminées aux nœuds. L'interpolation est basée sur l'utilisation de fonctions de formes.

4.2 PRINCIPE DES ÉLÉMENTS FINIS

Pour un problème de mécanique en élasticité, le principe des travaux virtuels s'écrit en un point M d'un domaine V chargé par des efforts volumiques f et des efforts F sur une partie du bord $\partial\Omega$

$$\int_{\Omega} \vec{f}(M) \cdot \vec{u}(M) dV + \int_{\Omega} \vec{F}(M) \cdot \vec{u}(M) dS - \int_{\Omega} \underline{\sigma} : \underline{\varepsilon}^* dV = 0$$

Pour le champ de déplacement u^* . La structure étudiée est discrétisée en un ensemble d'éléments : le maillage. Chaque élément possède n nœuds. La résolution du problème se base sur l'interpolation du champ de déplacement de chaque élément suivant la forme :

$$\vec{u}(M) = \begin{bmatrix} u(M) \\ v(M) \\ w(M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \dots & \dots & \dots & \varphi_{1(3n)} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} & \dots & \dots & \dots & \varphi_{2(3n)} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} & \dots & \dots & \dots & \varphi_{3(3n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = [\varphi][u]$$

Les fonctions φ_{ij} sont les fonctions de forme. Le tenseur de déformation s'obtient par les équations de la cinématique pour s'écrire sous la forme :

$$[\varepsilon(\vec{u}(M))] = [\delta][u]$$

Ou $[\delta]$ désigne la matrice des dérivées des fonctions de forme.

Enfin, le tenseur des contraintes s'obtient grâce à la loi de comportement sous la forme :

$$[E] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Pour un matériau élastique isotrope de module d'Young E et de coefficient de Poisson ν ,
Finalement, le principe des travaux virtuels s'écrit :

$$\left(\int_{\Omega} [f_{int}][\varphi] dV + \int_{\partial\Omega} [f_{ext}][\varphi] dS \right) [u] - [u]^t \left(\int_{\Omega} [\delta]^t [E][\delta] dV \right) [u] = 0$$

En considérant que ce principe doit être vérifié pour tout $[u]$ et en introduisant la matrice de raideur :

$$K = \int_{\Omega} [\delta]^t [E][\delta] dV$$

Et le vecteur des efforts :

$$F = \int_{\Omega} [f_{int}][\varphi] dV + \int_{\partial\Omega} [f_{ext}][\varphi] dS$$

Le principe des travaux virtuels se réduit au système :

$$KU = F$$

Le problème est résolu par inversion du système. A partir du champ de déplacement, le champ de déformation est calculé avec la relation (4.1), puis le champ de contrainte est calculé avec la relation (4.2).

4.3 Etapes de la résolution d'un problème

1. Définition de la géométrie de la structure étudiée
2. Maillage de la structure (discrétisation en éléments) – génération de la table de connectivité entre les éléments
3. Définition du modèle associé à la structure.
4. Choix des paramètres du modèles (deux pour un matériau élastique isotrope).
5. Construction de la matrice de raideur globale par assemblage des matrices de raideur locales des éléments en fonction de la table de connectivité.
6. Construction du vecteur effort global par assemblage des vecteurs d'effort locaux suivant la table e connectivité.
7. Prise en compte des conditions aux limites.
8. Prise en compte du chargement.
9. Résolution du système pour obtenir les déplacements nodaux des éléments.
10. Traitement du résultat (calcul des déformations, calcul des contraintes).

4.4 Assemblage de la matrice de raideur et du vecteur efforts globaux :

Pour l'élément 1-2 ; les grandeurs locales s'écrivent :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

Dans le système global, et les nœuds i et j dans la table de connectivité :

$$K = K + \begin{bmatrix} \ddots & & & & & \\ & \dots & & & & \\ & & K_{ii} & & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & K_{ij} & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & \dots \end{bmatrix}$$

4.5 Application à l'étude d'une poutre sollicitée en flexion :

4.5.1 Description du problème

Nous illustrons la méthode des éléments finis à la résolution d'un problème de résistance des matériaux classique, une poutre encastree sollicitée en flexion.

Le matériau est un silicium de module d'élasticité $E= 160$ GPa. La section de la poutre est rectangulaire,

de largeur $w=10 \mu\text{m}$ et de hauteur $t=1\mu\text{m}$. sa longueur est $l=100\mu\text{m}$. le chargement est un effort ponctuel de $f=1\text{N}$, appliqué à l'extrémité droite de la poutre.

Pour ce problème de flexion simple, nous utilisons une discrétisation éléments finis de type d'Euler-Bernoulli.

Nous comparerons la déformée de la solution calculée avec celle de la solution exacte qui s'écrit :

$$v(x) = \frac{F}{EI} \left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right)$$

4.5.2 construction de la matrice de raideur locale

L'élément utilisé pour la résolution du problème est un élément poutre à deux nœuds, comportant deux degrés de liberté par nœud, un déplacement vertical et une rotation.

4.5.2.1 Fonctions de forme

Pour un problème de poutre en flexion, dont la déformée est un polynome de degré trois, on propose la fonction d'interpolation suivante :

Les constantes a_0, a_1, a_2 et a_3 sont obtenues en fonction de la valeur des degrés de liberté aux nœuds 1 et 2 ; soient v_1, θ_1 et v_2, θ_2 :

$$\begin{aligned} v(0) &= v_1 & v'(0) &= \theta_1 \\ v(l) &= v_2 & v'(l) &= \theta_2 \end{aligned}$$

Ces quatre conditions permettent d'écrire le système de quatre équations à quatre inconnues, permettant de calculer les constantes a_0, a_1, a_2 et a_3 :

$$\begin{aligned} a_0 &= v_1 \\ a_1 &= \theta_1 \\ a_0 + a_1 l + a_2 l^2 + a_3 l^3 &= v_2 \\ a_1 + 2a_2 l + 3a_3 l^2 &= \theta_2 \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{aligned} a_0 &= v_1 & a_1 &= \theta_1 \\ a_2 &= 3 \frac{v_2 - v_1}{l^2} - \frac{2\theta_2 - \theta_1}{l} \end{aligned}$$

$$a_2 = 2 \frac{v_1 - v_2}{l^3} - \frac{\theta_2 + \theta_1}{l^2}$$

La fonction d'interpolation s'écrit finalement :

$$\begin{aligned} v(x) &= v_1 + \theta_1 x + \left(3 \frac{v_2 - v_1}{l^2} - \frac{2\theta_1 + \theta_2}{l}\right) x^2 + \left(2 \frac{v_1 - v_2}{l^3} + \frac{\theta_1 + \theta_2}{l^2}\right) x^3 \\ &= \left(1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3}\right) v_1 + \left(x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2}\right) \theta_1 + \left(\frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3}\right) v_2 + \left(-\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2}\right) \theta_2 \end{aligned}$$

Sous forme matricielle, nous voyons apparaître les fonctions de formes φ :

$$\begin{bmatrix} v(x) \\ \theta(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} & x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} & \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} & -\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \\ -\frac{6x}{l^2} + \frac{6x^2}{l^3} & 1 - \frac{4x}{l} + \frac{3x^2}{l^2} & \frac{6x}{l^2} - \frac{6x^2}{l^3} & -\frac{2x}{l} + \frac{3x^2}{l^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = [\varphi][u]$$

Le calcul de la déformation repose sur l'hypothèse d'Euler-Bernoulli :

$$[\varepsilon] = \varepsilon_{11} = -\frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} y$$

Et l'écriture sous forme matricielle donne :

$$[\varepsilon] = -y \begin{bmatrix} -\frac{6}{l^2} + \frac{12x}{l^3} - \frac{4}{l} + \frac{6x}{l^2} & \frac{6}{l^2} - \frac{12x}{l^3} - \frac{2}{l} + \frac{6x}{l^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

La relation de comportement est réduite à :

$$[\sigma] = [E] [\varepsilon] = E [\varepsilon]$$

4.5.2.2 Construction de la matrice de raideur locale :

Les termes de la matrice de raideur locale se calcule à partir de l'expression (4.3) :

$$K = \int_{\Omega} [\delta]^t [E] [\delta] dV$$

$$= \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ (Sym) & & K_{33} & K_{34} \\ & & & K_{44} \end{bmatrix}$$

