

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie électrique

Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة الكهربائية

المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en : Génie Electrique**

**Option : Commande des systèmes énergétiques**

*Thèse préparée au Laboratoire de Génie Electrique de Biskra LGEB*

**Conception d'un micro-actionneur à aimants permanents pour une application micro-pompe**

Présentée par :

**Ishaq AMRANI**

Soutenue publiquement le 13/02/2018

**Devant le jury composé de :**

Dr. Salah Eddine ZOUZOU

Dr. Ahmed CHERIET

Dr. Khaled BEKHOUCHE

Dr. Souri Mohamed MIMOUNE

Dr. Mouloud FELIACHI

Dr. Hichem ALLAG

Professeur

Professeur

Maitre de Conférences 'A'

Professeur

Professeur

Professeur

Président

Rapporteur

Co- Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Université de Biskra

Université de Biskra

Université de Biskra

Université de Biskra

Université de Nantes

Université de Jijel

## Liste des travaux relatifs à la thèse

### Publications internationales

[1] Amrani I. Cheriet A. K. Bekhouche N. Bracikowski M. Feliachi. **Design, Modeling and Fabrication of a Novel Electromagnetic Micro-Actuator for A New Concept of Valveless Micro-pump.** papier accepté, revue JEE Journal of Electrical Engineering, ISSN 1582-4594.

[2] Amrani I. Cheriet A. Feliachi M. **Arbitrary Movement Simulation Using 3D NC-FVM for Electromagnetic Problems,** papier accepté, Journal COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, ISSN 0332-1649.

### Conférences internationales

[1] Amrani I. Cheriet A. Feliachi M. **Arbitrary Movement Simulation Using 3D NC-FVM for Electromagnetic Problems** papier accepté et présenté, conférence ISTET'2017,16-19 juin, Allemagne.

[1] Amrani I. Cheriet A. Feliachi M. **Design of a Large Displacement Contactless Electromagnetic Micro-actuator for Disposable Micro-pump,** papier accepté, conférence ISEM'2017, France.

### Conférences nationales

[1] Amrani I. Cheriet A. **Conception d'un Micro-actionneur à Aimant Permanent.** 4<sup>ème</sup> Edition du Colloque sur L'Inductique, Juin 2015, Jijel.

### Demande brevet

Demande de brevet intitulé **Micro-pompe électromagnétique bidirectionnelle sans valves,** date de dépôt de la demande : Le **10/10/2017**, N° De la demande **170516**, INAPI, Algérie.

## REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé aux laboratoires LGEB de l'Université de Biskra ALGERIE et l'IREENA de Saint Nazaire FRANCE.



Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Mouloud FELIACHI, Professeur à l'Université de Nantes, pour la confiance qu'il m'a accordée en m'accueillant au sein de l'IREENA et en acceptant de diriger mes recherches. Ses précieux conseils, ses encouragements ainsi que sa qualité humaine, m'ont permis d'aboutir dans ce travail.

Je tiens à remercier également mon directeur de thèse Monsieur Ahmed CHERIET, Professeur à l'Université de Biskra. Il m'a appris la méthodologie de recherche. Je le remercie plus particulièrement pour la confiance qu'il m'a accordée, pour m'avoir appris à être plus autonome tout au long de ce travail de recherche.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Khaled BEKHOUCHE pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant à codiriger mes recherches. Ses précieux conseils, ses encouragements ainsi que sa qualité humaine.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements aux membres du jury :

Monsieur Salah Eddine ZOUZOU, Professeur à l'Université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Monsieur Sourî Mohamed MIMOUNE, Professeur à l'Université de Biskra, pour avoir accepté de juger ma thèse.

Monsieur Hichem ALLAG, Professeur à l'Université de Jijel, pour avoir accepté de juger ma thèse.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Nicolas Bracikowski Maître de conférence à l'université de Nantes pour sa serviabilité et les discussions fructueuses.

Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues de travail au sein de l'équipe Modélisation des dispositifs électromagnétique MDE du laboratoire IREENA.

J'adresse un dernier mot de remerciement au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique du gouvernement Algérien, pour m'avoir accordé le financement de mon séjour de 11 mois à l'IREENA sans lequel cette thèse n'aurait pas pu voir le jour.

## DEDICACES

A ma famille, mes parents, mes frères, ma sœur.

A mes collègues.

A mes amis.

A mes collègues de la résidence universitaire.

# TABLE DES MATIERES

Liste des Figures.....	1
Introduction générale.....	5
<b>Chapitre I Etat de l'art sur les micro-pompes .....</b>	<b>5</b>
I.1 Introduction.....	9
I.2 Problématique .....	10
I.3 Caractéristiques des micro-pompes.....	10
I.4 Types de micro-valves intégrées dans les micro-pompes .....	11
I.4.1 Micro-valves passives .....	12
I.4.2 Micro-valves actives .....	12
I.4.3 Micro-valves dynamiques .....	13
I.5 Micro-pompes à inversion .....	15
I.5.1 Micro-pompes à actionnement piézoélectrique.....	17
I.5.2 Micro-pompes à actionnement électrostatique.....	18
I.5.3 Micro-pompes à actionnement magnétostrictive .....	19
I.5.4 Micro-pompes à actionnement électromagnétique .....	19
I.5.5 Micro-pompes à actionnement thermo-pneumatique.....	20
I.5.6 Micro-pompes à changement de phase .....	21
I.5.7 Micro-pompes bimétallique .....	21
I.5.8 Micro-pompes à alliage à mémoire de forme .....	22
I.5.9 Micro-pompes à alliage à film polymère .....	22
I.6 Micro-pompes sans valve.....	23
I.6.1 Micro-pompes péristaltiques.....	23
I.6.2 Micro-pompes rotatifs.....	24
I.7 Micro-pompes dynamiques non mécaniques .....	25
I.7.1 Micro-pompes électro-hydrodynamiques .....	25

I.7.2 Micro-pompes magnétohydrodynamiques.....	26
I.8 Conclusion .....	26
<b>Chapitre II Modélisation électromagnétique.....</b>	<b>9</b>
II.1 Introduction .....	29
II.2 Modélisation semi-analytique.....	29
II.3 Modélisation d'une bobine .....	30
II.4 Modélisation d'un aimant permanent .....	34
II.4.1 Approche colombienne.....	34
II.4.2 Approche ampérienne.....	34
II. 5 Modélisation numérique .....	35
II. 6 Equations de Maxwell et lois de comportement.....	36
<b>II. 7 Modèle magnétostatique .....</b>	<b>37</b>
II .7.1 Formulation magnétostatique en potentiel vecteur magnétique .....	38
II. 7. 2 Formulation axisymétrique du problème magnétostatique.....	39
II. 8 Méthodes numériques de résolution des équations EDP .....	41
II. 8.1 Méthode des différences finies .....	41
II.8.2 Méthode des éléments finis .....	41
II.8.3 Méthode des intégrales de frontières .....	41
II.9 Méthode des volumes finis .....	42
II.10 Prise en compte de mouvement des parties mobiles.....	43
II.10.1 Déformation de maillage .....	43
II.10.2 Bande du mouvement .....	44
II.10. 3 Surface de glissement .....	44
II.10.4 Maillage non-conforme .....	45
II.10.5 Méthode de changement de propriétés physiques .....	46
II.11 Conclusion .....	47
<b>Chapitre III Conception d'un micro-actionneur à aimants permanents .....</b>	<b>32</b>
III.1 Introduction .....	49

III.2 Conception du micro-actionneur proposé .....	49
III.2.1 Principe de fonctionnement.....	50
III.3 Modélisation semi-analytique du micro-actionneur .....	51
III.3.1 Equation mécanique .....	52
III.3.2 Choix du courant et caractéristiques dynamiques des aimants.....	52
III.4 Modélisation numérique du micro-actionneur à noyaux de fer.....	57
III.5 Fabrication du micro-actionneur et validation expérimentale .....	58
III.5.1 Mesure expérimentale de la dynamique des aimants .....	59
III.5.2 Caractéristique complète de la dynamique du micro-actionneur .....	61
III.6 Conclusion.....	62
<b>Chapitre IV LA MICRO-POMPE.....</b>	<b>54</b>
IV.1 Introduction.....	65
IV.2 Conception de la micro-pompe .....	65
IV.3 Principe de fonctionnement de la micro-pompe .....	67
IV.4 Modélisation de la micro-pompe.....	69
IV.4.1 Les pertes de charges fluidiques.....	69
IV.4.2 Modèle géométrique.....	71
IV.4.3 Résultats de la modélisation.....	72
IV.5 Fabrication et évaluation expérimentale de la micro-pompe .....	74
IV.5.1 Fabrication de la micro pompe.....	74
IV.5.2 Mise en marche de la micro-pompe .....	75
IV.5.3 Résultats expérimentaux .....	76
IV.6 Conclusion .....	80
Conclusion Générale .....	82
Références .....	83

## Liste des Figures

Figure. I.1 Classification des micro-pompes	9
Figure. I.2: Structure de diverses valves passives	12
Figure. I.3: Structure de diverses valves actives	13
Figure. I.4 Principe des valves « Nozzel/diffuser »	14
Figure. I.5 Principe de l'élément Tesla	14
Figure .I.6 Classification des valves	15
Figure. I.7: Section d'une micro-pompe à inversion où à membrane	16
Figure. I.8: Classification des micro-actionneurs	16
Figure. I.9: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe avec actionneur piézoélectrique en contraintes latérales	17
Figure. I.10: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe avec actionneur piézoélectrique en contraintes axiales	18
Figure. I.11: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur électrostatique	18
Figure. I.12: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur magnétostrictif	19
Figure. I.13: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur électromagnétique	20
Figure. I.14: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur thermo-pneumatique	21
Figure. I.15: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur bimétallique	21
Figure. I.16: Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à alliage à mémoire de forme	22
Figure. I.17: Illustration de la courbure du film ICPF	23
Figure. I.18 Micro-pompe péristaltique multi-chambres sans valves	24
Figure. I.19 Micro-pompe rotatif à double engrenage	24
Figure. I.20 Micro-pompe rotative à un seul disque	25
Figure. I.21 Schéma d'une micro-pompe à entraînement magnétohydrodynamique	26
Figure. II.1 Représentation relative à loi de Biot-Savart	29
Figure. II.2 Discrétisation d'une spire	30

Figure. II.3 Décomposition du vecteur	31
Figure. II.4 Organigramme du code de calcul développé : induction d'une bobine	32
Figure. II.5 Bobine de Helmholtz	33
Figure. II.6. Comparaison de la composante z de l'induction magnétique : bobine de Helmholtz	33
Figure. II.7. Approche colombienne d'un aimant permanent	34
Figure. II.8. Modèle Ampérien d'un aimant permanent disque	34
Figure. II.9. Composantes radiale et axiale d'un aimant permanent de 1.32T	35
Figure. II.10. Schématisation d'un plan de symétrie	39
Figure. II.11 Système bidimensionnel alimenté suivant la direction (oz)	39
Figure. II.12.Système bidimensionnel alimenté suivant ( $\phi$ )	40
Figure. II.13. Maillage en volumes finis du domaine d'étude	42
Figure. II.14. Description d'un volume fini	42
Figure. II.15 Technique de la déformation du remaillage	43
Figure. II.16. Technique de la bande de mouvement	44
Figure .II.17. Technique de la ligne de glissement	45
Figure. II.18 Génération du maillage non-conforme	45
Figure .II.19 Méthode de changement des propriétés physiques	46
Figure. III.1. Eléments constitutifs du micro-actionneur électromagnétique proposé	49
Figure. III.2 Principe de fonctionnement du micro-actionneur proposé	50
Figure. III.3. Dimensions du micro-actionneur proposé, en mm	51
Figure. III.4 Déplacement de l'aimant supérieur pour différents valeurs de I2, avec I1=0	53
Figure. III.5 Forces magnétiques appliquées sur les aimants pour I1 = 0 et I2 =2.5A	53
Figure. III.6 Forces magnétiques appliquées sur les aimants pour I1 = 2.5A et I2 =0	54
Figure. III.7 Forces magnétiques appliquées sur les deux aimants pour I1 = 0 et I2 =0	54
Figure. III.8. Caractéristique dynamique globale du micro-actionneur	55
Figure. III.9 Illustration des vecteurs de l'induction magnétique	56
Figure. III.10 Insertion des noyaux de fer	56
Figure. III.11 Micro-actionneur avec noyaux de fer	57
Figure. III.12. Caractéristique dynamique de l'aimant supérieur obtenue par la MVF	58
Figure. III.13 Fabrication du micro-actionneur proposé	58
Figure. III.14 Mesure de la caractéristique dynamique de l'aimant supérieur	59
Figure. III.15 Courant d'alimentation de la bobine supérieure	59

Figure. III.16 Caractéristique dynamique expérimentale de l'aimant supérieur	60
Figure. III.17 Confrontation des caractéristiques dynamiques numérique et expérimentale	60
Figure. III.18. Forces magnétiques appliquées sur l'aimant supérieur	61
Figure. III.19 Caractéristique dynamique complète de l'actionnement	62
Figure. III.20 Forces électromagnétiques appliquées sur l'aimant supérieur	62
Figure. IV.1. Design de la micro-pompe proposée	65
Figure. IV.2 Eléments constitutifs de la micro-pompe	66
Figure. IV.3 Principe de fonctionnement de la micro-pompe	68
Figure. IV.4 Courant d'alimentation des bobines selon les trois étapes	68
Figure. IV.5 Courant d'alimentation des bobines : inversion du sens de pompage	69
Figure. IV.6 Rugosité interne d'une conduite	70
Figure. IV.7 Changement brusque de diamètre d'une conduite	71
Figure. IV.8 Modèle géométrique de la micro-pompe	72
Figure. IV.9 Caractéristique dynamique de la micro-pompe en charge	72
Figure. IV.10 Vitesse des disques pendant un cycle	73
Figure. IV.11 Force magnétique appliquée sur les disques pendant un cycle	73
Figure. IV.12 Photographie de la micro-pompe fabriquée	74
Figure. IV.13 Photographie du banc d'essais	75
Figure. IV.14 Circuit de commande de la micro-pompe	76
Figure. IV.15 Schématisation de l'installation de mesure	76
Figure. IV.16 Débit en fonction de la fréquence de travail	77
Figure. IV.17 Comparaison entre le débit mesuré et le débit calculé	78
Figure. IV.18 Débit en fonction du courant d'alimentation	78
Figure. IV.19 Schématisation de l'installation de mesure de la contre-pression	79
Figure. IV.20 Photographie de l'installation de mesure de la contre-pression	79
Figure. IV.21 Débit en fonction de la contre-pression	79
Figure. IV.22 Contre-pression en fonction de la fréquence de travail	80

# Introduction générale

## Introduction générale

Au cours de ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été effectués pour miniaturiser les systèmes électromécaniques donnant ainsi naissance à ce que l'on appelle MEMS (Micro-Electromechanical Systems). Les MEMS ont touché plusieurs secteurs d'application comme le transport, la santé, la télécommunication,...etc. Pour notre part, on s'intéresse aux applications de ces micro-actionneurs dans les systèmes d'actionnement micro fluidiques, c'est-à-dire la manipulation de faibles quantités de fluides, en particulier dans le secteur biomédical [Nisar 08]. Les micro-pompes sont l'une des composantes micro-fluidiques les plus importantes, qui fournissent un écoulement de fluide contrôlable et précis. En effet, les premiers dispositifs développés dès la fin des années 80, sont des micro-pompes piézo-électriques. En principe, les micro-pompes sont inspirées par des pompes traditionnelles, où à travers la mise en place d'une différence de pression puis l'utilisation des valves pour diriger l'écoulement du liquide vers un sens désiré. L'élément moteur de ces dispositifs est le micro-actionneur générateur de la pression. Il existe plusieurs micro-pompes conçues basées sur différents types de micro-actionneurs, par exemple celles à actionnement piézoélectrique, à micro-actionneur électromagnétique solidaire à une membrane élastique,...etc., [Laser 04].

Les performances des micro-pompes à membrane dépendent fortement du mécanisme de micro-valves qu'elles utilisent, comme les valves passives ou les valves actives [Kwang 06] [Amirouche 09]. Par conséquent, des problèmes de haute technologie de micro-fabrication sont nécessaires pour ces types de micro-valves, ce qui les rend très coûteux. Cependant, les micro-pompes à membrane ont deux inconvénients majeurs; le premier se produit dans la dilatation insuffisante dans la chambre de pompe, tandis que le second se produit lorsque le pompage concerne des fluides chargés de particules, qui peuvent réduire ses performances. Ainsi, les micro-pompes sans valves sont particulièrement les plus préférées surtout pour les applications biomédicales [Al-Halhouli 10].

Selon la bibliographie, il existe principalement deux grandes catégories de conception de micro-pompes sans valves. La première est basée sur le redressement du flux de fluide en utilisant des éléments diffuseur/buse à la place des valves, tandis que la deuxième est basée sur le mouvement péristaltique. Cette dernière offre un taux de compression important, cependant une compression élevée empêche l'écoulement du fluide dans la chambre de

pompage [Jeong 05]. Autres types de micro-pompes sans valve utilisent soit un entraînement par un micro moteur électrique pour faire tourner un cylindre asymétrique, soit les propriétés magnétiques d'un liquide ferrofluide [Blanchard 05]. Pour les micro-pompes à ferrofluide, l'écoulement du fluide est obtenu en faisant tourner le liquide ferrofluide dans un canal cylindrique en utilisant un aimant rotatif externe. Cependant, la possibilité de mélanger le liquide pompé avec le ferrofluide et l'utilisation d'un aimant rotatif externe avec motorisation rendent la micro-pompe plus compliquée et difficile à contrôler.

Le défi de conception des micro-pompes sans valves, autrement dit, des micro-actionneurs dédiés aux micro-pompes, est la conformité vis-à-vis des exigences de production : faible coût, taille réduite ainsi que le système de contrôle. Dans ce travail de thèse, on propose un nouveau design d'un micro-actionneur électromagnétique à aimants permanents qui peut être intégré dans un système d'actionnement fluide : la micro-pompe. Dans ce contexte, nous allons décrire la modélisation électromagnétique du micro-actionneur électromagnétique proposé afin de prédire ses performances, ensuite l'adapter pour une application micro-pompe.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons présenté les méthodes d'actionnement les plus utilisées dans les micro-actionneurs et nous avons donné un aperçu des différents types des micro-pompes associées. Nous avons également souligné l'impact élevé du principe de la micro-valve sur les performances des micro-pompes.

Dans le deuxième chapitre nous avons illustré deux méthodes relatives à la modélisation des dispositifs électromagnétiques. Dans un premier temps, la modélisation semi-analytique adaptée aux systèmes linéaires et qui ont des géométries simples. L'équation de Bio-Savart est utilisée pour le calcul des champs et par conséquent la force électromagnétique. Ensuite, c'est la deuxième méthode de modélisation qui concerne la modélisation numérique par la MVF. Nous avons présenté, les formulations ainsi que le modèle magnétostatique correspondant au micro-actionneur proposé. Dans ce chapitre, nous avons illustré également quelques techniques de maillage pour la prise en compte du déplacement des parties mobiles.

Le troisième chapitre concerne le micro-actionneur électromagnétique proposé. Ce micro-actionneur comporte, comme éléments sources de champ magnétique, deux aimants permanents et de deux bobines. Afin de prélever ses caractéristiques dynamiques, dans un premier temps, une modélisation semi-analytique a été effectuée, puis, et suite à l'insertion d'un matériau ferromagnétique une deuxième modélisation numérique par le code de calcul à

base de la MVF, a été également accomplie. Les caractéristiques obtenues aperçoivent le déplacement des deux aimants en fonction du temps, ainsi que les forces magnétiques appliquées. Afin de valider sa faisabilité et son fonctionnement, dans ce chapitre nous avons fabriqué un premier prototype du micro-actionneur électromagnétique proposé.

Le quatrième chapitre concerne l'adaptation du micro-actionneur électromagnétique proposée précédemment pour une application micro-pompe ; il s'agit d'une micro-pompe bidirectionnelle sans valves. Elle peut être utilisée pour écouler le liquide dans les deux directions sans aucune nécessité de changer sa structure. La micro-pompe proposée utilise comme élément moteur le micro-actionneur électromagnétique proposé et validé expérimentalement dans le troisième chapitre. Une modification particulière sera apportée sur les deux supports amagnétiques des deux aimants permanents afin d'assurer la fonction de pompage. Nous avons fabriqué un premier prototype de cette micro-pompe. Plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés afin d'identifier ses performances.

