



Université de Batna  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'Electrotechnique

Mémoire de

Magistère en Electrotechnique

Option : *Matériaux Electrotechniques*

Présenté par :

**Mohamed BELKACEM**

D.E.S Physique

Option Electronique

Thème

**Modélisation numérique d'un microactionneur composé  
d'un alliage de matériaux polymère et magnétique**

Devant le Jury Composé de :

Mr. Azzedine	BENOUDJIT	Pr.	Université de Batna	Président
Mr. Samir	BENDIB	MC.	Université de Batna	Rapporteur
Mr. Rachid	SMAIL	MC.	Université de Batna	Co-Rapporteur
Mr. Fouad	KERROUR	MC.	Université de Constantine	Examineur
Mr. Abdelhamid	BENHAYA	MC.	Université de Batna	Examineur
Mr. Abdeljabar	BENSALAH	MC.	Université de Batna	Examineur

---

## RESUME

Le sujet de ce mémoire se situe dans le domaine de la microfluidique, qui nécessite souvent l'écoulement d'une infime quantité de liquide de taille inférieure à la dizaine de microns de litres ou des gouttes de solution biologique.

La course vers des systèmes rapides (quelques minutes), sensibles (très faibles concentrations) et portables, conduit à l'ère de la miniaturisation. Le remplacement de nos laboratoires biologiques par des microsystèmes automatisés, de taille ne dépassant pas quelques centimètres (Lab-on-chip, ou labo puce), est déjà une réalité.

D'habitude, avant de mettre sur marché ces dispositifs, nous devrions passer par des séries de mesures expérimentales très longues et plus coûteuses par la fabrication de prototypes. Il devient donc indispensable, de les concevoir et de les optimiser par des outils moins coûteux tels les méthodes numériques. L'approche numérique est complémentaire à l'expérience, puisqu'elle la rend plus ciblée et plus directe mais elle ne peut en aucun cas se substituer totalement à cette dernière.

C'est dans ce contexte que vient notre contribution dans la démarche générale de modélisation et de simulation des microactionneurs électromagnétique, formés d'alliage polymère-Permalloy que nous avons développé, basée sur la Méthode des Éléments Finis (MEF). La modélisation numérique effectuée dans ce mémoire est basée sur l'outil ANSYS®.

**Mots clés:** Polymère, Permalloy, microsystèmes, microactionneur électromagnétique,

**ABSTRACT**

The aim of this these, is deals with the microfluidic field, which most of the time requires the flooding of tiny quantities of liquid inferior in size to microns or to splits of biological solution.

Racing towards rapid and quick systems, sensible as well as holdable takes us to the era of miniaturization. The replacement of our biologic laboratories by automatised microsystems, for which the size is no more than few centimeters (lab-on-chip), is already a reality.

Before putting on the market these devices, we're accustomed to passing though a series of very long and costly experimental measures, by producing samples (prototypes). Indeed, conception and optimization of these items with less coasting and cheaper tools is indispensable use of numerical system. Numeric approach is complementary to the experiment, because it makes our achievement straight ahead, but cannot in any way totally substitute to experimentation.

It is in this context that our contribution to the general way of the modelisation and simulation of electromagnetic microactuators made of Polymer-Permalloy alliage developed in this study and based on the finite element method (F.E.M). The amelioration brought in this work, had been operated by the use of ANSYS.

**Keywords:** Polymer, Permalloy, electromagnetic, micro actuator.

# Dédicaces

*A mes parents;*

*Qui leur appartiennent toute de ma réussite, Que dieu les accueillent dans son vaste paradis.*

*Merci de m'avoir toujours conseillé, mais sans jamais rien m'imposer, c'est très formateur. Merci pour toutes les valeurs que vous m'avez apprises et l'éducation que vous m'avez donnée.*

*A ma petite famille;*

*Ma femme, qui a affectueusement partagé avec moi toutes les difficultés rencontrées au cours de ce mémoire. Son soutien moral était pour moi des plus importants.*

*Mes enfants:*

*Imen; Meriem; Khaled; Hamza, et le petit Abderrahim.*

*Pour leur patience, et encouragement.*

*A mes sœurs :*

*Ounassa, la plus chère; Rebaia;*

*A mes frères :*

*Arres, Sebti: Qu'ils trouvent ici l'expression de mes meilleurs sentiments .*

*Je dédie ce travail.*

# Remerciements

Je remercie le grand DIEU pour la force et la volonté qui m'a donné afin que je puisse achever ce mémoire.