Les différents termes étant :

$$\begin{aligned} K_{11} &= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^l y^2 \left(-\frac{6}{l^2} + \frac{12x}{l^3} \right) dx dy dz \\ &= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dy dz \int_0^l \left(\frac{36}{l^4} + \frac{144x}{l^5} + \frac{144x^2}{l^6} \right) dx \\ &= EI \left[\frac{36x}{l^4} - \frac{72x^2}{l^5} + \frac{48x^3}{l^6} \right]_0^l = \frac{12EI}{l^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{12} &= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^l y^2 \left(-\frac{6}{l^2} + \frac{12x}{l^3} \right) dx dy dz \\ &= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dy dz \int_0^l \left(\frac{24}{l^3} + \frac{84x}{l^4} + \frac{72x^2}{l^5} \right) dx \\ &= EI \left[\frac{24x}{l^3} - \frac{42x^2}{l^4} + \frac{24x^3}{l^5} \right]_0^l \\ &= \frac{6EI}{l^2} \end{aligned}$$

$$K_{13} = -K_{11} = \frac{12EI}{l^3}$$

$$\begin{aligned} K_{14} &= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^l y^2 \left(-\frac{6}{l^2} + \frac{12x}{l^3} \right) \left(-\frac{2}{l} + \frac{6x}{l^2} \right) dx dy dz \\ &= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dy dz \int_0^l \left(\frac{12}{l^3} + \frac{60x}{l^4} + \frac{72x^2}{l^5} \right) dx \\ &= EI \left[\frac{12x}{l^3} - \frac{30x^2}{l^4} + \frac{24x^3}{l^5} \right]_0^l = \frac{6EI}{l^2} \end{aligned}$$

$$K_{22} = E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^l y^2 \left(-\frac{4}{l} + \frac{6}{l^2} \right)^2 dx dy dz$$

$$= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dydz \int_0^l \left(\frac{16}{l^2} + \frac{48x}{l^3} + \frac{36x^2}{l^4} \right) dx$$

$$= EI \left[\frac{16x}{l^2} - \frac{24x^2}{l^3} + \frac{12x^3}{l^4} \right]_0^l = \frac{4EI}{l}$$

$$K_{23} = -K_{12} = -\frac{6EI}{l^2}$$

$$K_{24} = E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^l y^2 \left(-\frac{4}{l} + \frac{6x}{l^2} \right) \left(-\frac{2}{l} + \frac{6x}{l^2} \right) dx dy dz$$

$$= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dydz \int_0^l \left(\frac{8}{l^2} - \frac{36x}{l^3} + \frac{36x^2}{l^4} \right) dx$$

$$= EI \left[\frac{8x}{l^2} - \frac{18x^2}{l^3} + \frac{12x^3}{l^4} \right]_0^l = \frac{2EI}{l}$$

$$K_{33} = -K_{11} = \frac{12EI}{l^3}$$

$$K_{34} = -K_{14} = -\frac{6EI}{l^2}$$

$$K_{44} = E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^l y^2 \left(-\frac{2}{l} + \frac{6x}{l^2} \right)^2 dx dy dz$$

$$= E \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 dydz \int_0^l \left(\frac{4}{l^2} + \frac{24x}{l^3} + \frac{36x^2}{l^4} \right) dx$$

$$= EI \left[\frac{4x}{l^2} - \frac{12x^2}{l^3} + \frac{12x^3}{l^4} \right]_0^l = \frac{4EI}{l}$$

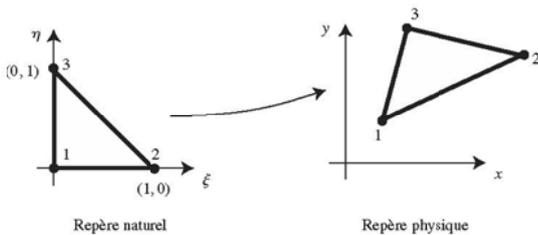
La matrice de raideur pour l'élément poutre est :

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} 12 \frac{EI_{ij}}{l^3_{ij}} & 6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} & -12 \frac{EI_{ij}}{l^3_{ij}} & 6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} \\ 6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} & 4 \frac{EI_{ij}}{l_{ij}} & -6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} & 2 \frac{EI_{ij}}{l_{ij}} \\ -12 \frac{EI_{ij}}{l^3_{ij}} & -6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} & 12 \frac{EI_{ij}}{l^3_{ij}} & -6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} \\ 6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} & 2 \frac{EI_{ij}}{l_{ij}} & -6 \frac{EI_{ij}}{l^2_{ij}} & 4 \frac{EI_{ij}}{l_{ij}} \end{bmatrix}$$

4.6 Les éléments isoparamétriques

Les éléments isoparamétriques reposent sur l'utilisation d'un changement de repère entre deux systèmes de coordonnées. Ils permettent l'écriture unique des fonctions de forme pour un type d'élément. Les fonctions de formes s'écrivent dans le repère naturel (ξ, η, ζ) , le problème de référence s'écrivent dans le repère physique (x, y, z) . La transformation géométrique pour passer d'un repère à un autre utilise les fonctions de forme de l'élément. Ainsi, pour un élément à n nœuds,

$$x = \sum_{i=1}^n \varphi_i (\xi, \eta, \zeta) x_i \quad , \quad y = \sum_{i=1}^n \varphi_i (\xi, \eta, \zeta) y_i \quad , \quad z = \sum_{i=1}^n \varphi_i (\xi, \eta, \zeta) z_i$$



4.7 Fonctions de forme des éléments isoparamétriques courants

4.7.1 Élément barre à deux nœuds :

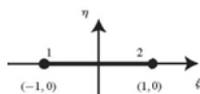


Figure 7.3

$\varphi_1(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(1 - \xi)$	$\varphi_2(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(1 + \xi)$
---	---

4.7.2 Élément barre à trois nœuds :

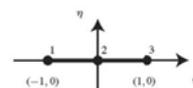


Figure 7.4

$\varphi_1(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(\xi^2 - \xi)$	$\varphi_2(\xi, \eta) = (1 - \xi^2)$
$\varphi_3(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(\xi^2 + \xi)$	

4.7.3 Elément triangulaire à trois nœuds :

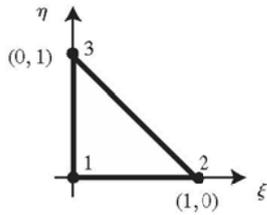
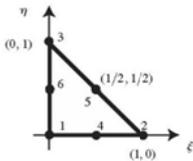


Figure 7.5

4.7.4 |

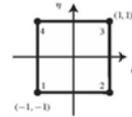
$\varphi_1(\xi, \eta) = 1 - \xi - \eta$	$\varphi_2(\xi, \eta) = \xi$
$\varphi_3(\xi, \eta) = \eta$	

 ids



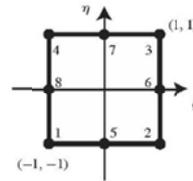
$\varphi_1(\xi, \eta) = (1 - \xi - \eta)(1 - 2\xi - 2\eta)$	$\varphi_2(\xi, \eta) = \xi(2\xi - 1)$
$\varphi_3(\xi, \eta) = \eta(2\eta - 1)$	$\varphi_4(\xi, \eta) = 4\xi(1 - \xi - \eta)$
$\varphi_5(\xi, \eta) = 4\xi\eta$	$\varphi_6(\xi, \eta) = 4\eta(1 - \xi - \eta)$

4.7.5 Elément quadrangulaire à quatre nœuds



$\varphi_1(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)$	$\varphi_2(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)$
$\varphi_3(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)$	$\varphi_4(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)$

4.7.6 Elément quadrangulaire à huit nœuds



$\varphi_1(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(-1 - \xi - \eta)$	$\varphi_2(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)(-1 + \xi - \eta)$
$\varphi_3(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)(-1 + \xi + \eta)$	$\varphi_4(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)(-1 - \xi + \eta)$
$\varphi_5(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 - \eta)$	$\varphi_6(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(1 + \xi)(1 - \eta^2)$
$\varphi_7(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta)$	$\varphi_8(\xi, \eta) = \frac{1}{2}(1 - \xi)(1 - \eta^2)$

4.5.3 Implantation et résolution dans matlab :

Le programme permettant la résolution du problème est l'annexe PRG.

Comme attendu, la solution éléments finis aux nœuds de chaque élément est exacte : la fonction d'interpolation est en effet du degré polynomial de la déformée. La comparaison entre la solution exacte et la solution numérique obtenue avec cinq éléments est représentée ci-dessous.