## **Chapitre I Etat de l'art sur les micro-pompes**

## I.1 Introduction

Les systèmes micro électromécaniques (MEMS) constituent un domaine en croissance rapide qui permet la fabrication de petits appareils utilisant des techniques de micro fabrication similaires à celles qui sont utilisées pour créer des circuits intégrés. Au cours des deux dernières décennies, les technologies MEMS ont été appliquées aux besoins de l'industrie biomédicale, ce qui a donné naissance à un nouveau domaine émergent appelé micro-fluidique . Ce dernier traite de la conception et du développement des dispositifs miniatures qui peuvent détecter, pomper, mélanger et contrôler de petits volumes de fluides.

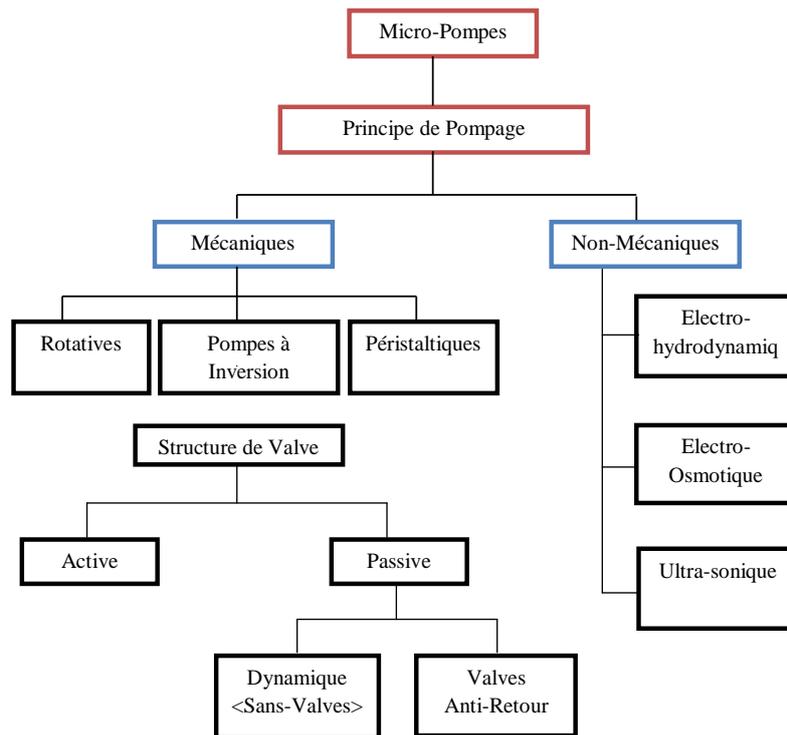


Figure I.1 Classification des micro-pompes.

Parmi les systèmes micro-fluidique on trouve les micro-pompes. Les micro-pompes sont l'une des dispositifs les plus importants dans les systèmes micro-fluidique où leur entraînement principal où leur actionnement fournit à ces dispositifs les moyens de contrôler et de distribuer de petites quantités de fluides. Par conséquent, la micro-pompe devient un dispositif essentiel des systèmes de transport micro-fluidique, avec un potentiel d'impact sur un large domaine de recherche. Les principaux critères pour les classier sont leur principe de fonctionnement, design, taille, contrôle précis du débit, faible consommation d'énergie et compatibilité avec d'autres systèmes micro-fluidiques. Les applications de ces dispositifs micro-fluidiques se trouvent principalement dans le domaine biomédical. En général, les micro-pompes peuvent être classées comme dispositifs mécaniques ou non mécaniques Figure. I.1, [Laser 04] [Kruzch 01]. Les micro-pompes qui ont des pièces mécaniques en mouvement sont désignées comme micro-pompes mécaniques alors que celle qui ne

comportent pas de pièces en mouvement sont appelées micro-pompes non-mécaniques. A travers un état de l'art, les micro-pompes à base de MEMS rapportées dans la littérature, ainsi que les différents types des micro-pompes sont décrites et analysées dans ce premier chapitre afin de mettre en avant leurs avantages et inconvénients.

## I.2 Problématique

Le but de ce projet de thèse consistait à proposer, étudier et développer un nouveau micro-actionneur électromagnétique à aimants permanents pour une application micro-pompe sans valves, et ensuite la réaliser par un procédé de prototypage dans le laboratoire. A priori, il n'existait pas un cahier de charges très spécifique en termes de performance, mais le but était de démontrer la faisabilité de tel dispositif tout en respectant les contraintes de taille et de coût. Et surtout que la micro-pompe proposée n'utilise ni de diffuseur ni de moteur électrique externe comme dans le cas des micro-pompes classiques. Et en plus, comme particularité très utile, la micro-pompe développée est bidirectionnelle sans aucun changement dans sa structure.

## I.3 Caractéristiques des micro-pompes

Avant d'évoquer les différents types des micro-pompes, il faut d'abord préciser leurs principales caractéristiques. Ces caractéristiques sont principalement le débit maximum  $Q_{max}$ , la différence de pression maximum  $\Delta P_{max}$  et la puissance consommée  $P$  [Rémy 13]. Le débit maximum  $Q_{max}$  est obtenu lorsque la pompe fonctionne sans aucune différence de pression appliquée à la sortie de la pompe. Par inversion la pression maximum  $\Delta P_{max}$  est obtenue quand le débit devient nul par le biais d'une différence de pression qui s'oppose au pompage. A partir de sa puissance électrique consommée on définit l'efficacité thermodynamique  $\eta$  d'une micro pompe pour un débit  $Q$  opposé par une différence de pression  $\Delta P$  [Laser 04] :

$$\eta = \frac{\text{puissance fluidique}}{\text{puissance consommée}} = \frac{Q \times \Delta p}{P} \quad (I.1)$$

L'efficacité de la pompe est ainsi maximale pour  $\Delta P = \frac{\Delta P_{max}}{2}$  et  $Q = \frac{Q_{max}}{2}$ . Dans ce cas, cette efficacité maximale  $\eta_{max}$  vaut:

$$\eta = 0.25 \cdot \frac{Q_{max} \times \Delta P_{max}}{P} \quad (I.2)$$

La micro pompe se caractérise aussi par l'auto-amorçabilité, autrement dit, sa capacité de pomper à la fois du liquide et du gaz, ce qui signifie qu'elle peut commencer à pomper le gaz à l'état sec et remplir automatiquement le liquide dans sa chambre. Cette capacité d'amorçage est limitée par la compressibilité de l'air qui empêche d'atteindre des pressions suffisantes à l'ouverture des valves d'entrée et de sortie de la pompe. Pendant la phase de refoulement il faut que la pression fournie par la chambre de pompage  $p_{chambre}^{ref}$  soit plus que la somme de la pression de sortie et la pression de valves, soit:

$$p_{chambre}^{ref} \geq p_{sortie} + \Delta p_{valve} \quad (I.3)$$

Où  $\Delta p_{\text{valve}}$  est la pression d'ouverture des valves (valves d'entrée et de sortie).  $p_{\text{sortie}}$  est la pression en sortie de la pompe. De même à l'aspiration, pour que la valve d'entrée s'ouvre la pression dans la chambre de pompage  $p_{\text{chambre}}^{\text{asp}}$  doit être:

$$p_{\text{chambre}}^{\text{asp}} \geq p_{\text{entrée}} - \Delta p_{\text{valve}} \quad (\text{I. 4})$$

Où  $p_{\text{entrée}}$  est la pression en entrée de la pompe. Or, lors de l'amorçage, la chambre de pompage étant remplie d'air,  $p_{\text{chambre}}^{\text{ref}}$  et  $p_{\text{chambre}}^{\text{asp}}$  sont reliées par la loi de Boyle-Mariotte (la température est supposée constante):

$$\frac{p_{\text{chambre}}^{\text{asp}}}{p_{\text{chambre}}^{\text{ref}}} = \frac{V_0}{V_0 + \Delta V} \quad (\text{I. 5})$$

Où  $V_0$  est le volume de la chambre de pompage à la fin de la phase de refoulement et  $\Delta V$  est le volume pompé lors d'un cycle de fonctionnement de la pompe. En définissant le rapport de compression  $\xi = \frac{\Delta V}{V_0}$  [Richter 98], l'auto-amorçabilité d'une pompe est alors définie par la condition :

$$\xi = \frac{p_{\text{sortie}} + \Delta p_{\text{valve}}}{p_{\text{entrée}} - \Delta p_{\text{valve}}} - 1 \quad (\text{I. 6})$$

Enfin, le dernier paramètre qui est aussi important est la fréquence de fonctionnement de la pompe. En effet, le débit  $Q$  de la pompe dans son régime linéaire de fonctionnement peut être approximé par [Woiias 05] :

$$Q = \Delta V \times f \quad (\text{I. 7})$$

Ainsi, la fréquence  $f$  d'actionnement peut être ajustée pour atteindre le débit souhaité.

#### I.4 Types de micro-valves intégrées dans les micro-pompes

Impérativement, les micro-pompes conventionnelles à inversion qui fonctionnent périodiquement nécessitent des micro-valves afin de contrôler l'écoulement du fluide dans un sens désiré, autrement dit, empêcher l'écoulement inverse du fluide dans les états d'aspiration ou de refoulement. Cependant, la performance, la facilité de fabrication, la fiabilité et la robustesse d'une micro-pompe à inversion dépendent fortement du mécanisme de la micro-valve sélectionné [Laser 04] [Yamahata 05]. Les micro-pompes actuelles utilisent différents modèles de micro-valves pour le contrôle des fluides. Ces valves peuvent être classées selon trois familles :

- ❖ Micro-valves passives, entraînées par la pression du fluide et les forces visqueuses [Laser 04] et sont utilisées dans la plupart des micro-pompes,
- ❖ Micro-valves actives qui contrairement au type passif, sont commandées et entraînées par un signal d'entrée électrique externe,
- ❖ Et les micro-valves dynamiques qui sont des valves qui au lieu d'avoir une structure mobile ou flexible, intègrent un canal de fluide conçu de manière dynamique qui favorise le flux dans une direction [Stemme 93].

### I.4.1 Micro-valves passives

Les valves passives sont utilisées pour diriger l'écoulement de l'entrée vers la sortie. Normalement, une valve de contrôle passif se compose de deux parties principales: un élément flexible (ou mobile) qui réagit à la pression du fluide et un siège de valve [Zengerle 94]. Lorsque la différence de pression est dans le sens de la valve, la partie flexible se déplace et le flux se produit. Si le mouvement est dans la direction opposée, la partie flexible est poussée contre le siège de la valve et bloque le passage du flux fluide.

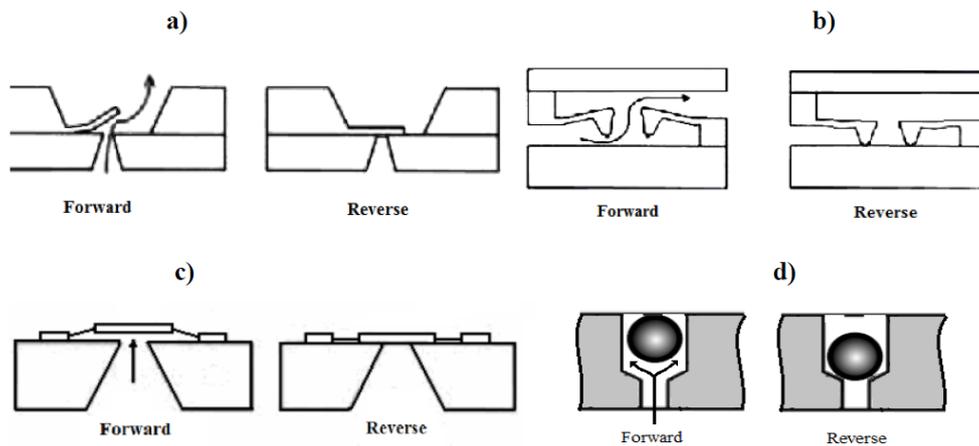


Figure I.2 Structure de diverses valves passives [Yang 04], [Shen 08].

En réalité les micro-valves peuvent fuiter en raison d'une mauvaise étanchéité de la valve et son siège ou à cause des effets dynamiques. De nombreux types de micro-valves passives sont conçus [Koch 98], [Nguyen 04] et [Pan 05]. Les micro-valves cantilever et diaphragme circulaire illustrés dans la Figure. I.2.a, b et c, sont les types les plus fréquemment utilisés dans les micro-pompes à inversion. Ainsi que d'autres valves anti-retour, telle que la valve à bille illustrée à la Figure. I.2.d. Outre, les micro-valves anti-retour sont les seuls composants mobiles de la micro-pompe. Par conséquent, la performance totale, la durabilité et la biocompatibilité de la micro-pompe reposent également sur les ces valves anti-retour. Les principaux défis associés aux micro-valves sont :

- ❖ Etanchéité adéquate.
- ❖ Réponse dynamique robuste.
- ❖ Leur sensibilité aux particules solides [Stemme 93].

### I.4.2 Micro-valves actives

Dans une micro-valve active, l'élément mobile est actionné par une force externe et non par la différence de pression de fluide à travers la valve. En raison d'une meilleure contrôlabilité, les valves actives offrent des performances améliorées au détriment de la fabrication et de la complexité de la conception [Laser 04]. La Figure. I.3 montre les principales micro-valves actives. Le principe de fonctionnement de toutes ces valves dans la direction du flux est assez similaire.

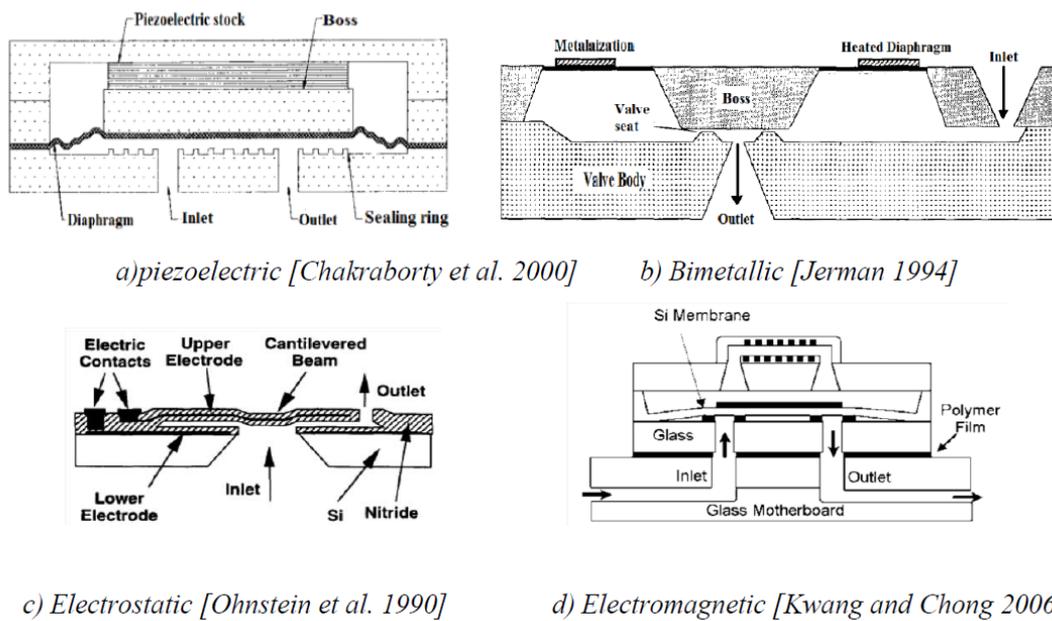


Figure I.3 Structure de diverses valves actives [Sina 12].

Cependant, la principale différence entre la performance de ces mécanismes est le temps de réponse [Xiao 08]. Parmi les valves actives, on trouve les valves piézoélectriques et électrostatiques qui sont caractérisées par un temps de réponse le plus court. Malgré le fait que de meilleures performances peuvent être obtenues en incorporant des micro-valves actives, elles ajoutent beaucoup plus de complexité dans la phase de fabrication et également au contrôle de la micro-pompe. Un examen plus détaillé des micro-valves actives se trouve dans la référence [Kwang 06].

#### I.4.3 Micro-valves dynamiques

Le flux de fluide dans la micro-pompe à inversion peut également être corrigé au moyen d'un comportement de flux dépendant de la direction dans des canaux spécialement conçus. Les micro-pompes avec des canaux de rectification d'écoulement au lieu des valves anti-retour sont également appelées (valveless) c.-à-d. des micro-pompes sans valves. Ces dispositifs sont caractérisés par une géométrie fixe. Un certain nombre de micro-pompes sans valves a été conçu en utilisant des canaux de rectification de flux tels que le « Nozzel/ Diffuser » [Stemme 93] [Olsson 97] et « l'élément Tesla » [Morris 03] [Feldt 02], ces éléments sont insérés au niveau de l'entrée et la sortie des micro-pompes à inversion.

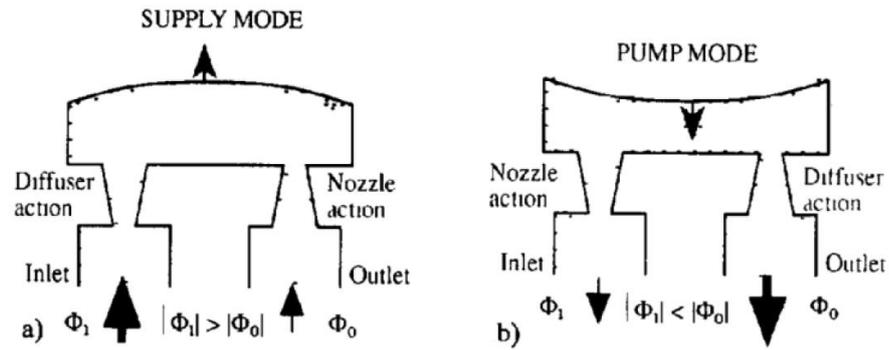


Figure I.4 Principe des valves « Nozzel/diffuser » [Stemme 39].

a). Volume de chambre croissante, b). Volume de chambre décroissante.

La Figure. I.4 illustre le principe des micro-valves à Nozzle/Diffuseur. Ces valves utilisent le principe selon lequel le diffuseur et le Nozzle peuvent être conçus pour avoir une baisse de pression plus faible dans le diffuseur plutôt que dans le nozzle. Par conséquent, il favorisera le flux dans une direction. En mode d'alimentation en fluide, l'entrée agit comme un diffuseur à faible chute de pression et la sortie agit comme un nozzle avec une chute de pression plus élevée. Mais en mode pompage, il en va de l'opposé. Un autre type de soupape dynamique est la valve type Tesla. Le principe de cette vanne consiste à utiliser l'élan de l'écoulement lui-même pour augmenter la chute de pression dans une direction Figure. I.5.

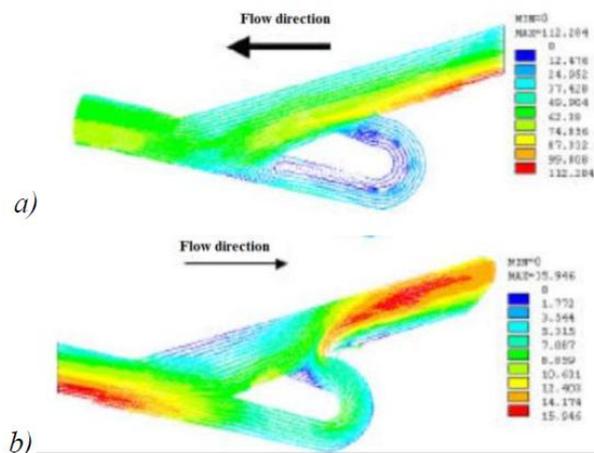


Figure I.5 Principe de l'élément Tesla [Bendib 01].

a). Flux dans la direction dite avant, b). Flux dans la direction inverse

Comme montre la Figure. I.5.b, lorsque le fluide s'écoule dans le sens inverse, une partie de celui-ci pénètre dans le canal incurvé qui change la direction de son élan, puis, lorsqu'il entre dans le canal principal, il entraîne une grande perte de pression. En conséquence, le débit dans

la direction inverse est beaucoup moins que le sens de l'avant ; cela favorise alors le flux fluide dans une direction.