A mon avis le travail et la vie de la personne qui le fait vont de paire, on ne peut pas les découpler. Car ce travail représente une étape de la vie de cette personne. Si ce mémoire est maintenant écrit, c'est grâce à beaucoup de gens, qui étaient à mes côtés. Et je voudrais les remercier ;

Je commence par mon encadreur Mr **Samir BENDIB**, Maître de conférence à l'université de BATNA, pour son aide et son expérience dont il m'a fait profiter durant la préparation de cette thèse. Son esprit ouvert, sa disponibilité m'ont permis d'amener ce travail à son but, je remercie aussi mon co-encadreur Mr. **SMAIL Rachid** Maître de conférence à l'université de BATNA.

Je tiens à remercier Mr **Azzedine BENNOUJIT** professeur à l'université de BATNA pour avoir accepté d'être le président de mon jury de thèse, ainsi qu'à tous les autres membres du jury Mrs: **Fouad KERROUR** Maître de conférence à l'université de CONSTANTINE, **Abdelhamid BENHAYA**, **Abdeljabar BENSALAH** Maîtres de conférence à l'université de BATNA qui m'ont honorés par leur présence, lus attentivement cette thèse et porté leurs commentaires constructifs sur mon travail.

Je tiens à remercier très chaleureusement Mr **Mohamed KADJOUJ** professeur à l'université de BATNA pour ses discussions si enrichissantes. Je voudrais remercier tous ceux qui ont participé à mon éducation depuis mon enfance. Un salut fraternel à l'ensemble des étudiants de la promotion.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>ABREVIATIONS ET LISTE DES SYMBOLES</b>	1
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	2
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; margin: 0 auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center; margin: 0;"><b>CHAPITRE I</b></p> <p style="text-align: center; margin: 0;"><b>ETAT DE L'ART DES MICROSYSTEMES ET PROBLEMATIQUE</b></p> </div>	
<b>I.1. INTRODUCTION</b>	6
<b>I.2. MINIATURISATION</b>	6
<b>I.3. MICROSYSTEMES</b>	7
I.3.1. Définitions et variantes	8
I.3.2. Fonctions d'un microsysteme	9
I.3.3. Historique des microsystemes	10
I.3.4. Avantages et limites des microsystemes	12
I.3.4.1. Avantages	12
I.3.4.2. Limites	13
I.3.5. Classification et applications	13
I.3.5.1. Microsystemes radio fréquence (MEMS-RF)	14
I.3.5.2. Microsystemes pour l'optique (MOEMS)	15
I.3.5.3. Microsystemes biologiques (BIO-MEMS)	15
I.3.5.4. Capteurs et actionneurs	17
I.3.6. Technologies microsystemes	19
I.3.6.1. Microusinage en volume ('bulk micromachining')	20
I.3.6.2. Microusinage en surface	20
I.3.7. Différents types d'actionnement dans les microsystemes	21
I.3.7.1. Actionnement électrostatique	21
I.3.7.2. Actionnement électrothermique	21
I.3.7.3. Actionnement magnétostriction	22
I.3.7.4. Actionnement piézoélectrique	23
I.3.7.5. Actionnement à alliage a mémoire de forme (AMF)	23
I.3.7.6. Actionnement électromagnétique	24
<b>I.4. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE L'ETUDE</b>	27
I.4.1. Description de l'actionneur et la structure à étudier	27
I.4.2. Force magnétique	28

I.4.3. Analyse qualitative du microactionneur	30
<b>I.5. CONCLUSION</b>	<b>31</b>