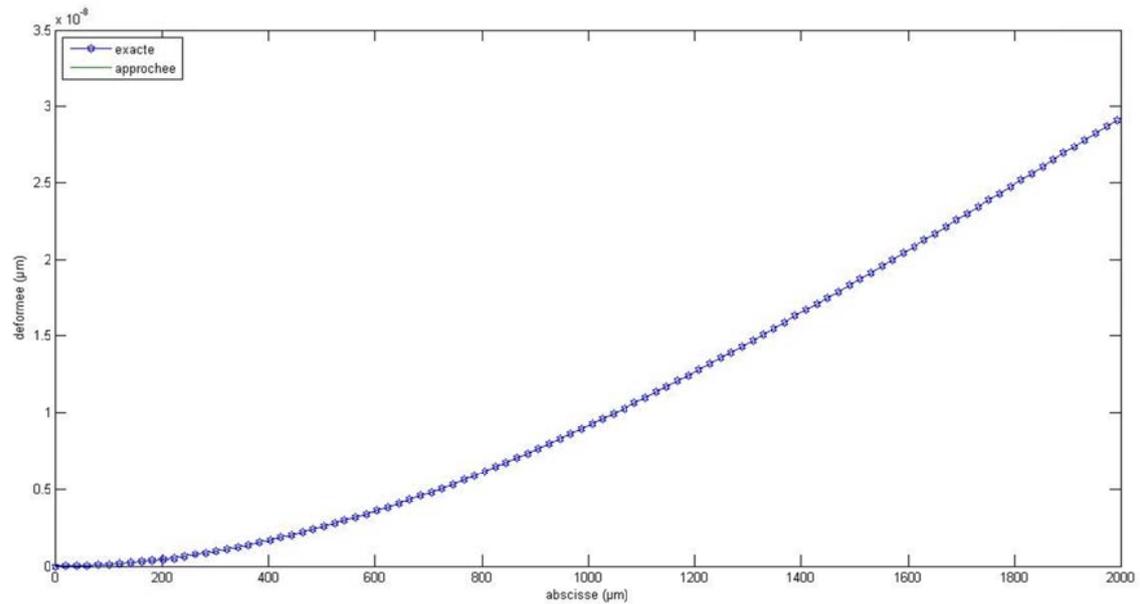
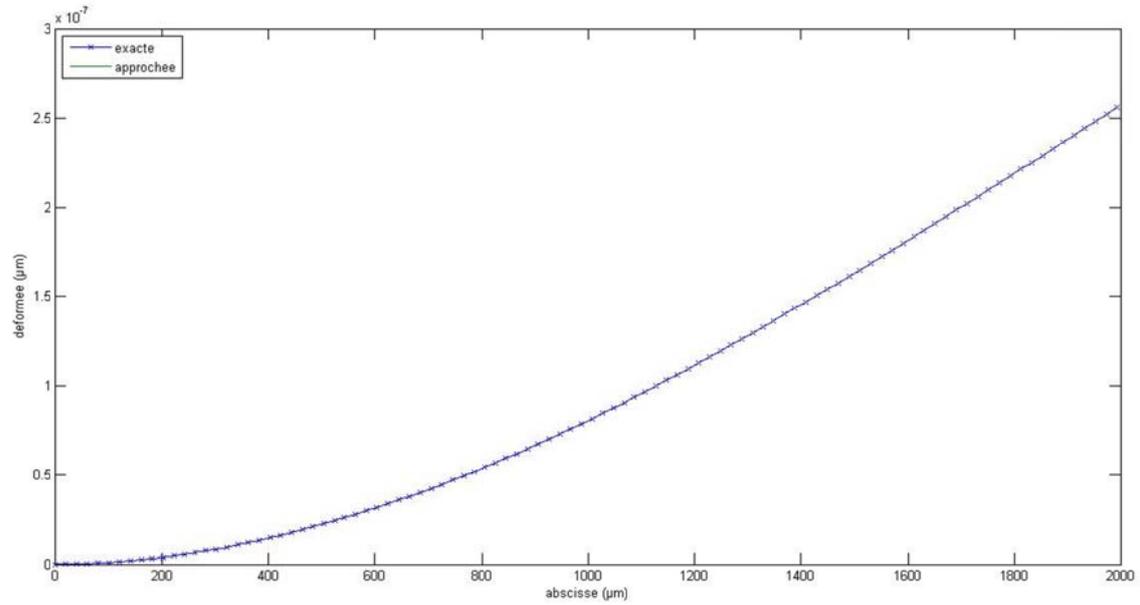


Figure 2 : la flexion d'un poutre de longueur $L = 200\mu\text{m}$, $E = 150 \text{ GPa}$, $b = 100\mu\text{m}$ et $h = 20\mu\text{m}$

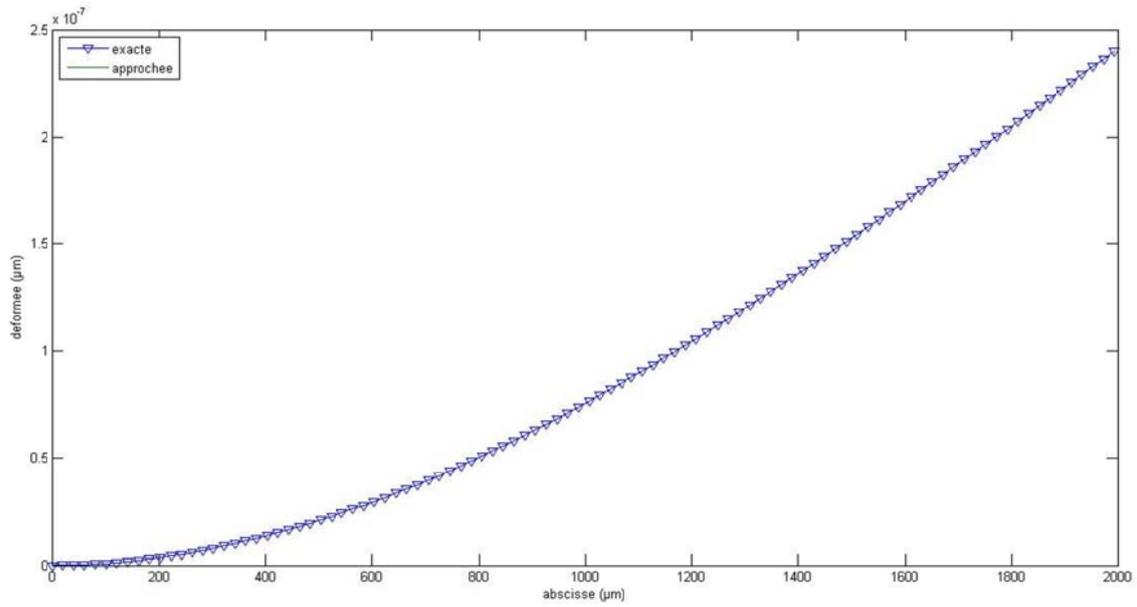


Figure 3: la flexion d'un poutre de longueur $L = 200\mu\text{m}$, $E= 150\text{ GPa}$, $b= 100\mu\text{m}$ et $h = 60\mu\text{m}$

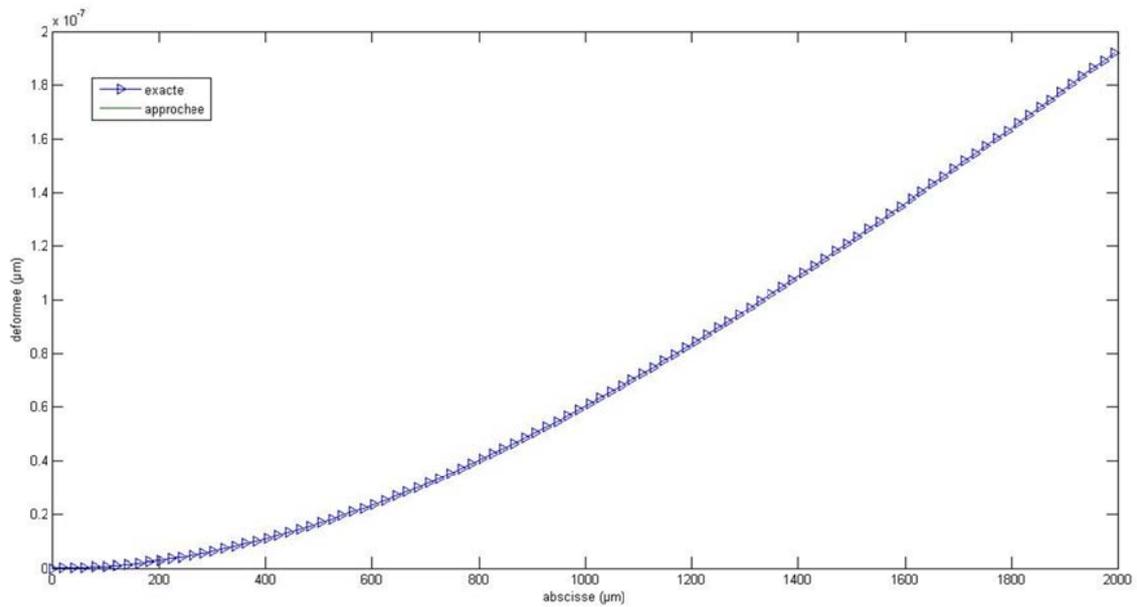
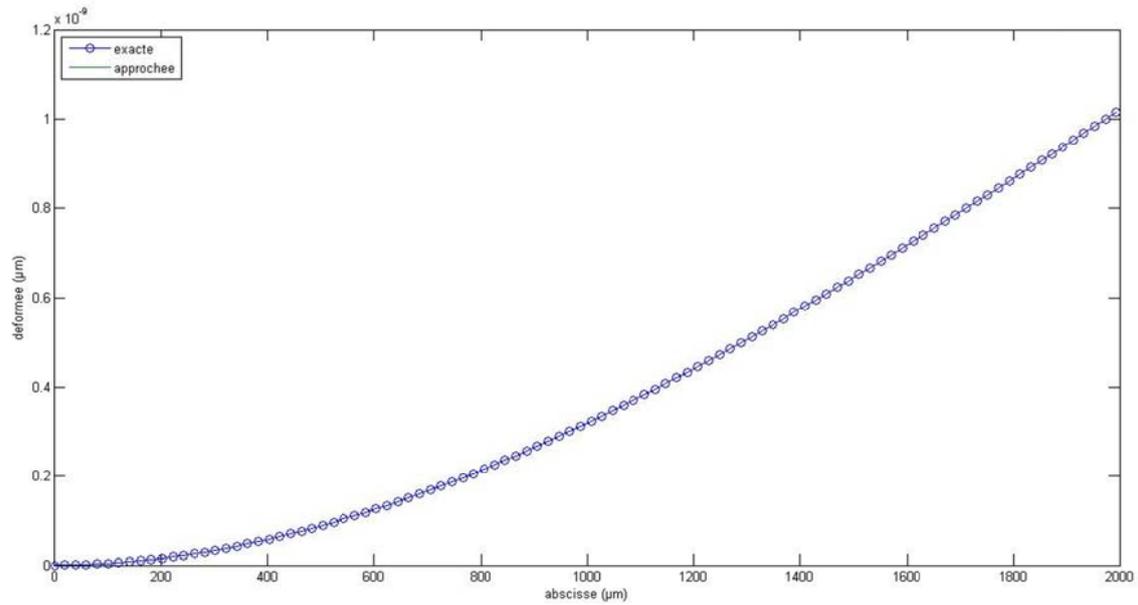