Étant donné que les valves dynamiques n'ont pas des pièces mécaniques en mouvement, elles peuvent éviter les problèmes majeurs rencontrés dans les valves anti-retour, tels que les pertes de haute pression, la sensibilité aux particules solides, l'usure et la fatigue des valves mobiles [Stemme 93]. En outre, un autre mérite d'utiliser des valves dynamiques est la facilité de fabrication et d'intégration avec la micro-pompe. Cependant, l'efficacité de la valve dans une direction d'écoulement inverse est relativement plus faible que les valves anti-retour [Kwang 06]. La classification proposée à la Figure. I.6 s'inspire de l'état de l'art des micro-valves relatif à la bibliographie consultée.

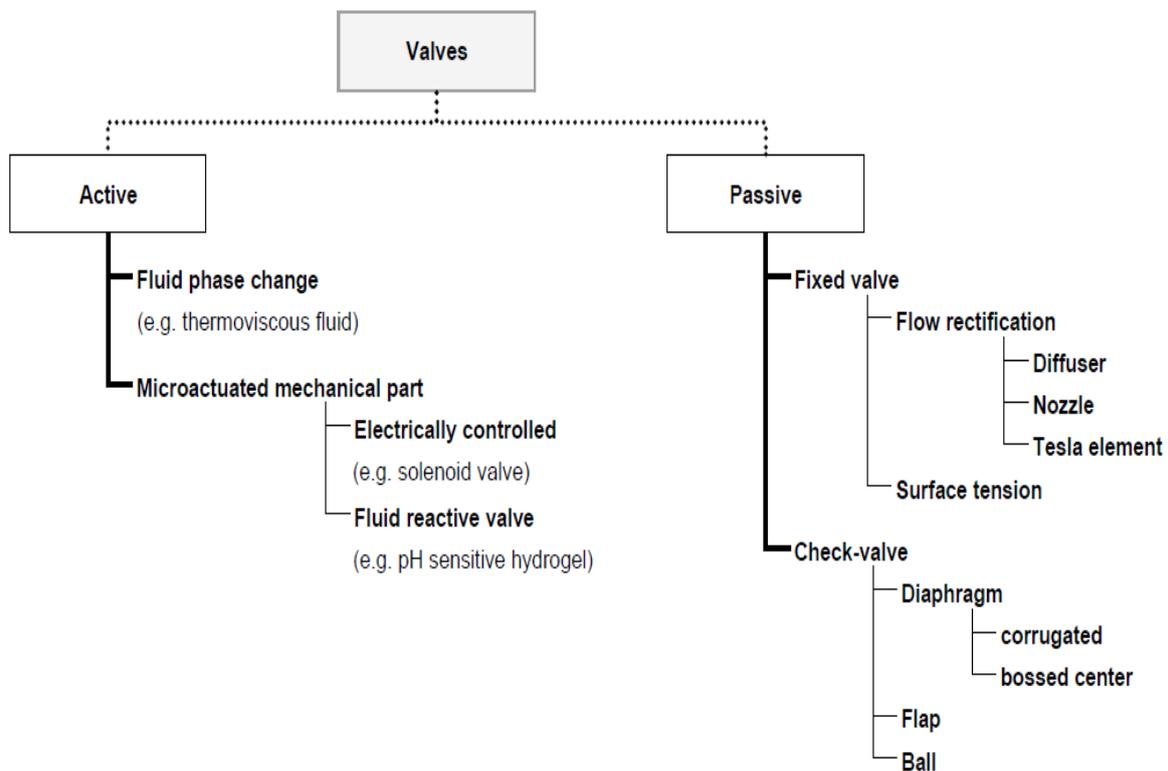


Figure I.6 Classification des valves.

### I.5 Micro-pompes à inversion

Ce type de micro-pompe comprend généralement une chambre de pression délimitée par un diaphragme flexible entraîné par un actionneur et des micro-valves, comme il est montré sur la Figure I.7.

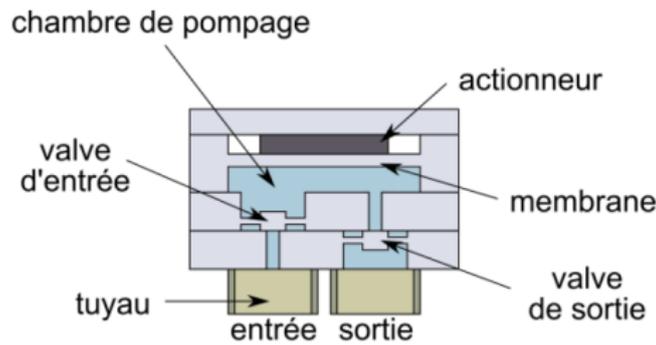


Figure I.7 Section d'une micro-pompe à inversion où à membrane [Laser 04].

Les valves anti-retour et l'actionneur jouent un rôle primordial dans le débit et la pression de sortie maximale. De nombreux types d'actionneurs tels que piézoélectriques, pneumatiques, électromagnétiques et thermo-pneumatiques...etc., ont été utilisés Figure I.8.

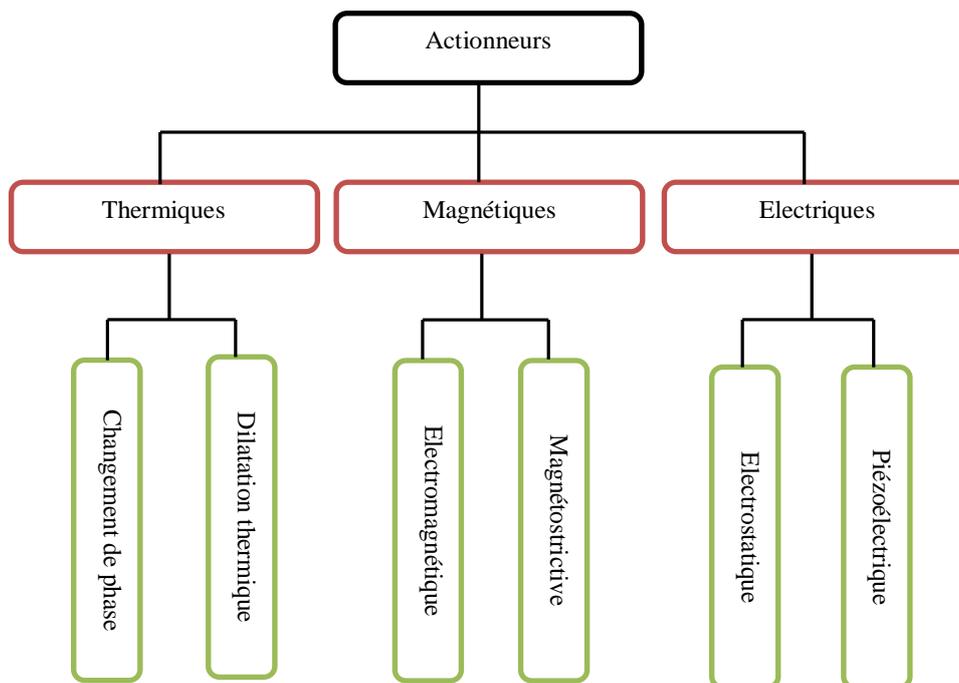


Figure I.8 Classification des micro-actionneurs.

La pression maximale réalisée par la micro-pompe dépend directement de la force produite de l'actionneur utilisé. La fonction principale de l'actionneur consiste à transformer l'énergie d'entrée, par exemple électrique ou thermique, en énergie mécanique. En principe, les actionneurs sont relativement faciles à construire et peuvent fournir une grande force, une large course, un temps de réponse rapide et fonctionnent sous une faible consommation d'énergie. Leurs caractéristiques les plus importantes sont:

- ❖ Densité d'énergie,
- ❖ Grandeur de force,
- ❖ Amplitude de dilatation,
- ❖ Temps de réponse.

### I.5.1 Micro-pompes à actionnement piézoélectrique

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps à se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. En principe, les micro-pompes piézoélectriques se composent d'un disque piézoélectrique solidaire d'une membrane élastique. L'expansion et la contraction de la chambre de pression sont produites par la déformation du disque lorsque il subi une tension électrique (+V, -V).

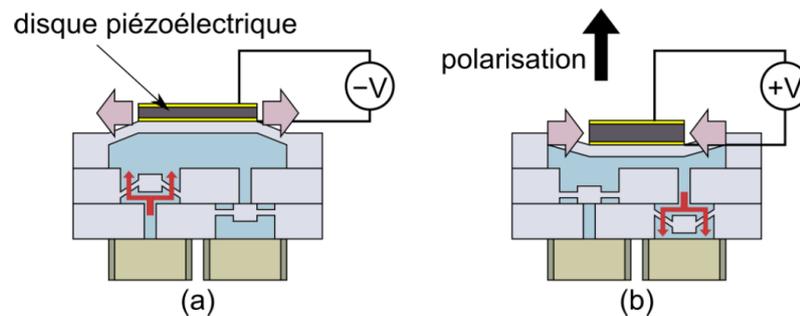


Figure I.9 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe avec actionneur piézoélectrique en contraintes latérales [Van Lintel 88].

(a). Aspiration, (b). Refoulement.

Deux configurations d'actionneurs piézoélectriques sont possibles: configuration en contraintes latérales Figure I.9 et configuration en contraintes axiales Figure I.10. Dans celle en contraintes latérales, le disque est collé à la surface extérieure de la membrane. Dans ce cas, la dilatation latérale force la membrane à se courber et changer ainsi le volume de la chambre ce qui produit une différence de pression.

Dans la configuration axiale, le disque piézoélectrique est placé entre un support rigide et la face supérieure de la membrane, dans ce cas les deux faces du disque sont contraintes. Et de même façon comme dans la configuration latérales, l'application d'une tension +V et -V sur le disque provoque la déformation de la membrane.

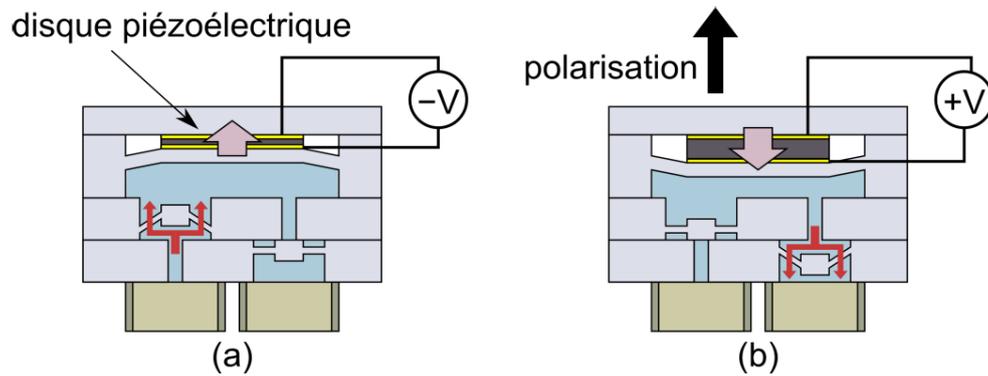


Figure I.10 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe avec actionneur piézoélectrique en contraintes axiales [Laser 04].

(a). Aspiration, (b). Refoulement.

Selon la bibliographie, ce type de micro-pompe est le plus étudié [Shabaniyan 16], [Eladi 14], [Shen 08], [Cazorla 16] et [Zhang 16] en raison de leurs avantages:

- ❖ Haute fréquence de fonctionnement.
- ❖ Atteinte des débits plus élevés par rapport aux autres types de micro-pompes à membrane.

Tandis que leur inconvénient majeur réside dans leur très faible course.

### I.5.2 Micro-pompes à actionnement électrostatique

Les actionneurs électrostatiques les plus simples sont composés de deux électrodes parallèles [Teymoori 05], [Teymoori 02], [Bouruina 97] et [Patrascu 11] comme illustre la Figure I.11. L'une est fixe sur un support rigide, tandis que l'autre est amovible et attachée à une membrane. En appliquant une tension différente à chacune des électrodes, on va pouvoir rapprocher la l'électrode amovible.

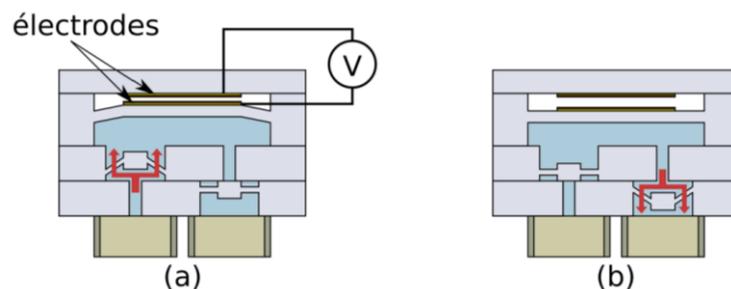


Figure I.11 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur électrostatique [Laser 04].

(a). Aspiration, (b). Refoulement.

Par conséquent, la membrane se courbe et fait varier le volume de la chambre. Cette étape concerne l'aspiration par contre le refoulement commence lorsque le courant ne passe plus. Les avantages des micro-pompes électrostatiques sont :

- ❖ Haute fréquence de fonctionnement ( $>100\text{Hz}$ ).
- ❖ La force est inversement proportionnelle à la distance entre les électrodes.

Pour les inconvénients, on cite :

- ❖ Difficulté dans la fabrication (micro-fabrication).
- ❖ La faible déformation de la membrane traduite par un faible débit ( $<40\text{nL}$ ).

### I.5.3 Micro-pompes à actionnement magnétostrictive

L'effet magnétostrictif est similaire à l'effet piézoélectrique, où la magnétostriction est induite par l'application d'un champ magnétique externe. Dans les micro-pompes à actionnement magnétostrictive, un film mince magnétostrictif est fixé à la surface supérieure de la membrane élastique. Le champ magnétique est produit à l'aide d'une micro-bobine intégrée [Nava 05] [Oosterbroek 99], comme il est montré sur la Figure I.12.

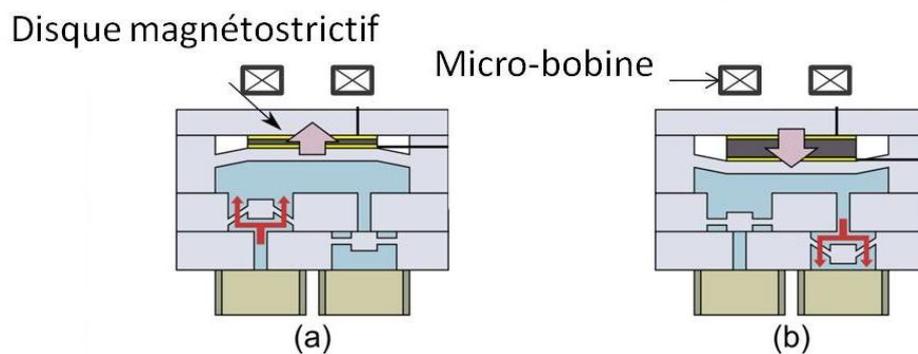


Figure I.12 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur magnétostrictif.  
(a). Aspiration, (b). Refoulement.

### I.5.4 Micro-pompes à actionnement électromagnétique

Les micro-pompes à actionneur électromagnétique sont généralement composées d'un aimant permanent fixé à une membrane et d'une bobine, comme l'illustre la Figure I.13. Le passage d'un courant électrique dans la bobine va générer une force électromagnétique dite de Lorentz qui attire ou repousse l'aimant permanent. Plusieurs micro-pompes à actionnement électromagnétique ont été rapportées dans la littérature [Getpreecharsawas 06], [Guo 07], [Dau 09], [Al-Halhouli 10], [Pan 05].

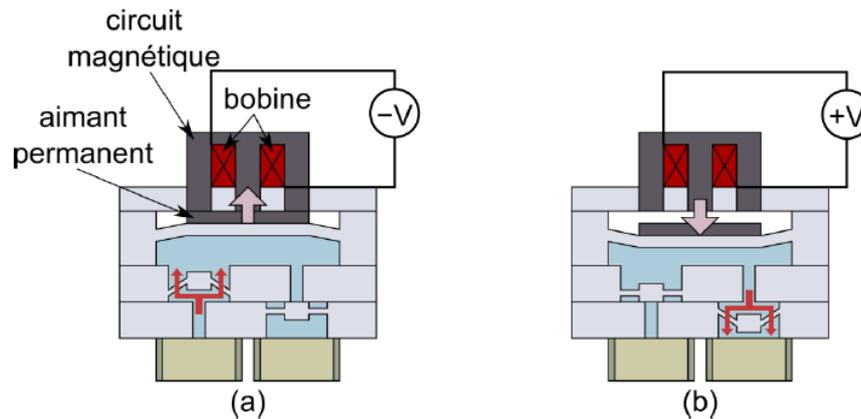


Figure I.13 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur électromagnétique [Laser 04].

(a). Aspiration, (b). Refoulement.

Citons quelques avantages des actionneurs électromagnétiques:

- ❖ Ils fournissent de grands débits par rapport aux actionneurs piézoélectriques et électrostatiques,
- ❖ Actionnement sans contact,
- ❖ A l'échelle macroscopique, l'actionnement électromagnétique produit une force importante, la raison pour laquelle il est souvent utilisé dans les moteurs électriques.

Ils possèdent comme inconvénients:

- ❖ Intégration difficile de la bobine due à son volume,
- ❖ Le courant demandé peut entraîner des problèmes d'échauffement.

Notons que le courant maximal est aussi un facteur important. Dans le cas d'un fil et d'un aimant permanent ( $B$  est un variable insensible qui dépend des propriétés des matériaux).

### I.5.5 Micro-pompes à actionnement thermo-pneumatique

Ce type d'actionnement est caractérisé par une couche de résistance chauffante. Dans ce cas, la micro-pompe se compose de deux chambres ; une chambre contient un gaz qui dilate suite à une variation de température, tandis que l'autre chambre est remplie par le fluide à pomper. Le refoulement se produit par chauffer le gaz par application d'une tension sur les résistances, en conséquence la dilatation du gaz force la membrane à fléchir. Alors que l'aspiration se produit lorsqu'aucune tension n'est appliquée et que le fluide se refroidit en laissant la membrane se relaxer. La Figure I.14 illustre le principe de fonctionnement de ce type de micro-pompe [Rémy 13], [Ou 12], [Van de pol 90] et [Yang 11].

L'actionnement thermo-pneumatique offre plusieurs avantages:

- ❖ Sa capacité de générer de grand déplacement de la membrane. Et ce dernier dépend uniquement des capacités d'expansion du gaz et des propriétés mécaniques de la membrane,
- ❖ Fabrication simple en n'utilisant que des procédés standards de la microélectronique.

Et possède comme inconvénients:

- ❖ Leur fréquence de fonctionnement est très fortement limitée par la lenteur des transferts de chaleur.
- ❖ Très faible débit qui est limité à quelques microlitres par minute.

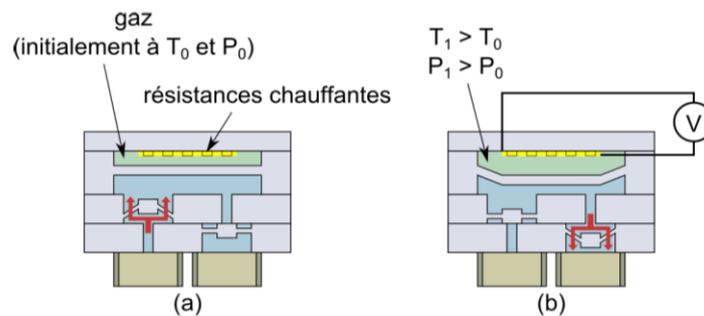


Figure I.14 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur thermo-pneumatique [Laser 04].

(a). Aspiration, (b). Refoulement.

### I.5.6 Micro-pompes à changement de phase

D'après leur principe de fonctionnement, les micro-pompes à changement de phase [Sim 03] [Takagi 94] ressemblent à celles thermo-pneumatique. L'actionnement à changement de phase est basé sur le changement de phase de la matière liquide ou solide ; vaporisation/liquéfaction ou fusion solidification. Dans ce cas, la matière qui change sa phase est séparée de la chambre de pompage par la membrane. L'inconvénient majeur des micro-pompes à changement de phase réside dans leur faible débit et leur consommation énergétique importante.

### I.5.7 Micro-pompes bimétallique

Ces micro-pompes utilisent une structure bimétallique [Zhan 96] [Yang 96], métal-métal ou tout autre type de bilame avec une grande différence de coefficients d'expansion thermique entre les deux matériaux, Figure I.15.