## CHAPITRE II

### SYNTHESE SUR LES PROPRIETES MAGNETOMECHANIQUES DES MATERIAUX

<b>II.1. INTRODUCTION</b>	<b>33</b>
<b>II.2. GENERALITES SUR LES MATERIAUX POLYMERES</b>	<b>33</b>
II.2.1. Pourquoi les polymères?	33
II.2.2. Monomère et Polymère	34
II.2.3. Classification des différents matériaux	34
II.2.4. Différentes structures des polymères	34
II.2.5. Classification des polymères	36
II.2.5.1. Classification selon l'usage	36
II.2.5.2. Classification selon les propriétés thermomécaniques	36
<b>II.3. PROPRIETES DES MATERIAUX POLYMERES</b>	<b>36</b>
II.3.1. La transition vitreuse	36
II.3.2. Propriétés mécaniques et comportements élastiques	38
II.3.2.1. Comportement pseudo plastique	38
II.3.2.2. Comportement viscoélastique	38
II.3.2.3. Comportement plastique	39
II.3.3. Paramètres influents sur les propriétés mécaniques	40
<b>II. 4. CONDITIONS D'UTILISATION</b>	<b>40</b>
<b>II.5. AVANTAGES DES POLYMÈRES ET APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DES MICROSYSTÈMES</b>	<b>40</b>
<b>II.6. POLYMERES UTILISES AU SEIN DES MICROSYSTEMES</b>	
II.6.1. polyméthylméthacrylate (PMMA)	42
II.6. 2. Polydimethylsiloxane (PDMS)	42
<b>II.7. CHOIX DU MATERIAU</b>	<b>44</b>
<b>II.8. FABRICATION DE MEMBRANE EN PDMS</b>	<b>46</b>
<b>II.9. LES MATERIAUX MAGNETIQUES</b>	<b>46</b>
II.9.1. Les matériaux ferromagnétiques	46
II.9.2. Les matériaux antiferromagnétiques	47
II.9.3. Les matériaux ferrimagnétiques	47
II.9.4. Les ferrofluides	47

<b>II.10. AIMANTS PERMANENTS AU SEIN DES MICROSYSTEMES</b>	47
II.10.1 Aimants massifs	47
II.10.2. Aimants en poudre	48
II.10.3. Aimants en couches minces	48
<b>II.11. PERMALLOY : MATERIAU IDEAL</b>	49
<b>II.12. COMPOSITES MAGNETIQUES OU AIMANTS POLYMERES</b>	50
<b>II.13. ETUDE ANALYTIQUE D'UNE MEMBRANE CIRCULAIRE</b>	51
II.13.1. Introduction	51
II.13.2. Analyse des contraintes	51
II.13.3. Expression de la flèche	52
II.13.3.1. Cas particuliers	52
II.13.3.2. Expression de la flèche ( $h_0$ ) en fonction de la pression (P) : $h_0=f(P)$	53
II.13.4. Loi de HOOKE	54
II.13.5. Résultats analytiques et numériques d'une membrane circulaire simple	54
<b>II.14. CONCLUSION</b>	57

### CHAPITRE III

#### MODELISATION NUMERIQUE DES DIFFERENTES STRUCTURES D'UNE MICRO MEMBRANE CIRCULAIRE

<b>III.1. INTRODUCTION</b>	59
<b>III.2. MODELISATION NUMERIQUE</b>	59
III.2.1. Méthode des éléments finis "MEF"	59
III.2.2 Logiciel de calcul	60
III.2.2.1. Préprocesseur	60
III.2.2.2 Processeur de calcul	60
III.2.2.3. Post processeur	60
III.2.3. Maillage et élément de maillage	60
<b>III.3. MODELISATION NUMERIQUE D'UNE MEMBRANE EN PDMS BLOC</b>	62
<b>III.4. RESULTATS DE LA SIMULATION D'UNE MEMBRANE EN ALLIAGE BLOC</b>	
III.4. 1. Effet de la variation du rayon de la membrane	66
III.4. 2. Effet de la variation de l'épaisseur de la membrane	67



---

<b>III.5. RESULTATS DE LA SIMULATION D'UNE MEMBRANE EN ALLIAGE PETIT AIMANT</b>	70
III.5.1. Effet de la variation du rayon de la membrane	71
III.5.2. Effet de la variation de l'épaisseur de la membrane	73
<b>III.6. INTERPRETATION</b>	75
<b>III.7. EFFET DE LA FORME DE L'AIMANT SUR LA FLECHE</b>	76
III.7.1. Cas de la configuration bloc	76
III.7.2. Cas de la configuration petits aimants	77
<b>III.8. ETUDE DES CONTRAINTES VON MISES</b>	79
<b>III.9. ANALYSE MODALE</b>	82
III.9.1. Fréquence de la résonance	82
III.9.2. Analyse modale d'une membrane en PDMS bloc : $a=2$ ; $e=80\mu\text{m}$	82
III.9.3. Analyse modale d'une membrane en alliage petits Aimants : $a=2\text{mm}$ ; $e=50\mu\text{m}$	83
<b>III.10. CONCLUSION</b>	84
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	85
<b>ANNEXE</b>	88
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	104