Figure 4 : la flexion d'un poutre de longueur $L = 200\mu\text{m}$, $E= 160\text{ GPa}$, $b= 100\mu\text{m}$ et $h = 10\mu\text{m}$



4.8 Conclusion

D'après les résultats obtenus par Matlab nous concluons d'après les courbes obtenues que la solution analytique et la solution rapprochées sont parfaitement les mêmes malgré que théoriquement ne l'est pas et ceci grâce à la puissance du calcul par les éléments finis.

4.9 Simulation du micro-actionneur par Ansys

4.9.1 introduction

Dans la partie précédente, nous avons simulé seulement le phénomène mécaniquement parlant c'est-à-dire la flexion de la poutre sans prendre en considération la nature de la force. Dans cette partie de ce chapitre, Nous allons présenter la solution tout en donnant à la force sa nature électromagnétique. Pour cela nous avons utilisé le logiciel *Ansys v.10*. *Nous allons procéder de différentes manières en changeant le champs coercitif de l'aimant ou bien variant l'entrefer entre la bobine planaire et la poutre.*

4.9.2 présentation du logiciel et Phases de simulation :

4.9.2.1 Preprocesseur :

Dans cette phase on commence par la description de la géométrie et l'introduction des propriétés des matériaux de notre micro-actionneur, puis vient la discrétisation (maillage) de la structure en éléments finis. Cette opération demande le choix d'un élément de maillage adéquat qui est dans notre cas l'élément plane53.

4.9.2.2 Processeur de calcul :

Dans cette partie, on choisit le type d'analyse, on applique les conditions aux limites (les surface d'encastrement,...) et les contraintes (force ou pression). Puis le processeur procède aux calculs des matrices élémentaires et réalise l'assemblage des éléments pour produire la matrice globale.

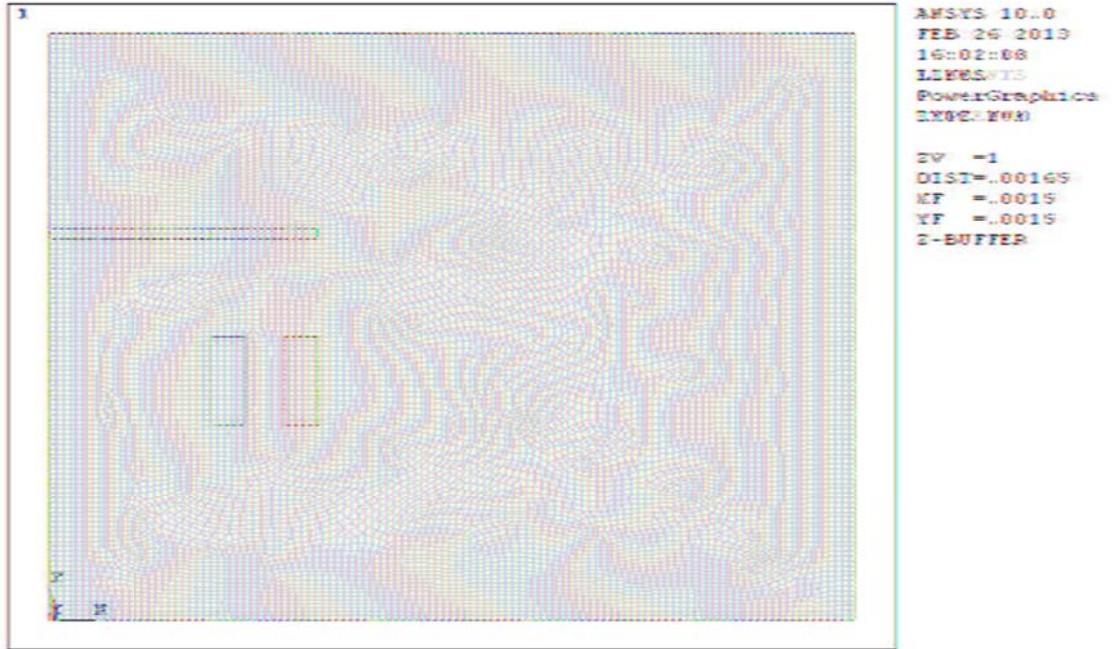
4.9.2.3 Postprocesseur :