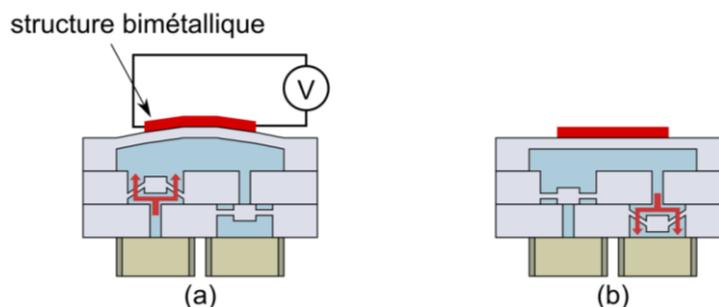


Figure I.15 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à actionneur bimétallique.

(a). Aspiration, (b). Refoulement.

Une contrainte mécanique est générée suite à une augmentation de la température parce

qu'une couche se dilate plus que l'autre, et par conséquent une déformation de la membrane se produite. La structure se relaxer lorsque la température diminue, et la membrane gagne son état initial. Leur majeur avantage est leur simplicité de réalisation technologique. Ce qui les rend plus attractifs pour une fabrication à faible coût. Cependant, ce type de micro-pompes possède un inconvénient majeur relatif au faible débit, en raison de la lenteur du phénomène thermique, ce qui caractérise la micro-pompe par une faible fréquence de fonctionnement.

### I.5.8 Micro-pompes à alliage à mémoire de forme

Par rapport aux matériaux métalliques, un alliage à mémoire de forme (AMF) est un alliage possédant plusieurs propriétés inédites: la capacité de garder en mémoire une forme initiale et d'y retourner même après une déformation, la possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque sa température varie autour d'une température critique, et un comportement super-élastique. Parmi les principaux alliages à mémoire de forme, on retrouve toute une variété d'alliages de nickel et de titane comme constituants principaux, en proportions presque égales. L'alliage est capable d'avoir deux positions stables, chacune correspondant à une phase cristallographique. Dans ce cas, pour une application micro-pompe, le déplacement de la membrane se fait donc par un changement de température de la couche d'alliage à mémoire de forme [Benard 98], [Benard 97] et [Nason 06]. La Figure I.16 illustre le principe.

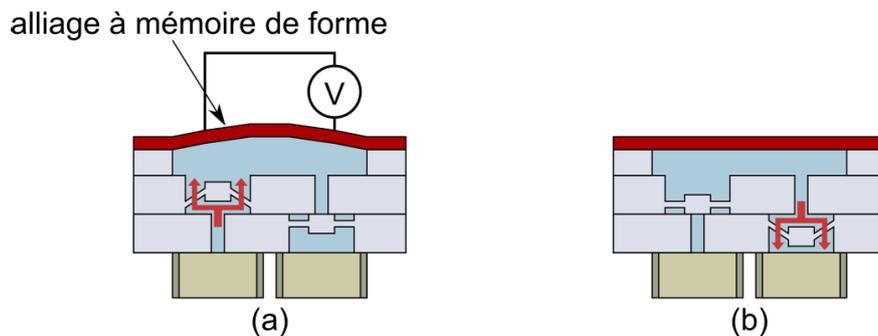


Figure I.16 Principe de fonctionnement d'une micro-pompe à alliage à mémoire de forme [Laser 04].

(a). Aspiration, (b). Refoulement.

Le principal avantage de ce type de micro-pompes est la facilité de fabrication. Ces inconvénients sont :

- ❖ Les matériaux utilisés dans les alliages ne sont pas des matériaux conventionnels.
- ❖ Le changement de phase cristallographique nécessite de fortes énergies thermiques, limitant ainsi son intégration dans des dispositifs portables.

### I.5.9 Micro-pompes à alliage à film polymère

Les films à polymère sont des films dont la forme ou la taille changent lorsqu'ils sont stimulés à un champ électrique. L'utilisation principale de ce type de matériau est la fabrication

d'actionneurs et de capteurs. Parmi les types des films polymères les plus en plus utilisés on cite le film polymère conducteur ionique (ICPF: Ion Conductive Polymer Film). Les deux faces du film ICPF sont recouvertes d'électrodes conductrices fabriquées d'un métal précieux tel que l'or ou le platine. En effet, les films ICPF sont des actionneurs polymères dans lesquels la déformation est causée par le déplacement d'ions suite à l'application d'une tension électrique aux électrodes [Yamahata 05] [Rémy 13]. Alors, l'action du champ électrique entraîne des molécules d'eau induisant ainsi un moment fléchissant dans le film polymère. Selon le signe de la tension appliquée, le film ICPF se courbe dans un sens ou dans l'autre. La Figure I.17 illustre le principe de déflexion d'un actionneur à film ICPF.

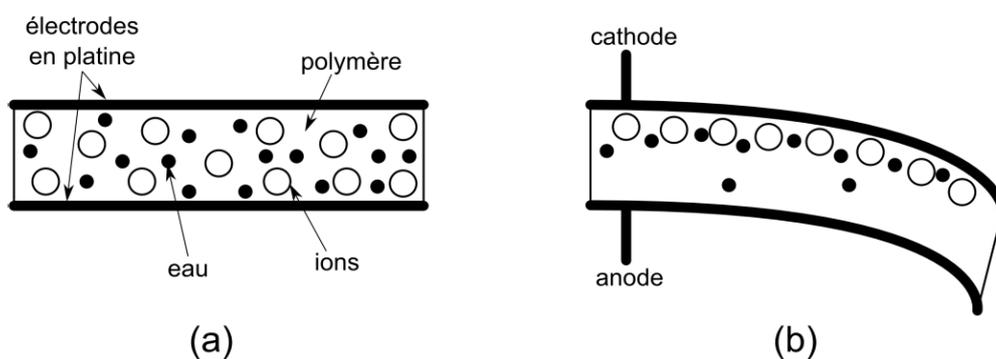


Figure I.17 Illustration de la courbure du film ICPF [Rémy 13].

(a). Au repos, (b). Sous l'action d'un champ électrique.

L'actionneur à film ICPF est souvent comparé à un muscle artificiel de par sa faible tension d'actionnement. Concernant leurs applications comme micro-pompes, les micro-pompes à film ICPF offrent un faible débit ainsi qu'une faible fréquence de fonctionnement.

## I.6 Micro-pompes sans valve

Le fonctionnement d'une micro-pompe sans valve s'articule principalement sur sa géométrie spécifique, qui permet la réalisation d'un pompage sans l'utilisation de valves. Dans la littérature, on se retrouve avec deux types:

- ❖ Micro-pompe à actionnement péristaltique,
- ❖ Micro-pompe rotatif.

### I.6.1 Micro-pompes péristaltiques

Ces micro-pompes disposent d'une chambre de pompage subdivisée en différentes parties dont les volumes peuvent être variés de manière indépendante. Une séquence de réduction/augmentation des volumes permet de déplacer le volume de fluide d'une partie par un mouvement péristaltique comme le montre la Figure. I.18. Ce type de micro-pompe utilise des actionneurs tels que piézoélectrique, électrostatique, thermo-pneumatique,...etc. [Jeong 05], [Nguyen 08].

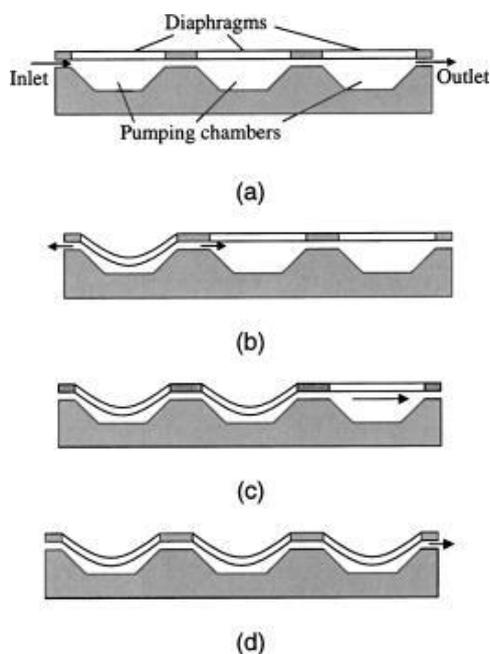


Figure I.18 Micro-pompe péristaltique multi-chambres sans valves.

De (a) à (d) les différentes phases relatives à un cycle de pompage.

### I.6.2 Micro-pompes rotatifs

Leur principe de fonctionnement s'inspire des pompes macroscopiques. Le liquide à pomper est entraîné par une ou plusieurs parties de la pompe qui se trouvent en rotation. En effet, la réalisation de telles pompes est relative à la possibilité du micro-assemblage et de la micro-technologie de fabrication.

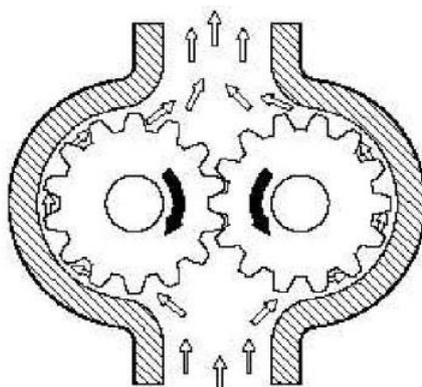


Figure I.19 Micro-pompe rotatif à double engrenage [Dewa 97].

Quelques pompes à cylindre à rotation ont été rapportées, la Figure. I.19 montre un exemple d'une micro-pompe à conduite rotative. Le fluide est piégé entre les aubes au niveau de l'entrée, et ensuite poussé vers l'extérieur en raison des forces centrifuges à la sortie. Dans

cette micro-pompe, l'entrée, la sortie et le boîtier des palettes doivent être conçus conformément au sens de rotation pour guider le flux fluide dans la bonne direction.

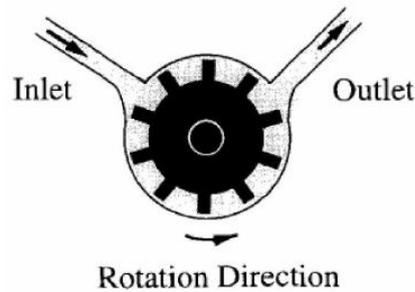


Figure I.20 Micro-pompe rotative à un seul disque [Sina 12].

Un autre mécanisme d'entraînement rotatif est illustré sur la Figure. I.20, constitué d'un seul disque rotatif. Ce type de mécanisme est plus adapté pour les fluides visqueux. Pour obtenir un niveau raisonnable de débit, le disque doit être tourné à une grande vitesse possible. La simplicité de ce mécanisme d'entraînement facilite la fabrication des engrenages rotatifs ainsi que les palettes. Une micro-pompe à engrenages peut générer des pressions de vide relativement élevées, ce qui la rend d'être auto-amorcée [Dewa 97]. Ces micro-pompes offrent un débit fluide de sortie continu et lisse.

### I.7 Micro-pompes dynamiques non mécaniques

Les micro-pompes dynamiques non mécaniques sont basées sur une transformation directe de l'énergie non mécanique afin de pomper le fluide. Ces micro-pompes utilisent des dispositifs électro-hydrodynamiques, électro-osmotiques ou magnétohydrodynamiques qui sont tous basés sur une transformation directe de l'énergie d'un champ électromagnétique vers le fluide. Généralement, parce que ces micro-pompes n'ont pas de pièces mobiles mécaniques, elles ont une structure simple. Cependant, dans la plupart des cas, leurs applications sont limitées à certains types de fluides, car leur performance repose sur les propriétés des fluides en question [Woias 05].

#### I.7.1 Micro-pompes électro-hydrodynamiques

Lorsqu'un champ électrostatique est appliqué à un fluide diélectrique à faible conductivité, il peut entraîner un écoulement et une pression sur le fluide. Une micro-pompe électro-hydrodynamique (EHD) repose sur la formation électrochimique et le mouvement des ions chargés [Richter 90], [Bart 89]. Depuis 1989, diverses micro-pompes EHD ont été développées. Elles utilisent l'effet d'induction EHD, c'est-à-dire la génération et le déplacement des charges à la limite, ainsi que l'effet d'injection EHD qui repose sur la formation électrochimique et le mouvement des charges. Comme exemple, on cite la micro-pompe de Richter et Sandmaier [1991] qui atteint une pression de sortie maximale de 24mbar à 700V et un débit de 14ml/min avec de l'éthanol. Dans cette micro-pompe le pompage

bidirectionnel peut être réalisé en inversant les pôles. Malgré le concept simple de ces micro-pompes, toutes les micro-pompes EHD s'appuient fortement sur les propriétés électriques du fluide, c'est-à-dire sa perméabilité et sa conductivité [Woias 05]. Par conséquent, elles ne peuvent être pas utilisées avec des fluides non conducteurs et non ioniques.

### I.7.2 Micro-pompes magnétohydrodynamiques

Le principe de fonctionnement d'une micro-pompe magnétohydrodynamique (MHD) est basé sur les forces de Lorentz appliquées aux ions du fluide [Yamahata 05], dont la force transmise sera perpendiculaire à la direction du champ magnétique. La Figure. I.22 illustre un schéma d'une micro-pompe à entraînement magnétohydrodynamique.

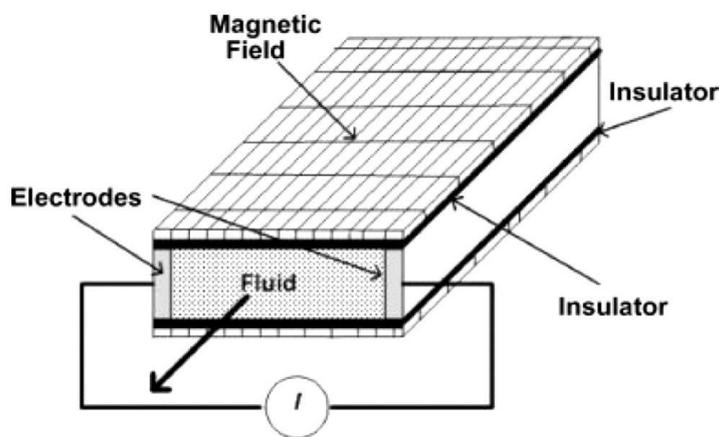


Figure I.21 Schéma d'une micro-pompe à entraînement magnétohydrodynamique [Nisar 08].

Une micro-pompe MHD produit une petite quantité d'écoulement et une faible pression, typiquement inférieure à 0,1ml/min pour le débit et 0,2kPa pour la pression. Comme exemple, on cite le travail de Jang et Lee [2000], c'est une micro-pompe magnétohydrodynamique avec une chambre de longueur de 40mm, un diamètre hydraulique de 1mm, alimentée par un courant de 100 $\mu$ A. Les performances obtenues sont un débit maximal de 63 $\mu$ l/min et une pression maximale de 170Pa. Un problème majeur de la micro-pompe MHD réside dans la génération de bulles due à l'ionisation [Nisar 08]. Ce problème peut être résolu en utilisant un courant alternatif et un électro-aimant à la place d'un courant continu et un aimant permanent [Lemoff 00].

### I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes d'actionnement les plus utilisées dans les micro-actionneurs et nous avons donné un aperçu des différents types des micro-pompes selon la littérature. Dans la plupart des micro-pompes, il est indispensable d'intégrer des micro-valves afin d'empêcher le retour du fluide. Plusieurs types de micro-valves ont été discutés dans ce chapitre. Nous avons également souligné l'impact élevé du principe de la micro-valve sur les performances des micros-pompes à inversion. Cependant, les micro-pompes sans valves restent le choix le plus favorable surtout dans le domaine biomédical.

Dans ce chapitre plusieurs types des micro-pompes sans valves ont été rapportés. Notons, qu'il est essentiel, lors de la conception d'une micro-pompe, de garantir une tolérance aux bulles qui peuvent être générées dans le fluide. Egalement, l'auto-amorçage consiste en une propriété indispensable pour la robustesse de la micro-pompe.

## **Chapitre II Modélisation électromagnétique.**

## II.1 Introduction

Les dispositifs électromécaniques utilisent souvent des aimants permanents ou des bobines comme source de champ magnétique [Lemarquand 98]. Autres dispositifs, tels que les capteurs [Kruzch 01] [Lemarquand 90], les micro-actionneurs ou les haut-parleurs [Ravaud 08] sont fabriqués également avec des aimants et des bobines. Dans des cas simples, ces systèmes peuvent être modélisés par des méthodes analytiques ou semi-analytiques. Cependant, le champ magnétique produit par un aimant permanent cylindrique peut être déterminé avec la même formulation analytique utilisée dans le cas d'une bobine cylindrique. En effet, pour la modélisation d'un aimant deux approches peuvent être adoptées : l'approche coulombienne et celle ampérienne. Dans l'approche coulombienne, un aimant cylindrique magnétisé axialement peut être remplacé par deux plans chargés situés sur les faces inférieures et supérieures du cylindre. Dans l'approche ampérienne, une bobine mince portant une densité de courant uniforme peut être aussi étudiée à la place d'un aimant. Ces calculs et hypothèses sont généralement basés sur l'application de la loi de Biot Savart. Lorsque les géométries sont très complexes, les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des équations aux dérivées partielles, et en général la résolution de ces équations EDP se fait par des méthodes numériques telles que les différences finies (MDF), les éléments finis (MEF), les volumes finis (MVF),...etc. Dans ce chapitre nous avons utilisé la méthode MVF, et cela pour deux raisons; la première est qu'elle est facile à concevoir contrairement à la MEF (et comme la MDF) et la deuxième raison elle peut être appliquée à des géométries complexes contrairement à la MDF (et comme la MEF).

## II.2 Modélisation semi-analytique

Hans Christian Oersted (1777-1851) découvre en 1819 qu'une aiguille aimantée est déviée avec un angle droit vers un courant électrique et il a établi ainsi la relation entre l'électricité et le magnétisme ; c'est la découverte qui fonde l'électromagnétisme. A la suite de l'expérience d'Oersted, Jean Baptiste Biot et Félix Savart effectuent une étude quantitative des interactions entre aimants et courants au cours de l'année 1820, ce qui conduira à la loi de Biot et Savart.

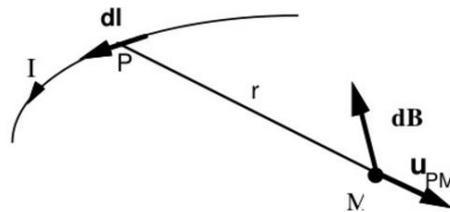


Figure II.1 Représentation relative à loi de Biot-savart.

Considérons un conducteur électrique Figure II.1 parcouru par un courant électrique I: la circulation de ce courant engendre une excitation magnétique en tout point de l'espace. En un point M, situé à une distance  $r$  d'un élément de courant de longueur  $\vec{dl}$  du circuit, ce vecteur d'excitation magnétique est défini par l'expression vectorielle suivante :

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \frac{dl \wedge r}{|r|} u \tag{II. 1}$$

$\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide.

**II.3 Modélisation d'une bobine**

En effet, la bobine se compose d'un nombre de spires, pour la modéliser il suffit de modéliser une seule spire. Par l'application de la loi de Biot-Savart sur une spire on procède à la décomposition de cette spire à plusieurs longueurs élémentaires  $\vec{dl}_i, i=1,2,\dots$  Figure II.2.

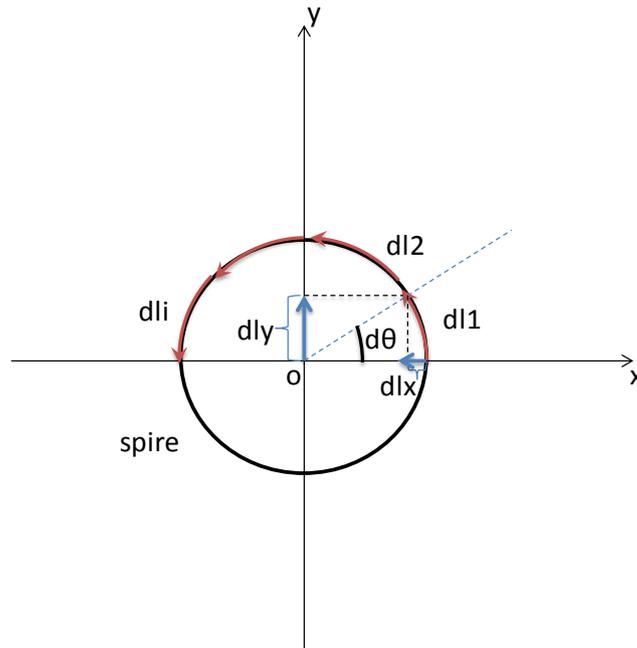


Figure II.2 Discretisation d'une spire.