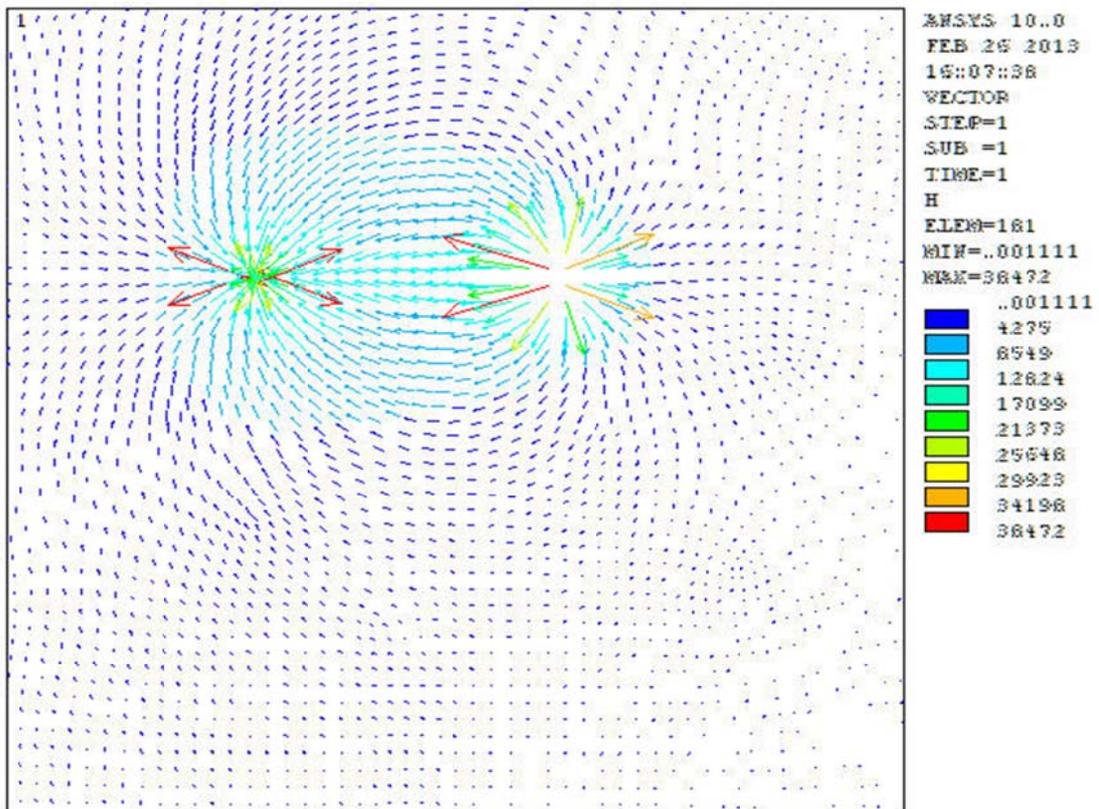
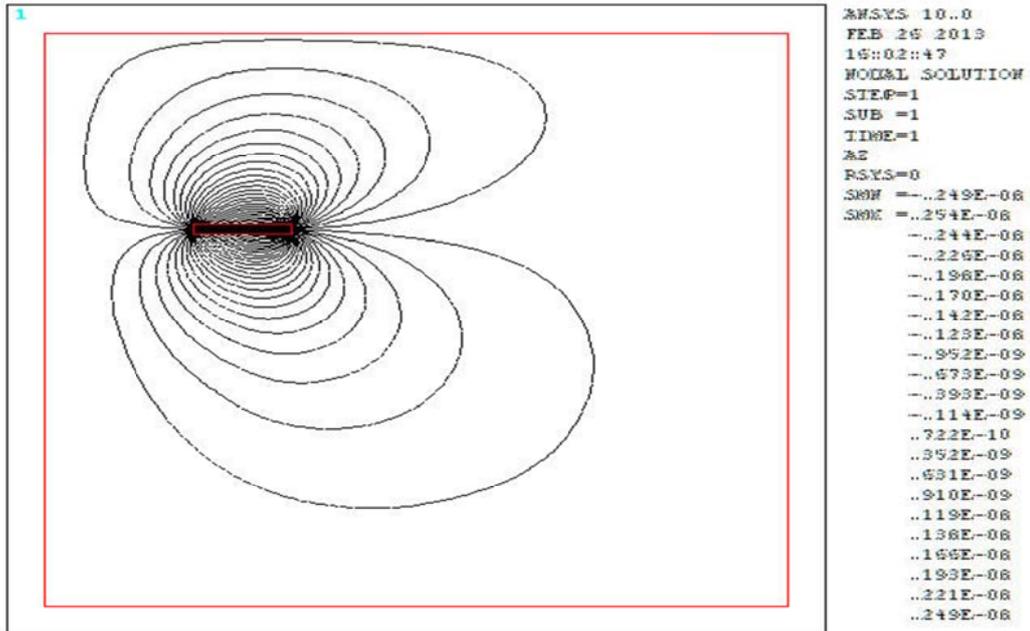
A la fin du calcul, le postprocesseur présente les résultats des différents paramètres du problème sous plusieurs formes (tableau, graphe, snapshot).

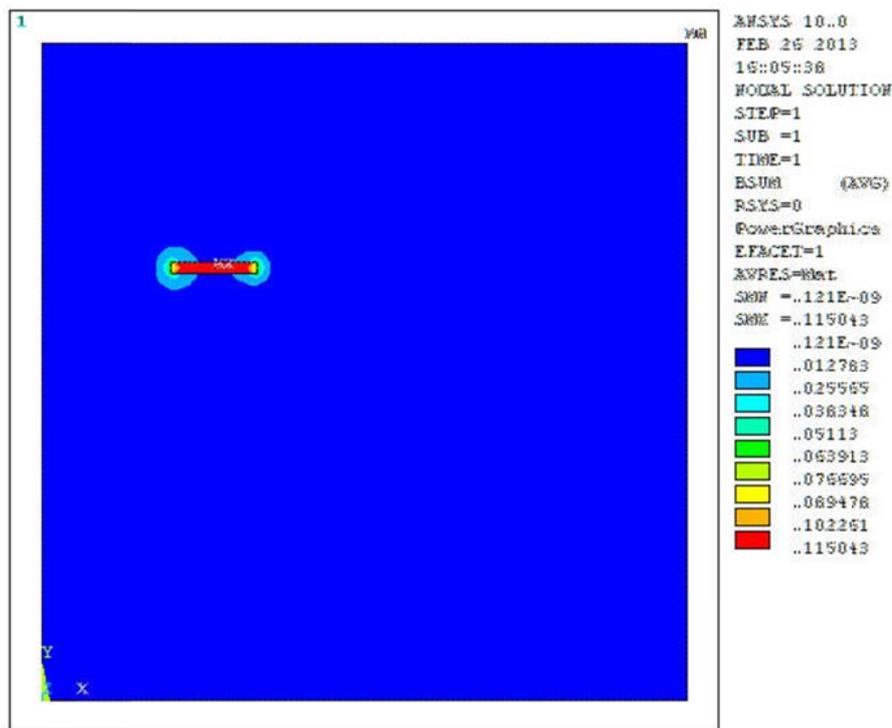
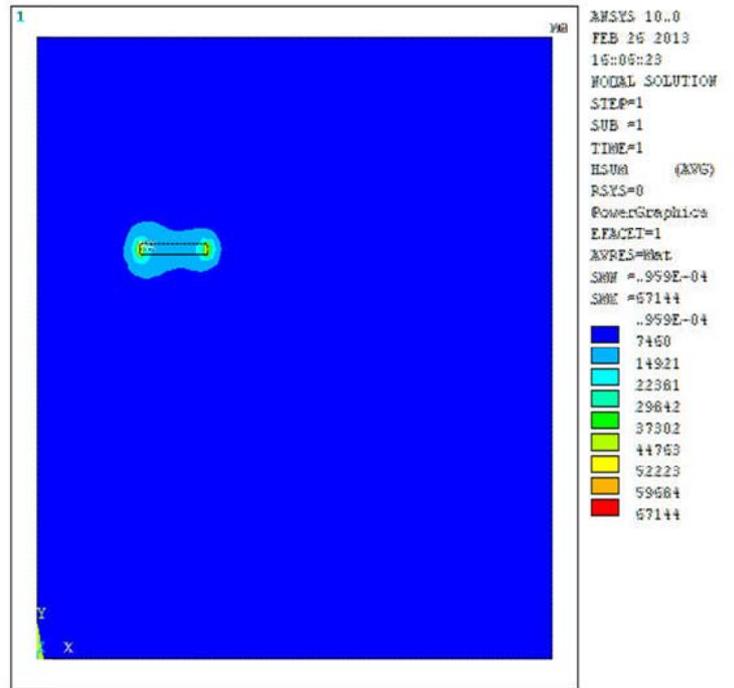
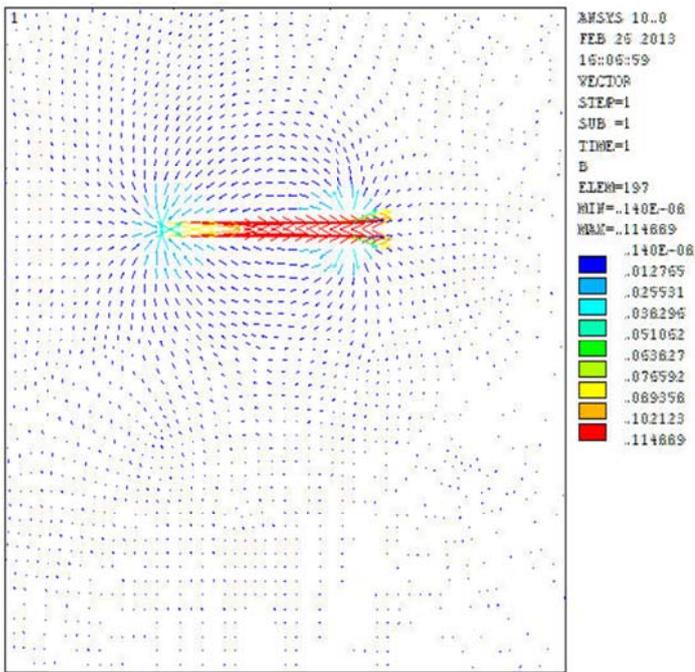
4.9.2.4 Maillage et éléments de maillage :