Après, il en reste de déterminer les trois composantes de chaque longueur élémentaire  $\vec{dl}_x, \vec{dl}_y$  et  $\vec{dl}_z$  suivant les trois axes  $ox, oy$  et  $oz$  respectivement.

$$dl \begin{pmatrix} dlx \\ r * \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{II. 2}$$

Sachant que la spire se situe dans le plan  $(xy)$ . Avec  $r$  est le rayon de la spire. Le nombre total des longueurs élémentaires est donné comme suit:

$$n = \frac{2\pi}{d\theta} \tag{II. 3}$$

Avec  $d\theta$  est l'angle élémentaire comme défini sur la Figure II.2. L'application de la loi de Biot-Savart pour cette spire est :

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi PM^2} \frac{\vec{dl} \wedge \vec{PM}}{|PM|} \tag{II. 4}$$

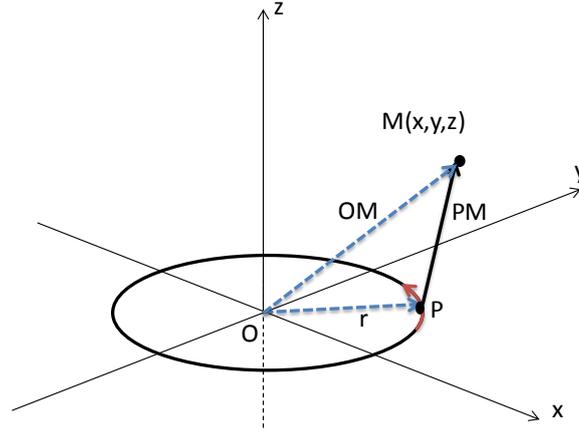


Figure II.3 Décomposition du vecteur  $\overrightarrow{PM}$ .

Tel que le vecteur  $\overrightarrow{PM}$ , Figure II.3 peut être déduit par la relation suivante :

$$\overrightarrow{PM} = \overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OP} \quad (II.5)$$

Par substitution de l'équation II.5 dans II.4, on obtient:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi(\overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OP})^3} (dl \wedge (\overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OP})) \vec{u} \quad (II.6)$$

Dont les deux vecteurs  $\overrightarrow{OM}$  et  $\overrightarrow{OP}$  sont définis par leurs trois composantes :

$$\overrightarrow{OM} \begin{pmatrix} M(x) \\ M(y) \\ M(z) \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{OP} \begin{pmatrix} r \sin(\vartheta) \\ r \cos(\vartheta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$M(x)$ ,  $M(y)$  et  $M(z)$  sont les coordonnées cartésiennes du point de calcul  $M$ , d'où :

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi \cdot [ (M(x) - r \sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r \cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k} ]^3} * [ (dl_x \vec{i} \wedge r \cos(\theta)\vec{j}) \wedge (M(x) - r \sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r \cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k} ] \vec{u} \quad (II.7)$$

L'analyse de cette équation conduit à déterminé les trois composantes de l'induction magnétique  $B$  dans l'espace par ses trois composantes :

$$dB_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl_{iy} \wedge M(z)}{[ (M(x) - r \sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r \cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k} ]^3} u_x \quad (II.8)$$

$$dB_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl_{ix} \wedge M(z)}{[ (M(x) - r \sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r \cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k} ]^3} u_y \quad (II.9)$$

$$dB_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl_{iy} \wedge [M(x) - r \sin(\theta)] - dl_{ix} \wedge [M(y) - r \cos(\theta)]}{[ (M(x) - r \sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r \cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k} ]^3} u_z \quad (II.10)$$

L'intégration de ces équations conduit à des intégrales :

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{dl_{iy} \wedge M(z)}{[ (M(x) - r \sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r \cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k} ]^3} u_x \quad (II.11)$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_0^{2\pi} \frac{dl_{ix} \wedge M(z)}{[(M(x) - r\sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r\cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k}]^3} u_y \quad (II. 12)$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_0^{2\pi} \frac{dl_{iy} \wedge [M(x) - r\sin(\theta)] - dl_{ix} \wedge [M(y) - r\cos(\theta)]}{[(M(x) - r\sin(\theta))\vec{i} + (M(y) - r\cos(\theta))\vec{j} + (M(z))\vec{k}]^3} u_z \quad (II. 13)$$

Pour une spire circulaire décomposée en n longueurs élémentaires, on obtient alors :

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} I \sum_{i=1}^n \frac{dl_{iy} \wedge PM_{iz}}{PM_i^3} u_x \quad (II. 14)$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} I \sum_{i=1}^n \frac{dl_{ix} \wedge PM_{iz}}{PM_i^3} u_y \quad (II. 15)$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} I \sum_{i=1}^n \frac{dl_{iy} \wedge PM_{ix} - dl_{ix} \wedge PM_{iy}}{PM_i^3} u_z \quad (II. 16)$$

Pour tenir compte les spires juxtaposées de la spire de calcul, suivant l'axe x, il suffit de rajouter au rayon de la spire de calcul ( $r_{s1}$ ) le diamètre du fil ( $d_{fil}$ ) comme suit :

$$r_{s+1} = r_{s1} + d_{fil} \quad (II. 17)$$

$r_{s+1}$  : Rayon de la spire suivante.

De même, pour passer aux spires juxtaposées suivant l'axe z, on a :

$$z_{s+1} = z_{s1} + d_{fil} \quad (II. 18)$$

Tenons compte des formulations précédentes, un code de calcul a été développé sous Matlab qui sert au calcul des trois composantes de l'induction magnétique dans n'importe quel point dans l'espace produites par une bobine cylindrique de dimensions quelconques. Pour se faire, il suffit d'introduire les données relatives aux dimensions de la bobine telles que le diamètre intérieur, le diamètre extérieur, le nombre de spires, le diamètre du fil et le courant ainsi que les coordonnées du point (ou points c.-à-d. trajectoire) de calcul. La Figure II.4 illustre l'organigramme du code de calcul développé. Dans cet organigramme,  $n_x$  représente le nombre de spires suivant l'axe x et  $n_z$  représente le nombre de spires suivant l'axe z.

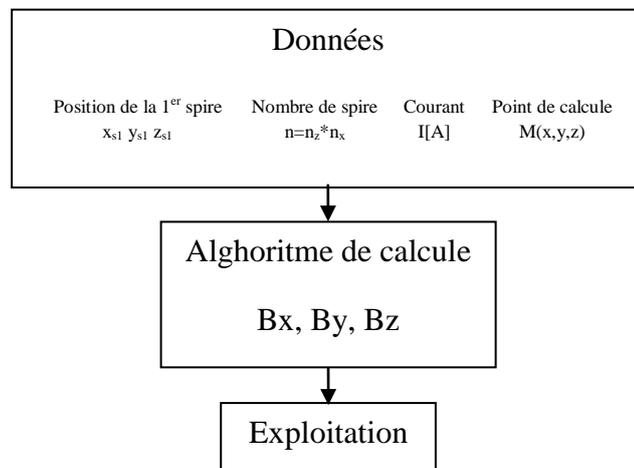


Figure II.4 Organigramme du code de calcul développé : induction d'une bobine.

Pour valider cette modélisation semi-analytique on a calculé la bobine de Helmholtz dont l'induction magnétique peut être calculée par la formule analytique suivante :

$$B(x) = \frac{\mu_0 n I r^2}{2(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (\text{II.19})$$

$r$  est le rayon des deux bobines constituant la bobine de Helmholtz et  $x$  est la distance entre ces deux bobines, dont sa valeur égale à la valeur du rayon. Cette dernière équation nous servira par la suite pour comparer les résultats obtenus par le code de calcul développé. Prenons par exemple un courant de 2.5A de même direction dans les deux bobines Figure II.5.

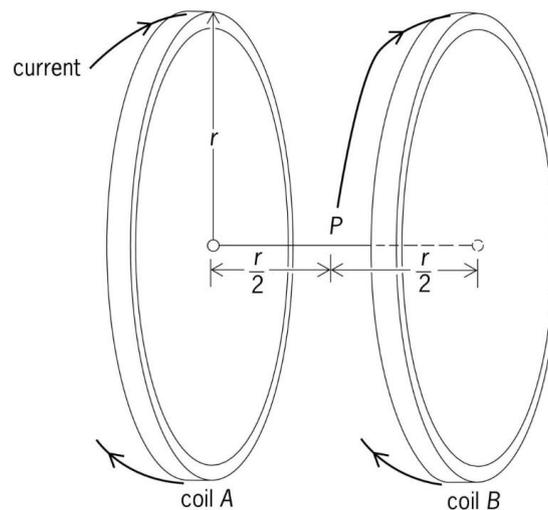


Figure II.5 Bobine de Helmholtz.

La Figure II.6 montre une comparaison entre la solution connue de la bobine Helmholtz donnée par l'équation (II.19) et la solution semi-analytique obtenue par le code développé. Cette confrontation nous a permis de valider le code de calcul qui peut être utilisé par la suite.

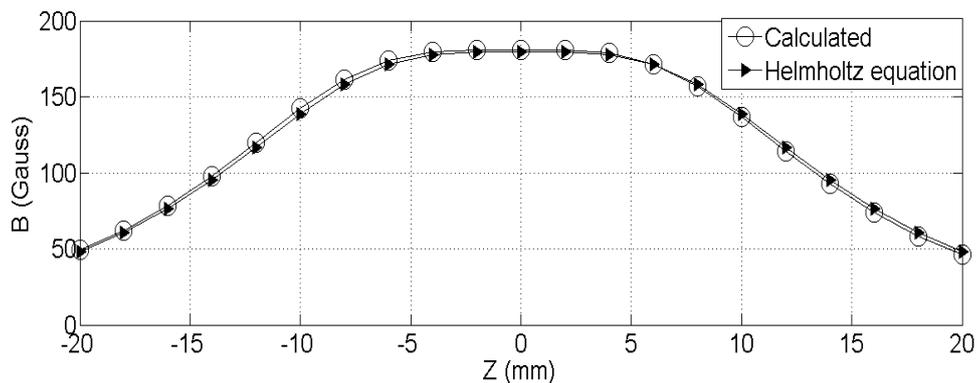


Figure. II.6 Comparaison de la composante z de l'induction magnétique : bobine de Helmholtz.

**II.4 Modélisation d'un aimant permanent**

Pour l'aimant permanent, il existe deux approches qui sont largement utilisées pour le calcul du champ magnétique. La première approche s'appelle l'approche colombienne tandis que la seconde s'appelle l'approche ampérienne [Ravaud 08].

**II.4.1 Approche colombienne**

Considérons un aimant permanent en forme de disque, qui est magnétisé axialement. Dans l'approche colombienne, l'aimantation axiale du disque est remplacée par des charges fictives localisées dans ses faces supérieures et inférieure Figure II.7.

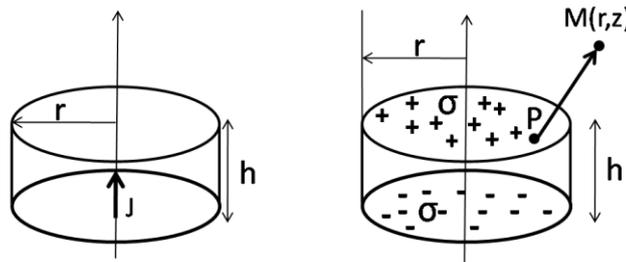


Figure. II.7 Approche colombienne d'un aimant permanent.

Dans ce cas, le champ magnétique est exprimé comme suit:

$$H(r,z) = \frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_0^r \left( \frac{\vec{PM}}{|\vec{PM}|^3} \right) r dr d\theta \tag{II. 20}$$

Où  $\sigma$  est la densité des charges fictives.

**II.4.2 Approche ampérienne**

Dans l'approche ampérienne, un aimant permanent peut être remplacé par une bobine mince de 'N' spires. Dans cette approche, l'aimantation axiale de l'aimant permanent est remplacée par une densité de courant fictif circulant autour de la bobine Figure II.8.

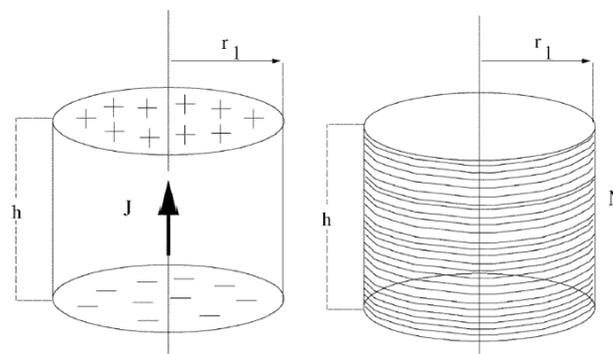


Figure. II.8 Modèle Ampérien d'un aimant permanent disque.

Dans ce cas, le champ magnétique créé par la bobine équivalente peut être exprimé par la loi de Biot-savart comme suit:

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot \vec{k}}{4\pi \cdot PM^3} (\vec{dl} \wedge \vec{PM}) \vec{u} \quad (II. 21)$$

Dans cette équation  $k$  représente le courant fictif exprimé ainsi par :

$$\vec{k} = \frac{\vec{J} \times \vec{n}}{\mu_0} \quad (II. 22)$$

Où  $J$  est l'aimantation de l'aimant permanent. Suivant le développement détaillé dans les sections précédentes, les trois composantes de l'induction magnétique sont exprimées par :

$$B_x = \frac{J}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{dl_{iy} \wedge PM_{iz}}{PM_i^3} \vec{u}_x \quad (II. 23)$$

$$B_y = \frac{J}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{dl_{ix} \wedge PM_{iz}}{PM_i^3} \vec{u}_y \quad (II. 24)$$

$$B_z = \frac{J}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{dl_{iy} \wedge PM_{ix} - dl_{ix} \wedge PM_{iy}}{PM_i^3} \vec{u}_z \quad (II. 25)$$

C'est ce modèle ampérien qui a été choisi pour la modélisation d'un aimant. Les équations correspondantes à ce modèle sont écrites dans un programme Matlab. Le programme de l'approche ampérienne ainsi développé permet la détermination des trois composantes de l'induction magnétique dans un point quelconque de l'espace ou suivant une trajectoire choisie par l'utilisateur. Ce programme permet également de tenir compte de plusieurs aimants permanents. Comme application, la Figure. II.9. représente les deux composantes axiale ( $B_z$ ) et radiale ( $B_r$ ) de l'induction magnétique relatives à un aimant permanent disque qui possède une aimantation axiale de 1.32 T.

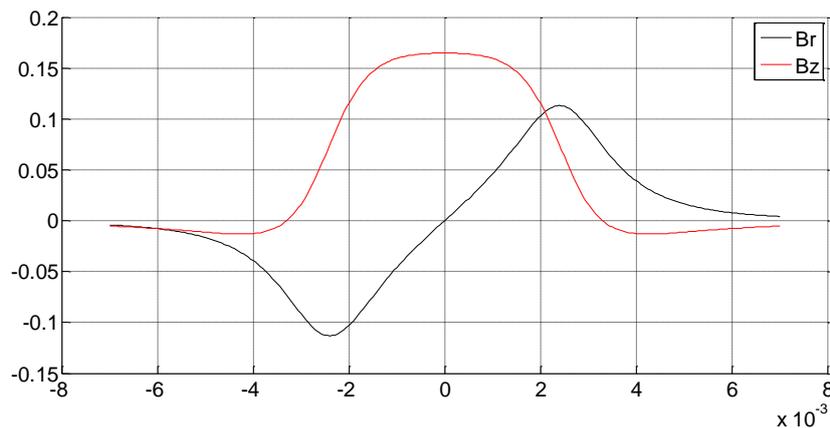


Figure. II.9 Composantes radiale et axiale d'un aimant permanent de 1.32T.

## II. 5 Modélisation numérique

Pour modéliser des systèmes électromagnétiques en tenant compte du couplage entre les circuits magnétiques et électriques, on est amené à résoudre un système d'équations différentielles. En ayant recours à une discrétisation spatiale, on aboutit à un système d'équations algébriques, dont les inconnues sont les valeurs nodales du potentiel vecteur.

## II. 6 Equations de Maxwell et lois de comportement

Les équations de Maxwell constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques, et qui unifient tous les principes de l'électromagnétisme. Ces équations dans les milieux continus sont les suivantes:

- Équation de Maxwell- Ampère :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_t \quad (\text{II.26})$$

- Équation de Maxwell- Faraday :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.27})$$

- Équation de conservation du flux magnétique:

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.28})$$

- Équation de Maxwell Gauss:

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$\vec{B}$  : Induction magnétique (T)

$\vec{D}$  : Induction électrique (C/m<sup>2</sup>)

$\vec{E}$  : Champ électrique (V/m)

$\vec{H}$  : Champ magnétique (A/m)

$\vec{J}_t$  : Densité du courant Total (A/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : Densité de charges volumiques (C/m<sup>3</sup>)

Tel que :

$$\vec{J}_t = \vec{J}_c + \vec{J}_D \quad (\text{II.30})$$

$\vec{J}_c$  : Densité du courant de conduction

$\vec{J}_D$  : Densité du courant de déplacement

Pour définir complètement les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu, on rajoute les lois de comportement des milieux ainsi que la loi d'Ohm généralisée :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.31})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.32})$$

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.33})$$

Où :

$\vec{B}_r$  : Vecteur de l'induction magnétique rémanente.

$\vec{J}_s$  : Densité du courant d'excitation ou de source [A/m<sup>2</sup>].

$\sigma \vec{E}$  : Densité des courants induits par variation du champ électrique [A/m<sup>2</sup>].

$\vec{\sigma}(\vec{u} \wedge \vec{B})$  : Densité des courants induits par mouvement [A/m<sup>2</sup>].

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  : Vecteur densité du courant de déplacement [A/m<sup>2</sup>].

$\vec{u}$  : Vecteur vitesse des pièces conductrices susceptibles de ce déplacé [m/s].

$\sigma$  : Conductivité électrique [S/m].

On a  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ , avec  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36 * \pi * 10^9}$  [F/m]. Tel que  $\varepsilon_0$  est la permittivité absolue du vide et

$\varepsilon_r$  est la permittivité relative du milieu. Aussi  $\mu = \mu_0 \mu_r$ , avec  $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$  [H/m], dans cette relation  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique absolue du vide et  $\mu_r$  est la perméabilité relative du milieu.

Pour décrire le modèle mathématique qui régit les phénomènes électromagnétiques en particulier dans le cas des systèmes électrotechniques, certaines hypothèses simplificatrices sont à considérer:

- La densité volumique de charge est considérée comme nulle ( $\rho=0$ ),
- Le terme  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  représente le courant de déplacement, il est généralement négligeable pour des fréquences basses.

## II. 7 Modèle magnétostatique

Les équations de Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivant les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables. Ces équations se découplent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons : le modèle électrostatique, le modèle électrocinétique, le modèle magnétostatique, et le modèle magnétodynamique. Dans le cadre de ce travail, seul le modèle magnétostatique sera considéré et détaillé. Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension ne varient pas dans le temps. En absence de la variation temporelle des champs magnétiques, on est amené à résoudre le modèle magnétostatique donné par :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s \quad (\text{II.34})$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (\text{II.35})$$

$\mathbf{J}_s$  représente la densité du courant source. On considère que les milieux sont linéaires, on ajoute à ces deux équations la loi constitutive suivante :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{II.36})$$

Les équations (II.34), (II.35) et (II.36) constituent ce qu'on appelle le modèle magnétostatique linéaire.

### II.7.1 Formulation magnétostatique en potentiel vecteur magnétique

Le modèle de la magnétostatique issu du système de Maxwell fait apparaître deux variables  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{H}$ . Suivant le type du problème étudié, différentes formulations permettant de calculer la distribution des champs, peuvent être utilisées. De nombreuses formulations ont été développées en deux ou en trois dimensions. Elles s'écrivent en termes de potentiel scalaire, en potentiel scalaire réduit [Sawa 90] ou en potentiel vecteur magnétique [Demerdach 90]. D'autres formulations utilisent l'induction magnétique  $\mathbf{B}$  comme inconnue ou une formulation mixte utilisant comme inconnues  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{H}$  [Alotto 98], ou une formulation qui utilise le champ magnétique  $\mathbf{H}$  comme variable [Kanayma 90]. La formulation la plus générale est celle en potentiel vecteur magnétique. Elle est très commode quand il s'agit des problèmes contenant plusieurs sources [Yun 97]. Dans le but de développer un code de calcul possédant un aspect général pour la résolution des problèmes magnétostatiques, nous avons opté pour cette formulation.