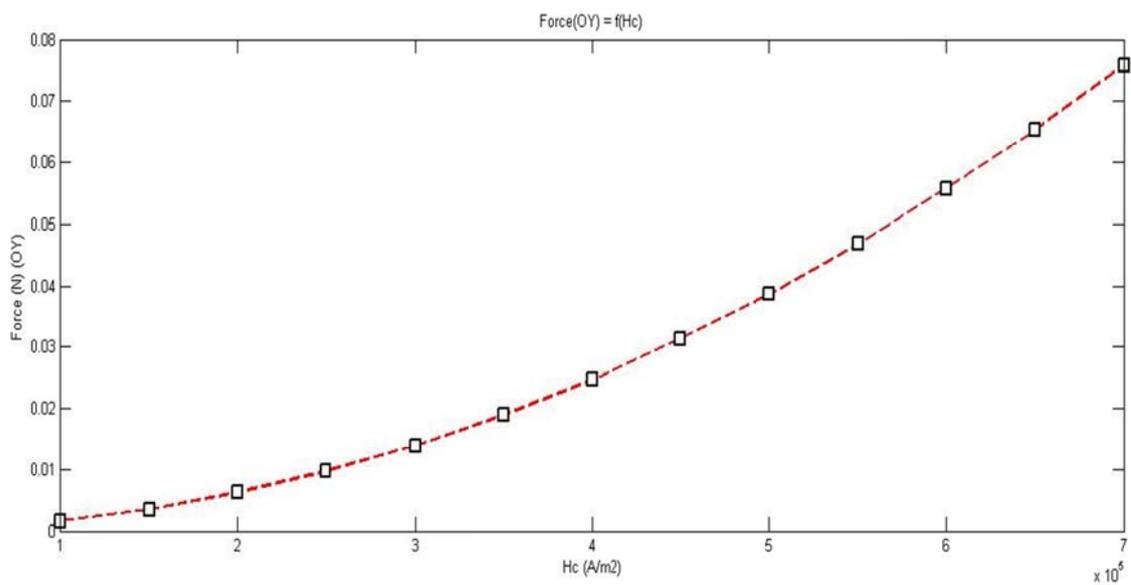
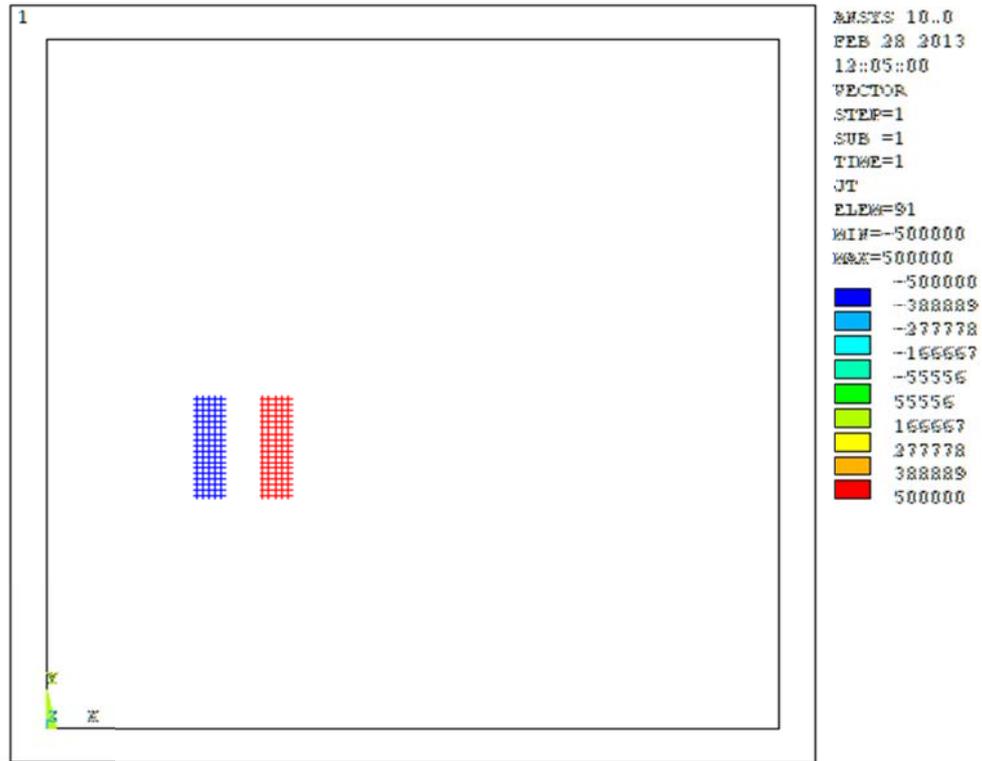
La discrétisation est une opération qui consiste à ramener la géométrie de la forme continue à une forme discontinue en la divisant à des éléments. L'opération très délicate et très difficile à réaliser ; car la finesse et l'exactitude de la solution du problème dépendent du degré de maillage de la structure.

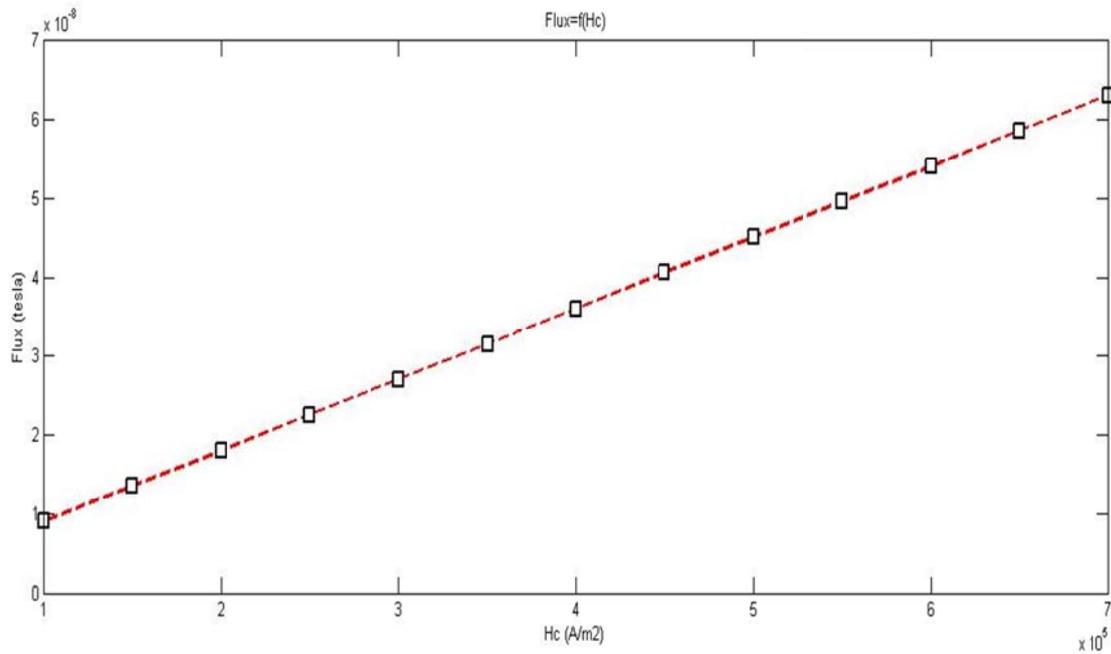
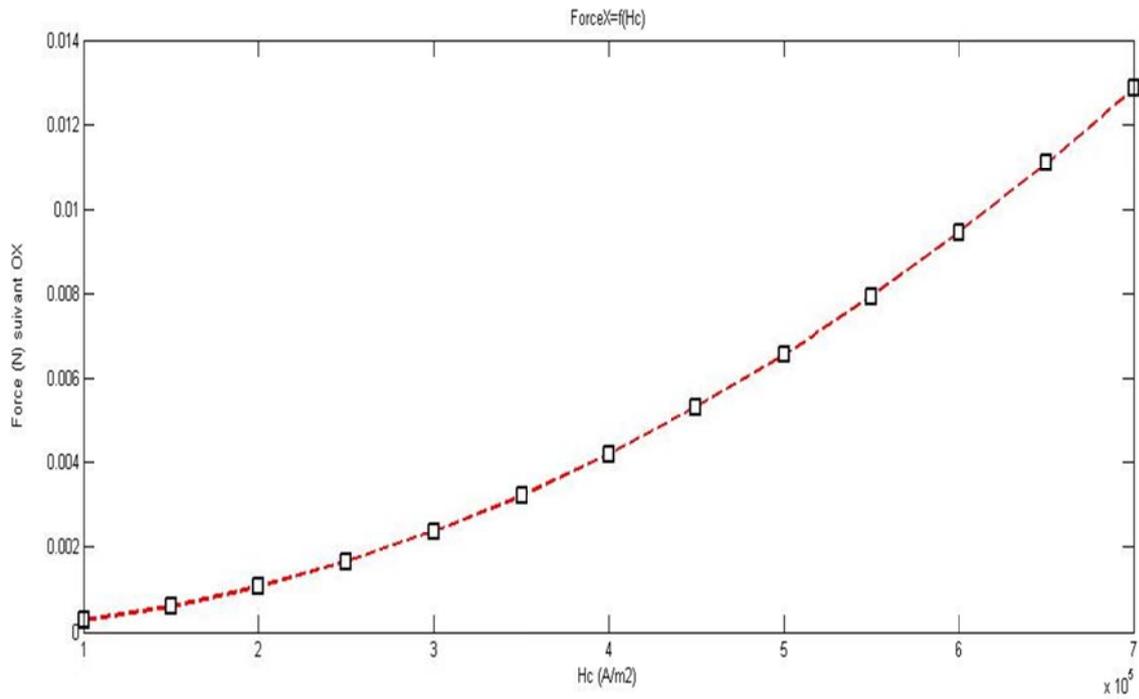
Les éléments de maillage sont les fondements élémentaires de la discrétisation de la structure. Pour notre cas, on a utilisé l'élément solid53 cet élément est tridimensionnel possède 10 nœuds, un déplacement quadratique ce qui lui permet de modéliser des maillages irréguliers. Il convient parfaitement à notre structure. Les figures suivantes présentent le maillage des structure en PDMS bloc, alliage bloc et alliage petit aimant

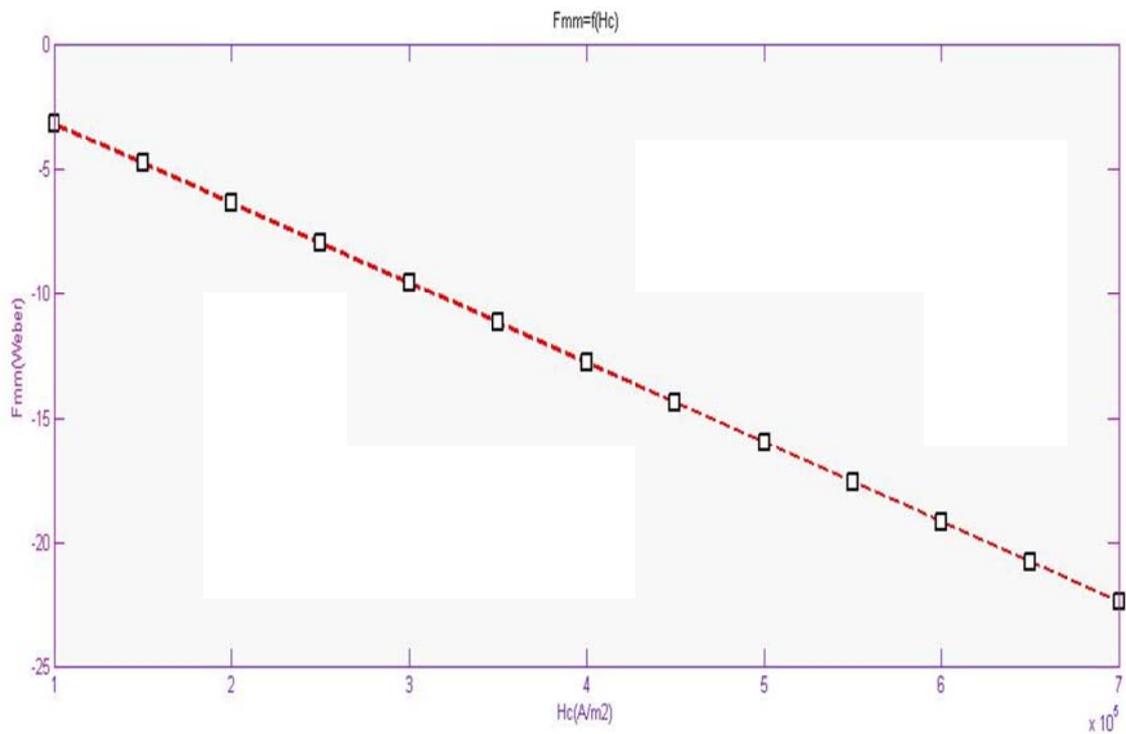
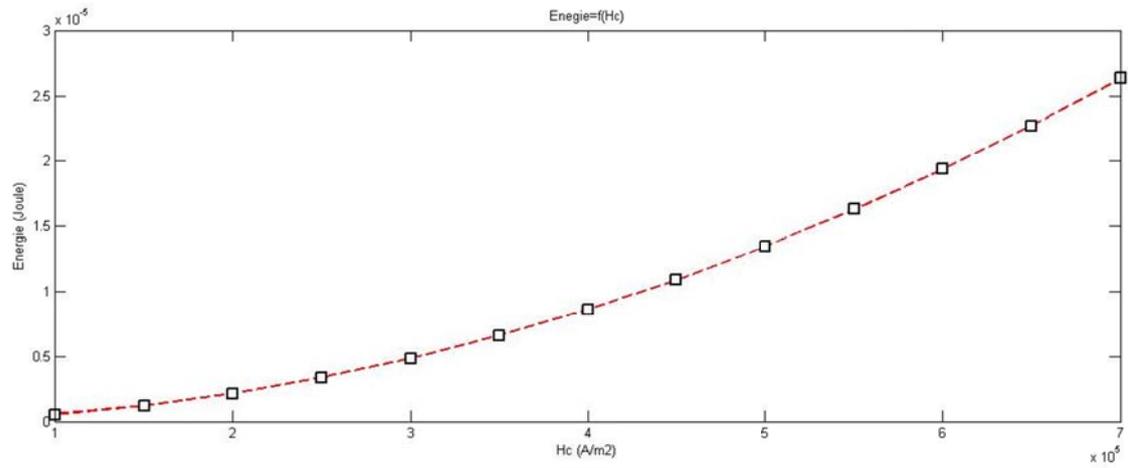












Conclusion Générale :

Dans ce mémoire, on a présenté des travaux de recherche sur la modélisation des micro-actionneurs électromagnétiques. Dans nos travaux de modélisation, nous avons privilégié l'approche analytique et donc paramétrique, l'avantage principale d'une telle méthode réside dans le pouvoir d'analyser rapidement les lois de variation en fonction des différents paramètres géométriques et physiques. En revanche ce type de modélisation présente un inconvénient, qui est de ne pouvoir prendre en compte simultanément l'ensemble des phénomènes physiques rencontrés. L'étude globale nécessite alors l'utilisation de logiciels de simulation par éléments finis, mais il convient d'indiquer ici que dans ce, la variation paramétriques du système deviennent plus difficiles à prendre en compte.

Pour terminer cet aspect de comparaison, Nous signalons ici que la caractérisation du comportement de ces structures (microsystèmes) à l'échelle micrométrique est un thème de recherche à part entière, car il ne s'agit pas de transposer ce qui est fait à plus grande échelle mais de développer des méthodes spécifiques.

Certains phénomènes physiques prennent une ampleur autre que celle observée dans le monde macroscopique (dans notre cas : le champ magnétique)

La modélisation d'un tel dispositif paraît insuffisante sans donner de l'importance à la contrainte liée aux procédés de fabrication qui sont intimement dépendant du choix du matériau adéquat pour une telle conception.

En effet, l'étude de la conception des micro-actionneurs ne peut être décorrelés des procédés de fabrication disponibles ainsi que le matériau utilisé.

L'étude des microsystèmes est un domaine pluridisciplinaire, elle présente un carrefour où des cultures scientifiques différentes doivent se rencontrer et apporter chacune sa participation.

Perspectives :

Par le moyen de recherche dans ce domaine (qu'on peut classer très récent dans notre pays) ; nous avons tenté de faire introduire quelques notions sur les microsystèmes par cette étude superficielle qui sera suivie par d'autres certainement plus profondes dans le but de réaliser les fondations de cette discipline dans nos universités.

Nous souhaitons qu'en Algérie, l'enseignement des microsystèmes sera programmé dans l'avenir pour les étudiants de la graduation comme un module de fin de cycle à cause de pluridisciplinarité. Nous souhaitons aussi qu'il y ait des investissements pour l'installation des salles blanches au niveau des universités afin de ne laisser les efforts et les travaux des étudiants chercheurs de l'encre sur papier.