Compte tenu de l'équation (II.35), l'induction magnétique  $\mathbf{B}$  peut être exprimée comme suit :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{II.37})$$

On appelle  $\mathbf{A}$  le potentiel vecteur magnétique. La combinaison des équations (II.34), (II.36) et (II.37), conduit à la formulation magnétostatique en potentiel  $\mathbf{A}$  :

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s \quad (\text{II.38})$$

Où  $\nu$  est la reluctivité magnétique. La résolution de l'équation (II.38) nécessite la connaissance des conditions aux limites relatives au domaine d'étude. Une condition aux limites usuelles consiste à imposer un champ magnétique nul sur les limites  $\Gamma$ . Dans le calcul, on impose alors :

$$\mathbf{A} = 0 \text{ Sur } \Gamma \quad (\text{II.39})$$

Cette condition est dite condition de type Dirichlet. En présence d'un plan de symétrie, une autre condition dite de Newman peut être utilisée :

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0 \text{ sur } \Gamma_s \quad (\text{II.40})$$

Où  $\Gamma_s$  est le plan de symétrie de vecteur unitaire normal  $\mathbf{n}$  (Figure. II.10).

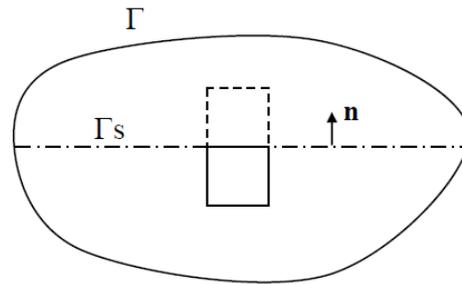
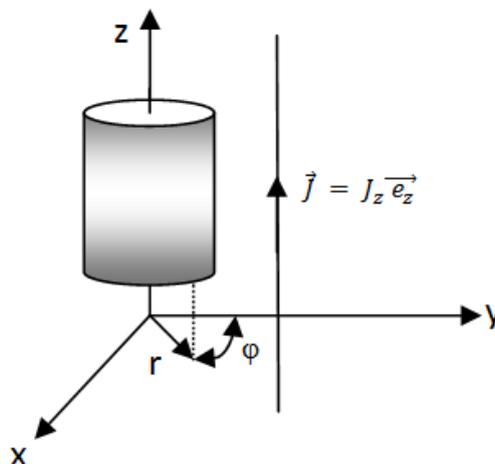


Figure .II.10 Schématisation d'un plan de symétrie.

### II. 7. 2 Formulation axisymétrique du problème magnétostatique

Dans le cas d'un dispositif électromagnétique présentant une symétrie de révolution par rapport à son axe, sa modélisation peut être ramenée à un modèle bidimensionnel. Rappelons qu'il existe deux types de systèmes bidimensionnels ; ceux infiniment longs alimentés suivant la direction ( $oz$ ), et ceux à symétrie de révolution alimentés selon la direction ( $\varphi$ ). Dans le premier cas Figure II.11, le champ électrique  $\vec{E}$  n'a qu'une seule composante suivant la direction ( $oz$ ). Le champ magnétique  $\vec{B}$  présente deux composantes suivant ( $\varphi$ ) et ( $or$ ), impliquent ainsi une composante pour le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  suivant la direction ( $oz$ ).

Figure II.11 Système bidimensionnel alimenté suivant la direction ( $oz$ ).

Dans le deuxième cas Figure. II.12, le champ magnétique  $\vec{B}$  possède alors deux composantes, l'une suivant la direction ( $or$ ) et l'autre suivant la direction ( $oz$ ), imposant ainsi pour le potentiel vecteur  $\vec{A}$  une seule composante suivant  $\varphi$ .

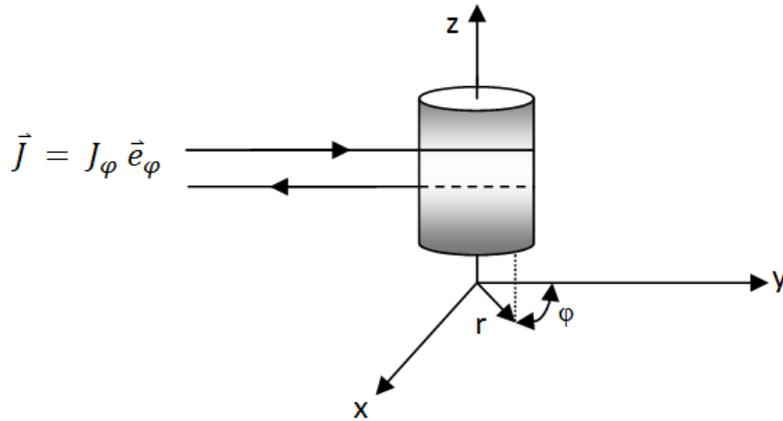


Figure. II.12 Système bidimensionnel alimenté suivant  $(\varphi)$ .

Appliquons la formulation en potentiel vecteur magnétique qu'on a choisie sur un système présentant un axe de symétrie (axisymétrique). Tous d'abord, rappelons la formulation générale formulée en potentiel vecteur magnétique :

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_s \tag{II.41}$$

Lorsque le courant est orienté suivant la direction  $(\varphi)$ , alors le potentiel vecteur est exprimé par  $\vec{A} = \vec{A}_\varphi$ . Dans ce cas, les différentes grandeurs ont les composantes suivantes :

$$J = \begin{cases} 0 & \vec{e}_r \\ J_\varphi & \vec{e}_\varphi \\ 0 & \vec{e}_z \end{cases} ; \quad E = \begin{cases} 0 & \vec{e}_r \\ E_\varphi & \vec{e}_\varphi \\ 0 & \vec{e}_z \end{cases} ; \quad A = \begin{cases} 0 & \vec{e}_r \\ A_\varphi & \vec{e}_\varphi \\ 0 & \vec{e}_z \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} B_r & \vec{e}_r \\ 0 & \vec{e}_\varphi \\ B_z & \vec{e}_z \end{cases} ; \quad H = \begin{cases} H_r & \vec{e}_r \\ 0 & \vec{e}_\varphi \\ H_z & \vec{e}_z \end{cases}$$

En coordonnées cylindriques, nous avons :

$$\text{rot} \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{e}_r & \vec{e}_\varphi & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_r & A_\varphi & A_z \end{vmatrix} \tag{II.42}$$

$$\text{rot} \vec{A} = \frac{1}{r} \left[ -\frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} \right] \vec{e}_r + \frac{1}{r} [0] \vec{e}_\varphi + \frac{1}{r} \left[ -\frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \right] \vec{e}_z \tag{II.43}$$

D'où :

$$\text{rot} \vec{A} = \frac{1}{r} \left[ -\frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} \right] \vec{e}_r + \frac{1}{r} \left[ -\frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \right] \vec{e}_z \tag{II.44}$$

Soit :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}\right) = \left[-\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}\right)\right] \vec{e}_\varphi \quad (\text{II.45})$$

Remplaçant le terme  $rA_\varphi$  par  $A^*$ , l'équation (II.47) en coordonnées cylindriques devient :

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial A^*}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial A^*}{\partial r}\right) = -J_s \quad (\text{II.46})$$

C'est une équation aux dérivées partielles, qui décrit le comportement magnétostatique d'un dispositif axisymétrique.

## II. 8 Méthodes numériques de résolution des équations EDP

### II. 8.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies (MDF) est une méthode basée sur le théorème de Taylor. Le domaine d'étude est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel. L'équation à résoudre est écrite pour chaque point ou nœud de la grille (maillage), pour cela on aura un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre des nœuds. Dans la pratique cette méthode est simple à programmer, néanmoins elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes. Alors, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières.

### II.8.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est une méthode qui a été utilisée en premier lieu en génie civil et en mécanique et n'a trouvé sa place en génie électrique que vers les années soixante. Dans cette méthode on cherche à exprimer une formulation intégrale basée soit sur la méthode des résidus pondérés soit sur la méthode variationnelle. La méthode des éléments finis consiste à subdiviser le domaine d'étude en domaines élémentaires appelés éléments finis et à représenter l'inconnue sur chaque élément par les fonctions d'interpolation simples en fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. L'inconnue devra vérifier globalement les conditions de continuité à l'interface et au passage d'un milieu à un autre. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle demande une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important.

### II.8.3 Méthode des intégrales de frontières

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La méthode des intégrales de frontières (MIF) permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. Le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème de Green-Ostrogradski. Cette méthode peut être intéressante pour l'étude de structure tridimensionnelle ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande

partie du domaine d'étude. Cependant, cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système algébrique à matrice pleine.

### II.9 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis (MVF) est une méthode de discrétisation, utilisée en particulier en mécanique des fluides, il y a une vingtaine d'années. Depuis, la méthode des volumes finis a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie scientifique : la thermique, l'électromagnétisme...etc. La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation performante, elle consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnu pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques [Cheriet 07]. La résolution d'une équation EDP par la MVF, consiste dans un premier temps à subdiviser le domaine d'étude en un nombre de volumes finis, dont chaque volume fini entoure un nœud principal (Figure. II.13).

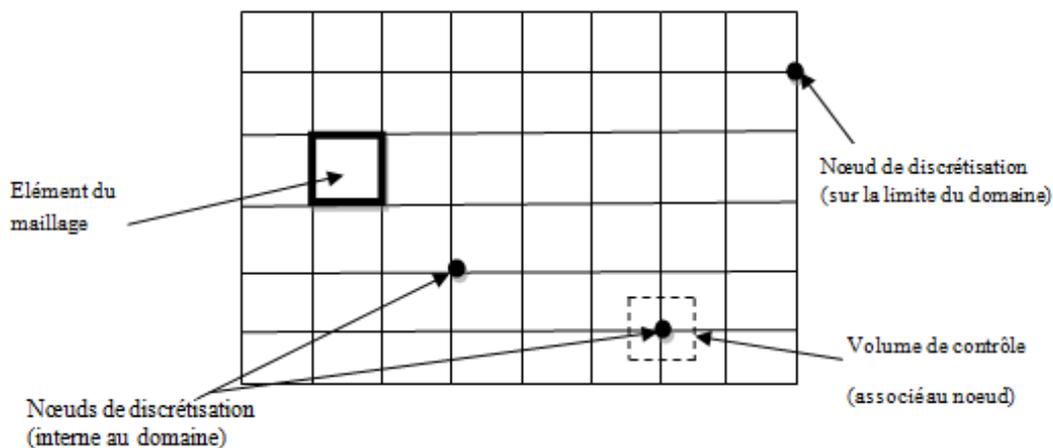


Figure. II.13 Maillage en volumes finis du domaine d'étude.

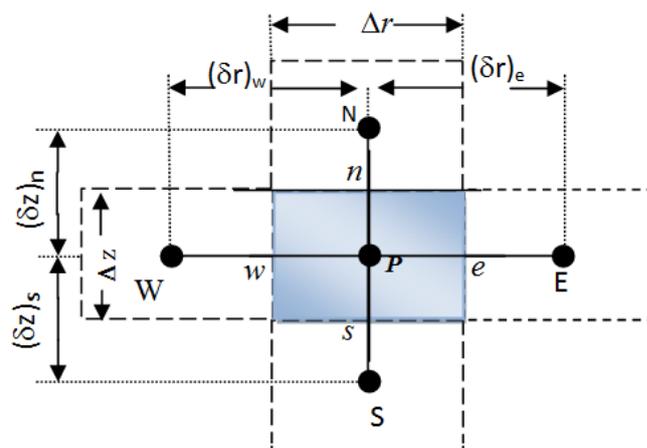


Figure. II.14 Description d'un volume fini.

Chaque nœud principal noté 'P' est entouré par quatre nœuds voisins celui du Nord 'N', du Sud 'S', de l'Est 'E' et de l'Ouest 'W'. Le volume fini de nœud principal 'P' est délimité par les facettes est 'e', ouest 'w', nord 'n' et sud 's' (Figure. II.14.).

Après cette discrétisation géométrique, procédons ensuite à l'intégration de l'équation EDP correspondante  $\nabla(U) = F$  dans un volume élémentaire dit 'principal', dont  $\nabla$  est un opérateur différentiel et  $F$  est une fonction connue, appelée terme source. Pour ce faire, souvent la fonction recherchée  $U$  est approximée par une fonction linéaire. Après intégration, nous obtenons une combinaison algébrique reliant  $U$  dans le volume élémentaire principal en fonction des  $U_i$  dans les volumes élémentaires voisins. Enfin, la réécriture de cette combinaison algébrique pour l'ensemble des volumes finis conduit à un système matriciel qu'on peut le résoudre par une méthode directe ou itérative.

### II.10 Prise en compte de mouvement des parties mobiles

Les parties mobiles sont très nombreuses dans les systèmes d'électrotechnique, comme par exemple dans les machines électriques (rotation du rotor). La modélisation de tels systèmes demeure nécessaire. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été développées pour ça, et qui font appel à la modélisation pour différentes positions de la partie mobile. La méthode la plus standard est celle basée sur la génération d'un nouveau maillage pour chaque position. Cette méthode dite de remaillage total conduit souvent à un travail préprocesseur fastidieux et coûteux.

#### II.10.1 Déformation de maillage

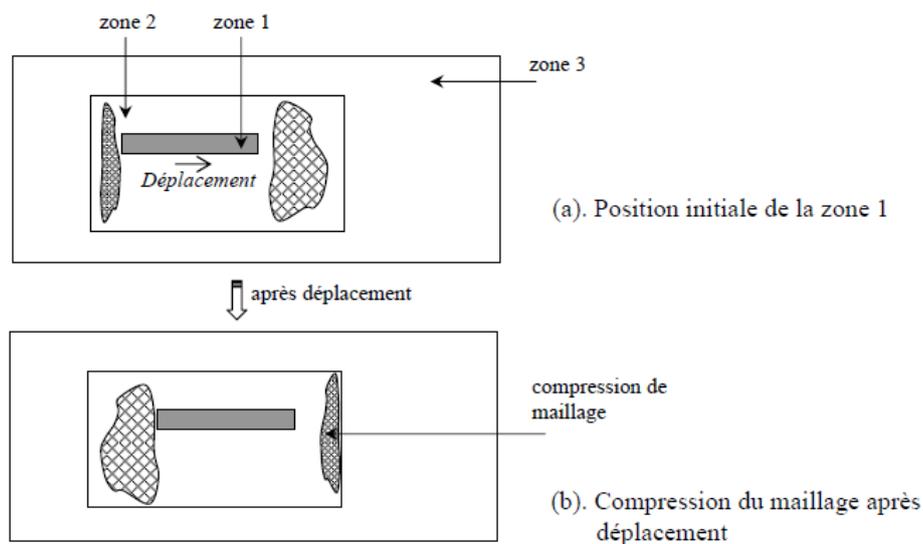


Figure II.15 Technique de la déformation du remaillage.

Cette méthode consiste à diviser le maillage du domaine en trois zones (Figure. II.15) :

- Zone 1 : Comprend la partie en déplacement (maillage mobile).
- Zone 2 : Entourant la zone 1, fait l'objet d'un maillage compressible pour chaque position de la zone 1.
- Zone 3 : Le reste de la géométrie (maillage fixe sans déformation).

Le choix d'un maillage de départ grossier suivant le sens positif du déplacement et fin dans le sens contraire, peut être utile pour éviter un taux important de compression. Notons que, malgré la déformation que subit le maillage de la zone 2, le maillage global constitué par les trois zones reste conforme [Cheriet 07].

### II.10.2 Bande du mouvement

La technique de la bande du mouvement est très utilisée souvent pour prendre en compte le mouvement dans les machines électriques. Dans le cas 2D, elle consiste à créer une zone intermédiaire (bande d'éléments conformes) entre les parties mobiles et fixes Figure. II.16.

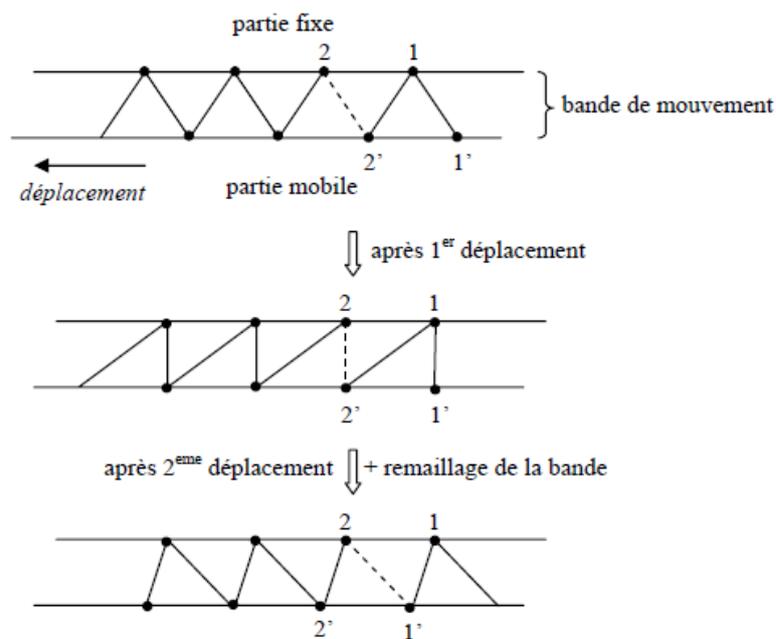


Figure. II.16 Technique de la bande de mouvement.

### II.10.3 Surface de glissement

Dans le cas 3D, les maillages des parties mobiles et fixes sont liés par l'intermédiaire d'une surface dite surface de glissement. Une telle technique impose une contrainte sur le maillage, cependant elle exige un pas de déplacement égal au multiple du pas de maillage de la zone de connexion. En plus, il faut s'assurer que le maillage reste conforme quel que soit le déplacement. Cette méthode est relativement facile à mettre en œuvre, elle utilise une permutation des inconnues au niveau de la surface de glissement. La Figure. II.17, illustre la méthode en 2D [Cheriet 07].

Durant le déplacement, les maillages des parties mobiles et fixes restent inchangés et le maillage de la bande de mouvement est modifié (distorsion d'éléments) afin d'assurer une meilleure connexion. Cependant, au fur et à mesure que le déplacement augmente, la distorsion des éléments de la bande augmente aussi. Lorsque la déformation est importante, il devient nécessaire de remailler la bande [Cheriet 07].

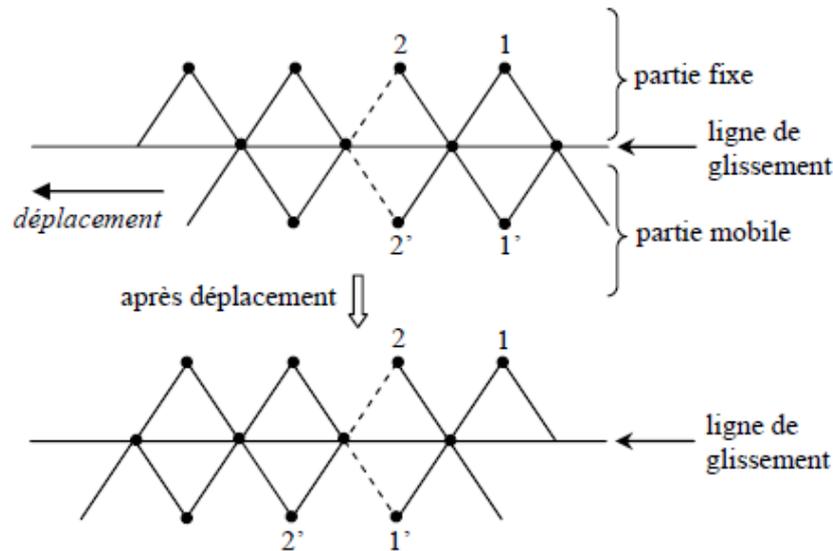


Figure .II.17 Technique de la ligne de glissement.