Références Bibliographiques :

Livres :

- [1] *Nadim Maluf, Kirt Williams. An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering* Seconde Edition. 2004 ARTECH HOUSE, INC.
- [2] *S Beeby, G.Ensell, M.Kraft, N.White. MEMS Mechanical Sensors.* 2004 ARTECH HOUSE, INC.
- [3] *Héctor J. De Los Santos. Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems* Second Edition 2004 ARTECH HOUSE, INC.
- [4] *Silvia Bertoluzza, Silvia Falletta , Giovani Russo , Chi-Wang Shu* Numerical Solutions of Partial Differential Equations. 2009 Birkhäuser Verlag, P.O. Box 133, CH- 4010 Basel, Swizerland www. bikhauser.
- [5] *Robert H. Bishop. The Mechatronics HandBook* © 2002 by CRC Press LLC www. Crcpress.com
- [6] *Hiroshi Toshiyoshi. Comprehensive Microsystems Vol.02.* Elsevier -2005-
- [7] *Hiroshi Toshiyoshi. Comprehensive Microsystems Vol.01.* Elsevier -2005-
- [8] *Elena Gaura and Robert Newman. Smart MEMS and Sensor Systems* Copyright © 2006 by Imperial College Press.
- [9] *Vijay K. Varadan / K.J. Vinoy / S; Gopalakrishnan. Smart Material Systems and MEMS: Design and Development* methodologie. Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Ltd.
- [10] *Ki Bang Lee, Ph.D. principles of microelectromechanical systems.* John Wiley & Sons, Inc 2011
- [11] *S.Miyazaki, Y.Qing FU, W.Min Huang. Thin Film Shape Memory Alloys* Cambridge University Press 2009-
- [12] *Joachim frühauf. Shape and Functional Elements of the Bulk Silicon Microtechnique. A Manual of Wet-Etched silicon Structures.* © Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [13] *Piero Malcovati , Andrea Baschiroto , Arnaldo D' Amico , Corrado di Natale. Sensors and Microsystems.* © Springer Science + Business Media , BV 2010.
- [14] *Salvatore Baglio , Salvatore Castorina , Nicolo Savali. Scaling Issues and design of MEMS.* Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Ltd, the atrium, Southern Gate, Chichester, west Sussex PO19 8SQ , England.
- [15] *Warren C . Yong and Richard G. Budynas. Roark's Formulas for Stress and Strain. Seventh edition.* Copyright © 2002 , 1989 by the McGraw- Hill Companies, Inc.
- [16] *Héctor J. De Los Santos. Principles and Application of Nano MEMS Physics.* © 2005 Springer.
- [17] *R.G. Ballas. Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators. Static and Dynamic Behavior and aspect Integration.* © Springer – Verlag Berlin heidelberg 2007.
- [18] *Reza Ghodssi · Pinyen Lin. MEMS Materials and Processes Handbook.* Springer Science 2011
- [19] *Stephen D. Senturia; Microsystem Design.* © 2002 Kluwer Academic Publishers. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. Print © 2001 kluwer Academic Publisher Dordrecht.

- [20] *Danny Banks*; Microengineering, MEMS, and Interfacing. *A Practical Guide*. © 2006 by Taylor & Francis Group, LLC
- [21] *Sami Franssila*. Introduction to Microfabrication. Copyright © 2004 John Wiley & Sons Ltd.
- [20] *Michel Rappaz . Michel bellet . Michel Deville*. Numerical Modeling in Materials Science and Engineering. © Springer – Verlag Berlin heidelberg 2003 , First softcover printing 2010.
- [21] *Alberto Borboni .* Meso – To Micro – Actuators. *A Ttheoretical and Pratical Approach*.© 2008 by Taylor & Francis Group, LLC
- [22] *Hervé Fanet*. Micro et nano- électronique *Bases, Composants, Circuits*.© Dunod, Paris , 2006.
- [23] *M.Cyrot, M.Decorps, B.Dieny*. Magnétisme II-Matériaux et applications.EDP Sciences, 2000
- [24] *M.Cyrot, M.Decorps, B.Dieny*. Magnétisme I-Matériaux et applications.EDP Sciences, 2000
- [25] *A.R.Jha*, Ph.D. MEMS and Nanotechnology – Based Sensors and Devices for Communicatios, Medical and Aerospace Applications © 2008 by Taylor & Francis Group, LLC
- [26] *James J. Allen*. Micro Electro Mechanical System Design.© 2005 by Taylor & Francis Group, LLC
- [27] *A. PREUMONT*. Mechatronics : *Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*.© 2006 Springer
- [28] *Georg Pelz* Mechatronic Systems: *Modeling and Simulation with HDLs* Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Ltd.
- [29] *Robert H. Bishop*. *The Mechatronics Handbook. Second Edition*. Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators: *Fundamentals and Modeling*.© 2008 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [30] *Suman Chakraborty*. Mechanics Over Micro and Nano Scales.© Springer Science + Business Media , LLC 2011.
- [31] *Nicolae Lobontiu . Ephrahim Garcia* Mechanics of Microelectromechanical Systems. © 2005 Kluwer Academic Publishers Boston
- [32] *Werner Karl Schomburg* Introduction to Microsystem Design © Springer – Verlag Berlin heidelberg 2011.
- [33] *Héctor J. DE los Santos* Introduction To Microelectromechanical Microwave Systems. *Second Edition*.© 2004 Artech House, INC.
- [35]] *Bharat Bhushan*. Springer Handbook of Nanotechnology. Second edition. Springer.2007
- [36] *A.Hierlemann*. Integrated Chemical Microsensor Systems in CMOS Technology.© Springer – Verlag Berlin heidelberg 2005.
- [37] *Volker Kemp*. Inertial MEMS : *Principales and Practice*.© Cambridge university Press 2011.
- [38] *Jan Tichý , Jiří Erhart , Erwin Kittinger , Jana Přivratská*; Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: *Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials*.© Springer – Verlag Berlin heidelberg 2010.

- [39] *Vijay K. Varadan, K.J.Vinoy, S.Gopalakrishnan*. Smart Material Systems and MEMS: Design and development Methodologies. Copyright © 2006 John Wiley & Sons Ltd.
- [40] *Radostina Petrova* Finite Volume Method-Powerful Means Of Engineering Design. Copyright © 2012 Intech.
- [41] *Frederick A. Leckie / Dominic J. Dall Bello* . Strength and Stiffness of Engineering systems. Springer
- [42] *Yongke Sun / Scott E. Thomson / Toshikazu Nishida*. Strain Effect in Semiconductors . theory and Device Applications. © Springer Science + Business Media , LLC 2010
- [43] *C. Benoît*; "Modélisation de fautes et conception en vue du test structurel des Microsystèmes" , thèse de doctorat de l'INPG Grenoble, Mars 2001.
- [44] *C.M.Wang , J.N. Readdy and K.H. Lee*; Shear Deformable beams and plates. Relationships with classical Solutions. ©2000 ELSEVIER Science Ltd. All rights reserved.
- [45] *Jan G. Korvink , Olivier Paul*. MEMS : A Pratical Guide to Design, Analysis and Applications Copyright © 2006 by William Andrew, Inc.
- [46] *Stephen Beeby , Graham Ensell. Michael kraft. Neil White*. MEMS Mechanical Sensors. © 2004 Artech House, Inc.
- [47] *Edward P. Furlani*. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Academic Press 2001
- [48] *John R. Brauer*. Magnetic actuators and sensors. IEEE Press and John Wiley & Sons. 2006
- [49] *J.L. Leblanc*; "Propriétés mécaniques des polymères ". Cours du DEA « Chimie et Physicochimie des Polymères, Option Chimie ». Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). 2001

Thèses :

- [50] *Francisc Bölöni* .Contribution à la modélisation déterministe et stochastique du phénomène de pull-in dans les MEMS à actionnement électrostatique. Université Lille 1.-2010-
- [51] *DR.GUSTAVO ADOLFO ARDILA RODRIGUEZ*. Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique. -2008-
- [52] *Dr. Arnaud Walther*. Développement de couches magnétiques dures pour MEMS : application à un microswitch magnétique bistable . (CNRS) -2007-
- [53] *Florian H.ammerle*. Simulation and Characterization of a Miniaturized Planar Coil -2009-
- [54] *Gatien FLEURY*. Etude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable. -2006-
- [55] *Dr. ROSTAING Hervé*. conception, modelisation et fabrication d'un micro-actionneur bistable, hors plan et magnetique. -2004-
- [56] *Dr. Paolo MARTINS*. Caractérisation mécanique des matériaux pour les micro/nanosystèmes Procédés applicables aux épaisseurs submicroniques. -2009-

[57] *Dr. Fehmi NAJAR*. static and dynamic behaviors of mems microactuators. -2008-

[58] *Mohamed Belkacem*. Modélisation numérique d'un microactionneur composé d'un alliage de matériaux polymère et magnétique.. *These de Magistere*.-2009-

[59] *Dr. Mohamed Lamhamdi*. Développement d'outils d'analyse des matériaux pour l'étude du chargement des diélectriques. -2008- toulouse.

Journaux et articles:

[60] *O. Cugat, S. Basrour, C. Divoux, P. Mounaix, G. Reyne*; "Deformable magnetic mirror for adaptive optics: Technological aspects", -Sensors and Actuators A 89 (2001),

[61] *O. Cugat, G. Reyne, J. Delamare 1, H.Rostaing*. Novel magnetic micro-actuators and systems (MAGMAS) using permanent magnets. -Sensors and Actuators -2005-

[62] *Jean-Marie LE BRETON*.Techniques de l'ingénieurs- aimant permanent- article N° D 2100 v2

[63] *Jack W. Judy and Nosang Myung*. Magnetic Materials for MEMS. University of California, Los Angeles, CA, USA 2001

[64] *S. Mohan, Maria del Mar Hershenson, Stephen P. Boyd, and Thomas H. Lee*. Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances. IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 34, NO. 10, OCTOBER 1999