#### II.10.4 Maillage non-conforme

Dans la majorité des travaux traitant le terme du déplacement, sont les méthodes d'interpolations qui sont les plus employées. La plupart de ces travaux confirment l'efficacité des interpolations dans l'analyse des problèmes de déplacement. Dans ces méthodes, souvent les valeurs nodales du potentiel aux nœuds du maillage mobile sont exprimées par une fonction d'interpolation en fonction du potentiel aux nœuds du maillage fixe. La génération du maillage non-conforme, consiste dans un premier temps à décomposer le domaine de calcul en plusieurs blocs. A titre d'illustration, dans la Figure II.18 nous considérons le cas de deux blocs nommés  $\Omega_1$  de frontière  $\Gamma_1$  et  $\Omega_2$  de frontière  $\Gamma_2$ . Les blocs  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  sont appelés maillage mobile et maillage fixe, respectivement. Ces deux blocs sont interconnectés par une zone dite non-conforme (zone N-C). Les Blocs  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  sont connectés à la zone N-C à travers les frontières  $\Gamma_2$  et  $\Gamma_1$ , respectivement. Dans cette technique de maillage, le pas de déplacement de la partie mobile est indépendant du maillage contrairement aux techniques précédentes [Cheriet 07].

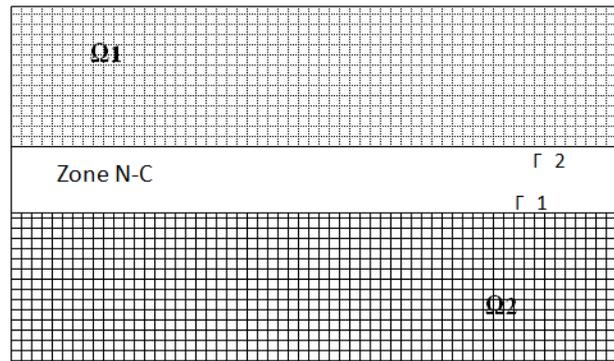


Figure II.18 Génération du maillage non-conforme.

II.10.5 Méthode de changement de propriétés physiques

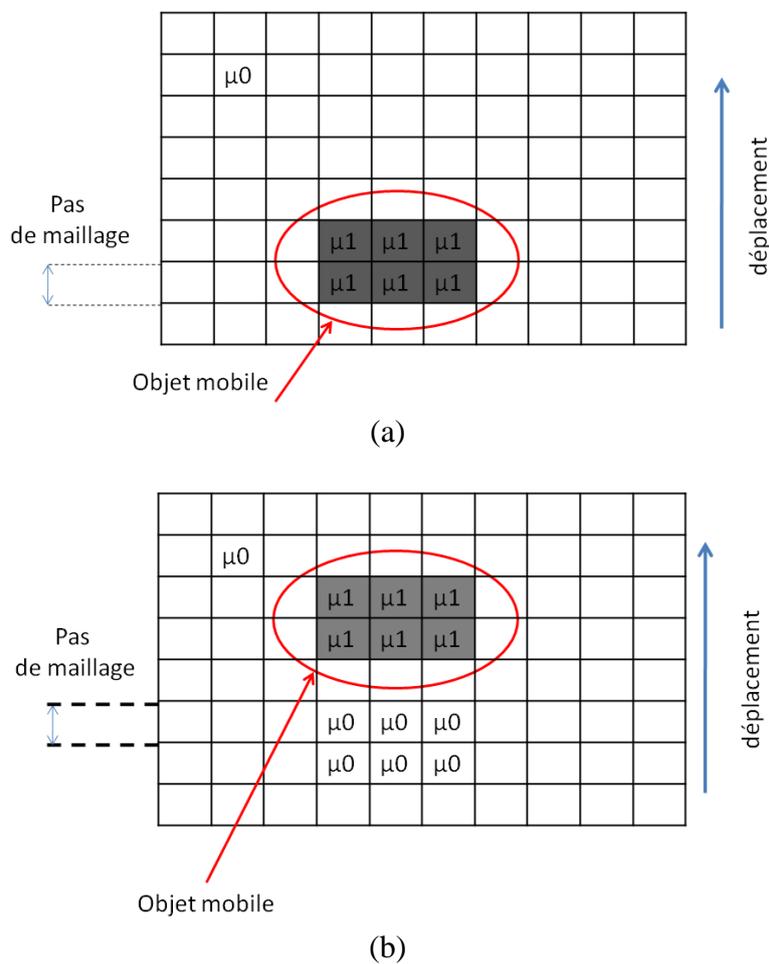


Figure II.19 Méthode de changement des propriétés physiques.  
 (a) avant déplacement, (b) après déplacement.

La méthode de changement des propriétés physiques est l'une des méthodes qui se caractérise par sa simplicité d'implémentation dans les applications présentant un déplacement. Cette méthode est basée sur la réaffectation des propriétés physiques des domaines. Quand un objet

est en déplacement il suffit de déplacer uniquement leur comportement physique sans remailler l'objet. Dans cette technique, le maillage doit être uniforme et régulier. Dans la Figure II.19 on suppose que l'objet mobile est le rectangle gris qui possède une propriété physique  $\mu_1$  dans un domaine qui a une propriété physique  $\mu_0$ . Le domaine est maillé par un maillage uniforme dont le pas de maillage est bien défini. Lors du déplacement, seulement la perméabilité magnétique est réaffectée.

### II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré deux méthodes qui sont utilisées pour la modélisation des dispositifs électromagnétique. D'abord la modélisation semi-analytique pour les systèmes qui ont des géométries simples. L'équation de Bio-Savart est utilisée pour le calcul des champs et par conséquent la force électromagnétique. Un code de calcul a été développé sous Matlab pour le calcul de la distribution des champs magnétiques pour des aimants permanent et des bobines. Puis nous avons présenté, les formulations ainsi que le modèle magnétostatique. En considération du type de l'application à traiter, le cas axisymétrique a été détaillé. Nous avons illustré également quelques méthodes numériques de discrétisation ainsi que les techniques du maillage pour la prise en compte du déplacement des parties mobiles.

## **Chapitre III Conception d'un micro-actionneur à aimants permanents**

### III.1 Introduction

La fonction d'un micro-actionneur est de transformer, souvent, l'énergie d'entrée électrique en énergie mécanique. Les micro-actionneurs basés sur le phénomène électromagnétique ou piézoélectrique sont les plus proposés et fabriqués. Par ailleurs, deux facteurs majeurs doivent être pris en considération ; économique et fabrication. Les micro-actionneurs à base de phénomènes électromagnétiques offrent un choix attractif du fait de nombreux avantages. Le principal avantage de l'actionnement électromagnétique par rapport à d'autres types d'actionneurs est la grande capacité de l'actionnement ainsi qu'ils présentent un mécanisme sans contact. En effet, l'actionnement électromagnétique est aussi le plus puissant, la raison pour laquelle il est universellement utilisé dans les moteurs. Dans ces systèmes, la force mécanique est produite par l'interaction des champs magnétiques des bobines et des aimants permanents. Le développement de nouvelles conceptions des micros-actionneurs demeure nécessaire. Dans ce chapitre nous proposons un micro-actionneur électromagnétique constitué de deux aimants permanents et de deux bobines. Dans un premier temps, une simulation semi-analytique a été effectuée, puis, et suite à l'insertion d'un matériau ferromagnétique une deuxième modélisation numérique par la MVF a été présentée. La caractéristique dynamique dans les deux modèles proposés du micro-actionneur, sans et avec matériau ferromagnétique, a été obtenue. Cette caractéristique dévoile le déplacement des aimants en fonction du temps. Afin de valider sa faisabilité et son fonctionnement, un premier prototype du micro-actionneur a été fabriqué.

### III.2 Conception du micro-actionneur proposé

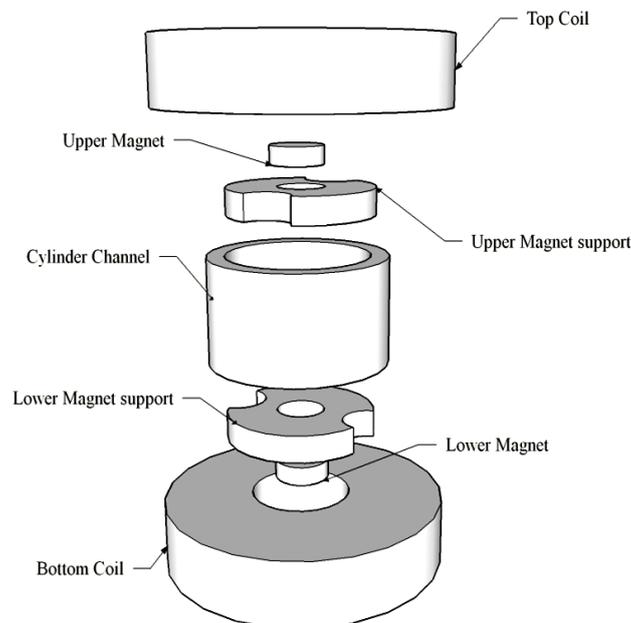


Figure. III.1 Eléments constitutifs du micro-actionneur électromagnétique proposé.

Le micro-actionneur proposé est constitué de deux aimants permanents sous forme d'un disque, chaque aimant a été fixé au centre d'un disque amagnétique. Les deux disques amagnétiques sont placés dans un cylindre creux de telle sorte qu'on aura une force de répulsion entre les aimants. A chaque extrémité du cylindre, on fixe une bobine Figure III.1. Les dimensions utilisées dans la conception ne sont pas forcément les dimensions optimales du micro-actionneur, mais permettent d'obtenir un ordre de grandeur représentatif des valeurs calculées.

### III.2.1 Principe de fonctionnement

Le mode d'actionnement souhaité pour ce nouveau concept du micro-actionneur consiste à déplacer verticalement les deux aimants à l'intérieur du canal cylindrique, par conséquent les disques, et cela par l'interaction des champs magnétiques créés par les aimants et les bobines. L'actionnement est réalisé avec un mouvement cyclique, où un cycle peut être subdivisé en trois étapes Figure III.2:

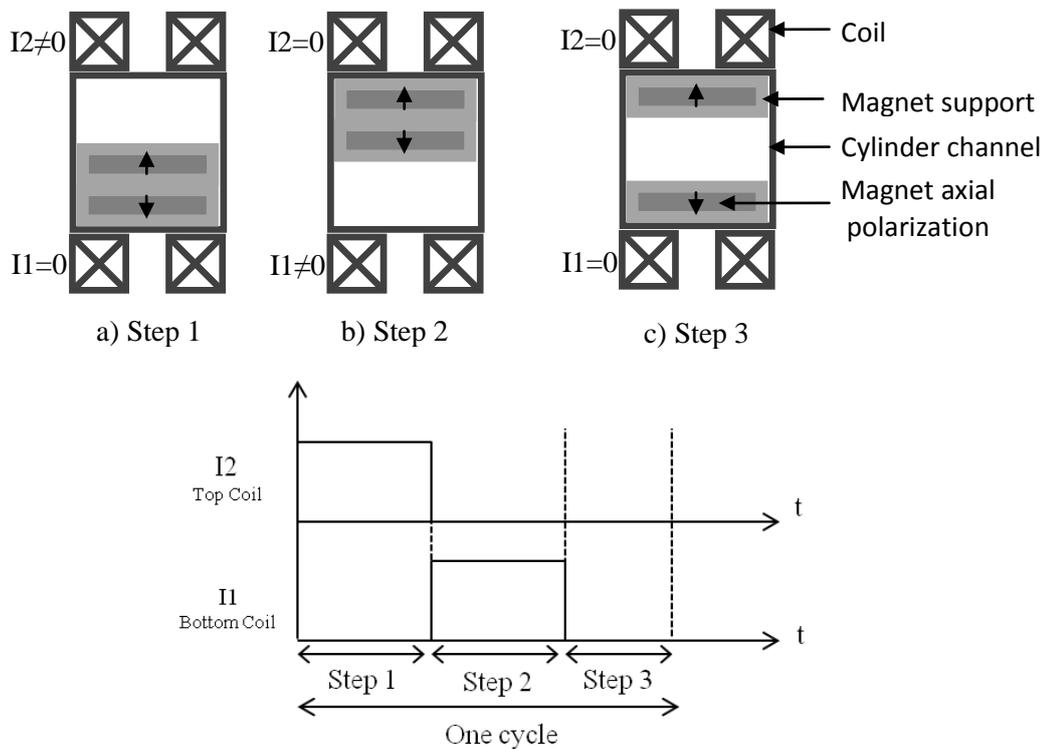


Figure III.2 Principe de fonctionnement du micro-actionneur proposé.

#### ➤ Première étape

La première étape d'actionnement se produit en excitant uniquement la bobine supérieure ( $I_1 = 0, I_2 \neq 0$ ). Alors, l'aimant supérieur est repoussé vers le bas à l'intérieur du canal cylindrique pour qu'il atteigne l'aimant inférieur. A la fin de cette étape, on se retrouve avec les deux disques amagnétiques collés à l'extrémité inférieure du cylindre.

➤ *Deuxième étape*

La deuxième étape d'actionnement se produit lorsque, en même temps, on désexcite la bobine supérieure et on excite la bobine inférieure ( $I_1 \neq 0, I_2 = 0$ ). Dans une telle situation, les deux aimants sont alors repoussés vers le haut simultanément comme un piston. A la fin de cette étape, on se retrouve avec les deux disques amagnétiques collés à l'extrémité supérieure du cylindre.

➤ *Troisième étape*

La troisième étape se manifeste lorsqu'on désexcite les deux bobines ( $I_1 = 0, I_2 = 0$ ), et en raison de la disposition des aimants, une force répulsive naturelle est produite entre eux de sorte que chaque aimant atteigne une extrémité. A la fin de cette étape, on se retrouve avec les deux disques amagnétiques séparés, chaque disque est collé à une extrémité.

### III.3 Modélisation semi-analytique du micro-actionneur

Le modèle géométrique du micro-actionneur proposé est illustré dans la Figure III.3. Les dimensions préliminaires sont proposées de telle sorte que le déplacement maximal d'un aimant soit de l'ordre de 3mm. Le disque amagnétique (support de l'aimant) est d'une épaisseur de 2.5mm, dont 1mm est l'épaisseur de l'aimant. Par cela, on assure une distance entre aimants de l'ordre de 3mm lorsque les deux disques amagnétiques sont collés. La bobine est réalisée avec 2500 spires. Les aimants utilisés sont de type NedFerB qui ont une aimantation axiale de l'ordre de  $B=1.32T$ .

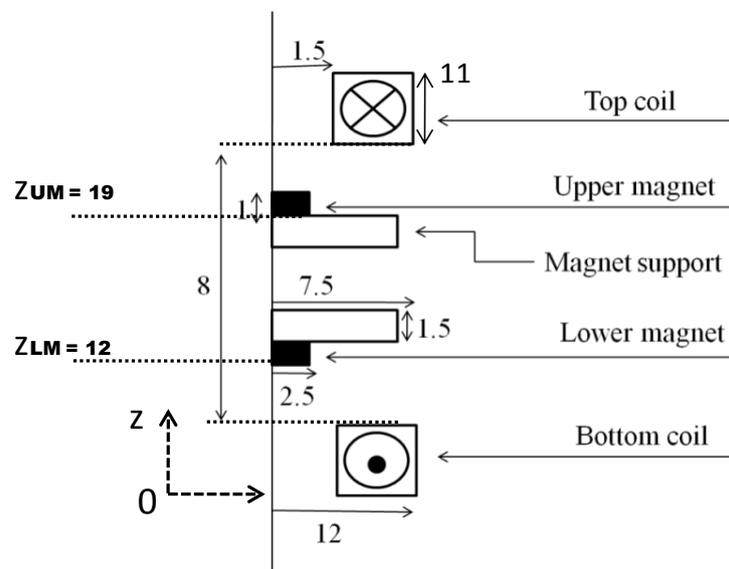


Figure. III.3 Dimensions du micro-actionneur proposé, en mm.

La modélisation du micro-actionneur proposé peut se faire en modélisant le système aimants-bobines, par l'utilisation du code de calcul semi-analytique développé dans le chapitre II. Afin d'accomplir cette modélisation, il est indispensable de coupler l'équation mécanique.

### III.3.1 Equation mécanique

La partie dynamique du dispositif est régie par l'équation mécanique suivante :

$$m \frac{d^2}{dt^2} X(t) = F_x(t) + mg \quad (\text{III. 1})$$

F est la force, m est la masse, X représente le déplacement et V est la vitesse. On a :

$$F_x(t) = m \frac{d}{dt} V_x(t) \quad (\text{III. 3})$$

$$\Delta V_x = \frac{F_x(t)}{m} \Delta t \quad (\text{III. 4})$$

$$V_{x_{t+1}} = V_{x_t} + \frac{F_x(t)}{m} (t_{t+1} - t_t) \quad (\text{III. 5})$$

Or:

$$V_{x_{t+1}} = \frac{x_{t+1} - x_t}{t_{t+1} - t_t} \quad (\text{III. 6})$$

Alors :

$$x_{t+1} = x_t + V_{x_t} \Delta t + \frac{F_x(t)}{m} (t_{t+1} - t_t) \quad (\text{III. 7})$$

L'équation itérative (III.7) représente la position du disque en mouvement en fonction de sa position initiale, de la force appliquée ainsi que sa vitesse de déplacement. Cette équation a été implémentée dans le code de calcul électromagnétique semi-analytique développé dans le chapitre II.

### III.3.2 Choix du courant et caractéristiques dynamiques des aimants

D'après le principe de fonctionnement décrit précédemment, lorsque les deux bobines ne sont pas alimentées ( $I_1 = 0$ ,  $I_2 = 0$ ), l'aimant supérieur (UM) est situé à l'extrémité supérieure du cylindre, dont sa position est de  $z_{UM} = 19\text{mm}$ , voir le modèle géométrique défini précédemment dans la Figure III.3. Par contre, l'aimant inférieur (LM) est situé à l'extrémité inférieure du cylindre dont  $z_{LM} = 12\text{mm}$ . Dans cette configuration, les faces intérieures des deux aimants sont distantes de 6mm. L'espace entre les deux disques amagnétiques est de l'ordre de 3mm, cette distance représente « la course » désirée pour le micro-actionneur. Le problème ici consiste à évaluer le courant  $I_2$  de la bobine supérieure pour qu'il produise une force magnétique suffisante afin que le disque amagnétique supérieur rejoigne le disque amagnétique inférieur. Autrement dit, la force magnétique produite par  $I_2$  doit être supérieure à la force de répulsion naturelle entre les deux aimants au cours de la course qui est de 3mm. Si cette condition est bien vérifiée, l'aimant supérieur atteint alors sa position finale (fin de course) qui est  $z_{UM} = 16\text{mm}$  ( $19\text{mm} - 3\text{mm}$ ). Pour déterminer cette valeur de  $I_2$  nécessaire au bon fonctionnement du micro-actionneur, une série d'essais avec différents valeurs de  $I_2$  sont effectués.

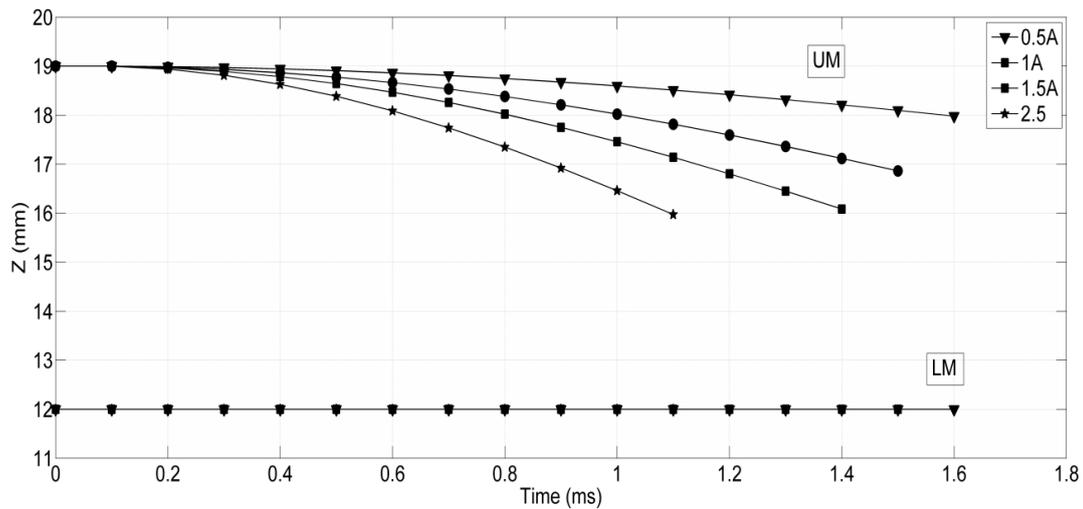


Figure III.4 Déplacement de l'aimant supérieur pour différents valeurs de  $I_2$ , avec  $I_1=0$ .

Comme le montre la Figure III.4, le courant  $I_2$  nécessaire pour que l'aimant supérieur rejoigne l'aimant inférieur, dans un temps réduit, est de l'ordre de 2.5A. On observe que l'aimant supérieur a atteint sa position finale désirée ( $z_{UM} = 16\text{mm}$ ) dans 1.1ms. A cette position, la force appliquée sur l'aimant supérieur produite par  $I_2$  est supérieure à la force de répulsion naturelle entre les deux aimants. On conclue que le temps écoulé pendant cette première étape de fonctionnement ( $I_1 = 0, I_2 = 2.5\text{A}$ ) est de l'ordre de 1.1ms. La Figure III.5 illustre les forces magnétiques totales appliquées sur les deux aimants pendant cette première étape de fonctionnement.

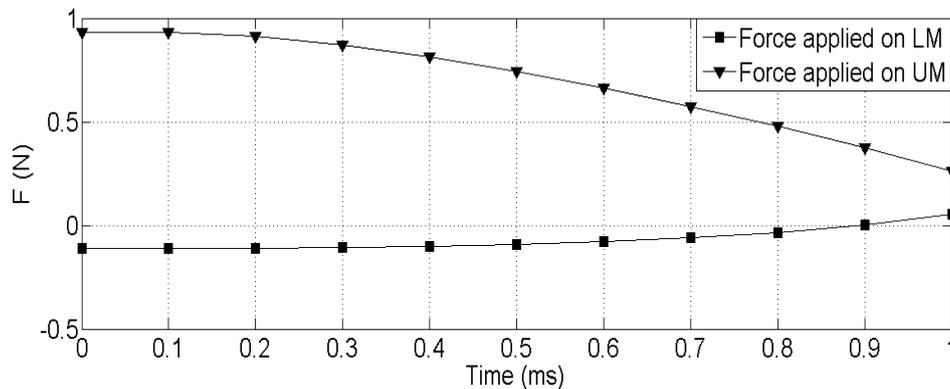


Figure III.5 Forces magnétiques appliquées sur les deux aimants pour  $I_1 = 0$  et  $I_2 = 2.5\text{A}$ .

La deuxième étape se manifeste lorsque la bobine inférieure est alimentée par un courant  $I_1 = 2,5\text{A}$  (même valeur que  $I_2$ ) et en même temps la bobine supérieure est désexcitée  $I_2 = 0$ . Pendant cette deuxième étape, les deux aimants se déplacent ensemble verticalement vers le haut pour atteindre l'extrémité supérieure du cylindre. La Figure III.6 montre les forces magnétiques appliquées sur les deux aimants au cours de cette étape. On observe que la force magnétique appliquée à l'aimant inférieur est plus grande que la force magnétique appliquée à

l'aimant supérieur, cette supériorité de forces est très indispensable afin que les deux disques amagnétiques restent collés à l'extrémité supérieure du cylindre. D'après la Figure III.7, on observe que le temps écoulé pendant cette deuxième étape est de l'ordre de 1.1ms (2.2ms-1.1ms).

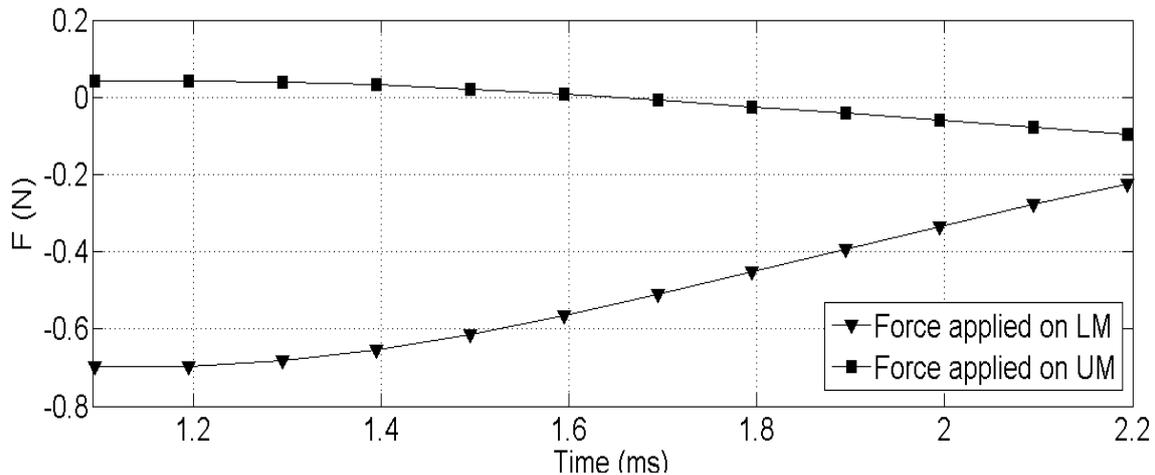


Figure III.6 Forces magnétiques appliquées sur les deux aimants pour  $I_1 = 2.5A$  et  $I_2 = 0$ .

La troisième étape commence lorsqu'on désactive les deux bobines ( $I_1=0$ ,  $I_2 = 0$ ). Dans telle situation, due à la force magnétique de répulsion entre les deux aimants, les deux disques amagnétiques sont alors séparés, et par conséquent le disque amagnétique supérieur rejoint l'extrémité supérieure du cylindre tandis que le disque amagnétique inférieur rejoint l'extrémité inférieure du cylindre. La Figure III.7 montre que les forces magnétiques appliquées sur chaque aimant. Due à la symétrie du micro-actionneur, on observe que les deux forces sont presque identiques. Les signes (+/-) des forces traduisent le sens du déplacement. A la fin de la course, c.-à-d. fin de la troisième étape, les deux forces valent approximativement en valeur absolue 0,05N. Le temps écoulé pendant cette troisième étape est de l'ordre de 2.2ms (4.4ms-2.2ms).

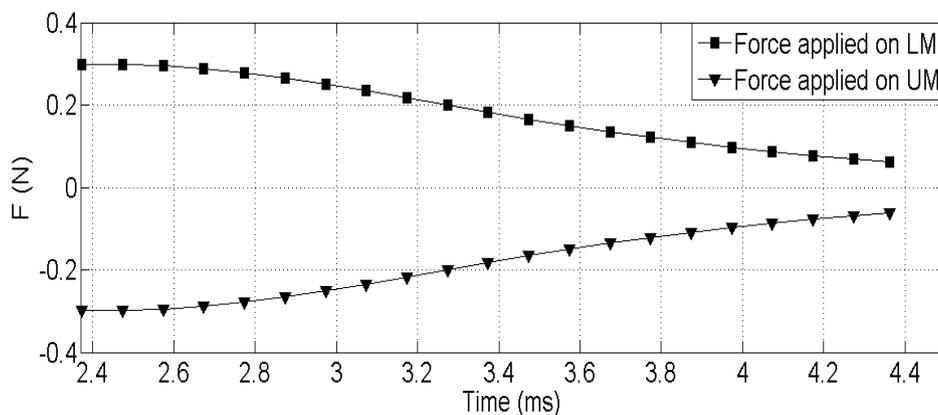


Figure III.7 Forces magnétiques appliquées sur les deux aimants pour  $I_1 = 0$  et  $I_2 = 0$ .

La caractéristique dynamique globale du micro-actionneur relative aux trois étapes de fonctionnement (un cycle) est représentée sur la Figure III.8. Pendant la première étape, l'aimant supérieur a déplacé de sa position initiale  $z_{UM} = 19\text{mm}$  jusqu'à sa position finale  $z_{UM} = 16\text{mm}$ , avec un déplacement de 3mm. Puis, pendant la deuxième étape, les deux aimants ont déplacé ensemble, dont l'aimant inférieur a déplacé de sa position initiale  $z_{LM} = 12\text{mm}$  jusqu'à sa position finale  $z_{LM} = 15\text{mm}$ , et l'aimant supérieur regagne sa position initiale. Finalement, dans la troisième étape, l'aimant inférieur revient à sa position initiale  $z_{LM} = 12\text{mm}$ . On constate qu'un cycle d'actionnement est de l'ordre de 4.4ms.

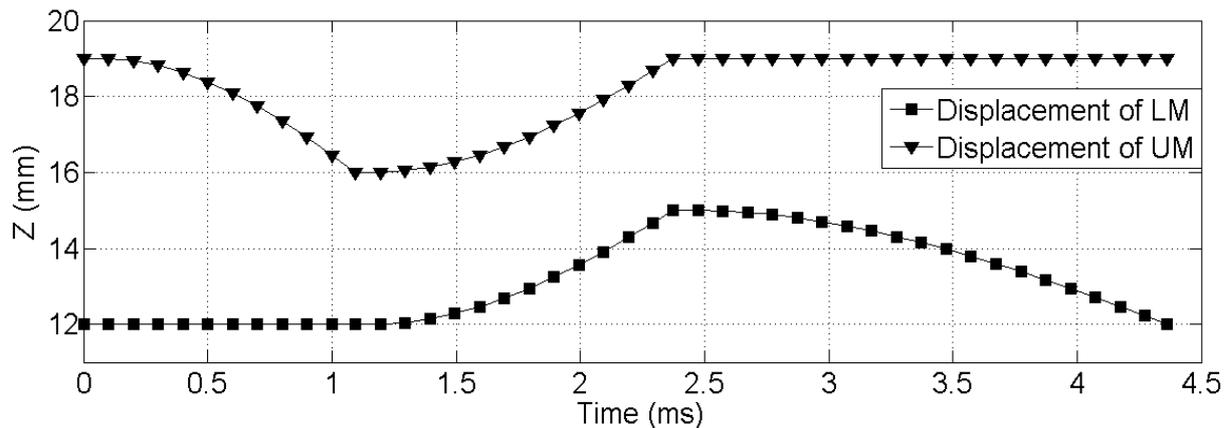


Figure III.8 Caractéristique dynamique globale du micro-actionneur.

La Figure III.9 montre les vecteurs de l'induction magnétique à la fin de chaque étape d'actionnement. La bobine alimentée est représentée par deux rectangles rouges, et les deux aimants par des rectangles bleus. On observe clairement que le champ magnétique est distribué dans l'espace sans aucune canalisation (absence des matériaux ferromagnétiques). Cependant, les pertes sont élevées parce que le circuit magnétique équivalent n'est pas fermé. C'est pour cela que le courant qui assure l'actionnement est élevé par rapport au nombre de spires de la bobine qui est 2500 spires.

Les résultats obtenus peuvent être améliorés en minimisant les pertes dues à l'absence des matériaux ferromagnétiques, qui sont indispensables afin de canaliser le champ magnétique créée par les bobines et par conséquent augmenter les forces magnétiques. Pour ce faire, nous avons pensé à insérer un noyau de fer au centre de chaque bobine Figure III.10.

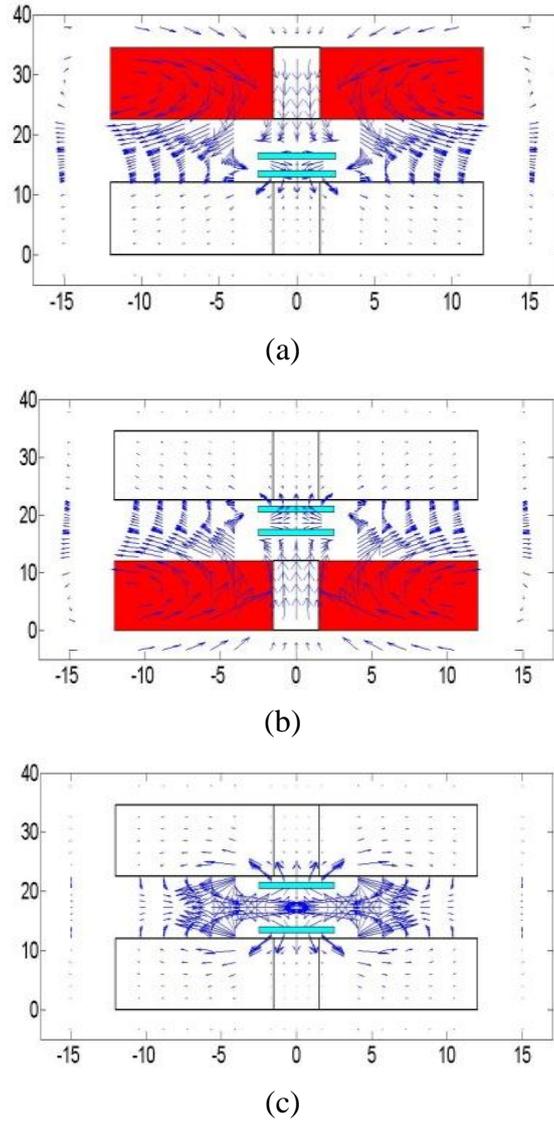


Figure III.9 Illustration des vecteurs de l'induction magnétique

- (a) Première étape  $I_1 = 0$  et  $I_2 = 2.5A$ ,
- (b) Deuxième étape  $I_1 = 2.5A$  et  $I_2 = 0$ ,
- (c) Troisième étape  $I_1 = 0$  et  $I_2 = 0$ .

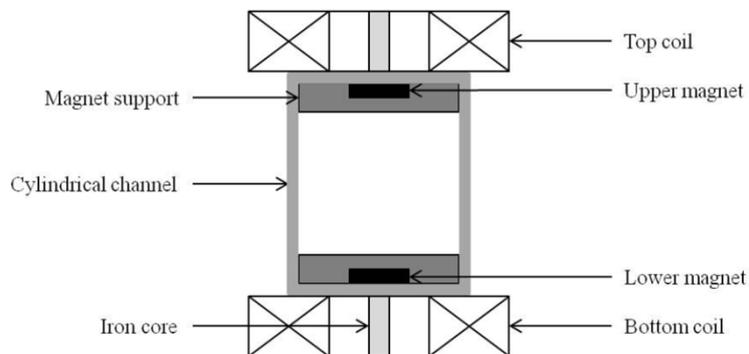


Figure III.10 Insertion des noyaux de fer.

Cette solution, a pour objectif de réduire les pertes et perfectionner l'actionnement. Cependant, il est impératif de recourir à une modélisation numérique afin d'extraire la caractéristique dynamique de ce micro-actionneur.

### III.4 Modélisation numérique du micro-actionneur à noyaux de fer

Pour résoudre le problème électromagnétique correspondant, nous avons utilisé le code de calcul axisymétrique développé dans le chapitre II, utilisant la méthode MVF comme méthode de discrétisation. Le modèle géométrique du micro-actionneur avec noyaux de fer ainsi que son maillage volumes finis triangulaires sont représentés sur la Figure III.11. La simulation de la première étape ainsi que la troisième étape de fonctionnement a pour objectif de déterminer la nouvelle valeur du courant de fonctionnement, c.-à-d. avec la présence des noyaux de fer.

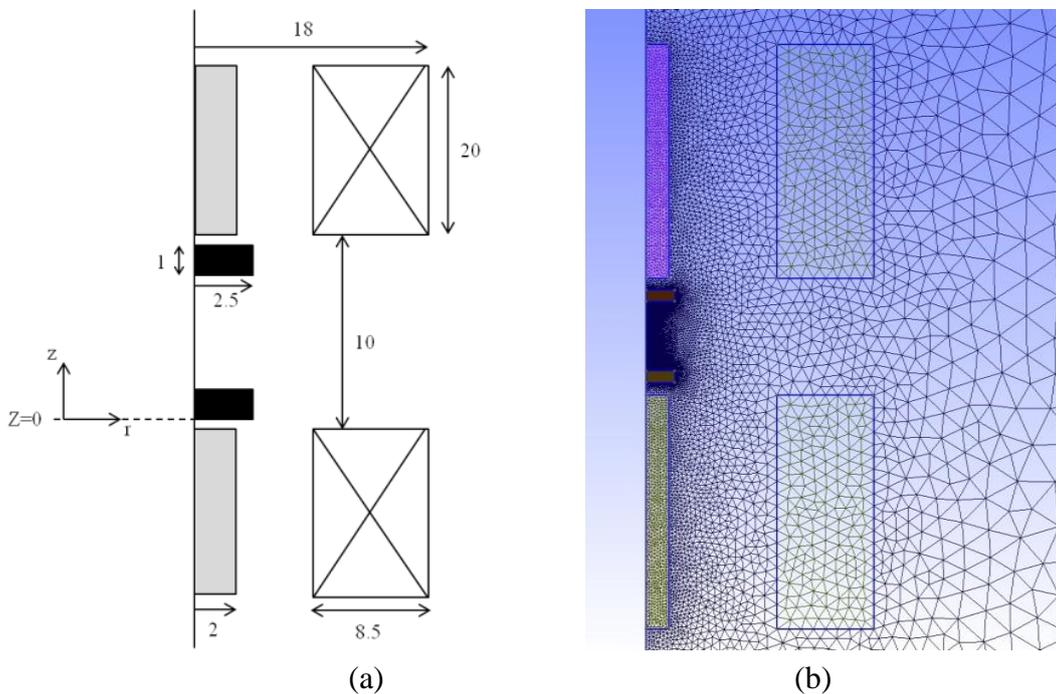


Figure III.11 Micro-actionneur avec noyaux de fer.

(a) Modèle géométrique, (b) Maillage triangulaire.

Dans cette modélisation, nous avons considéré d'autres dimensions des deux bobines qui sont acquises au niveau de notre laboratoire. En suivant la même analyse précédente relative au choix du courant de fonctionnement, nous avons obtenu un courant  $I_2=1.65A$  largement suffisant pour assurer le bon fonctionnement du micro-actionneur. Cette valeur du courant relativement réduite est due à la présence des noyaux de fer.

Les résultats numériques obtenus par la méthode FVM de la première et la troisième étape de fonctionnement et qui sont relatifs à la dynamique de l'aimant supérieur sont montrés dans la Figure III.12. L'aimant supérieur prend 3,2ms pour se déplacer de sa position initiale (extrémité supérieure du cylindre) vers l'extrémité inférieure du cylindre. Le déplacement de cet aimant est réalisé alors de la position initiale  $z=7mm$  jusqu'à sa position finale  $z=4 mm$ ,

avec une course de 3mm. Et il prend environ 4,8ms pour se déplacer de nouveau vers le haut, de  $z=4\text{mm}$  pour atteindre sa position initiale  $z=7\text{mm}$ .

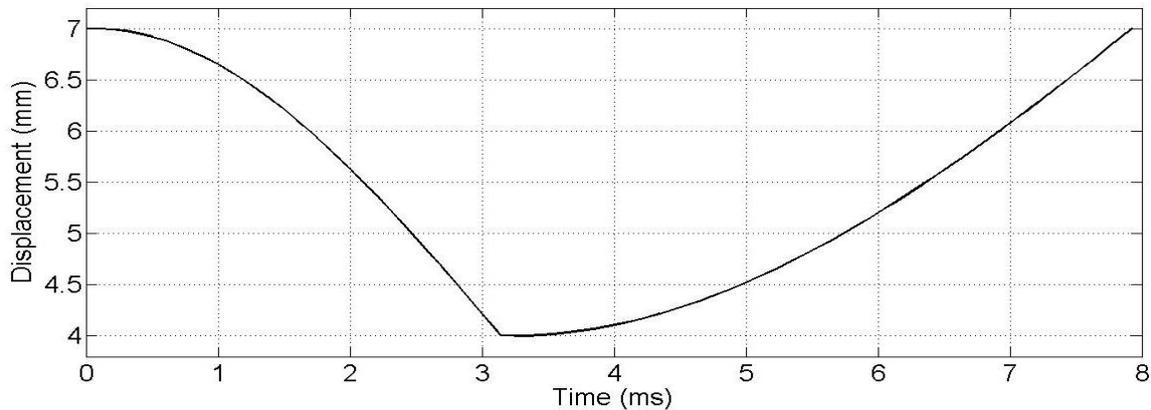


Figure III.12 Caractéristique dynamique de l'aimant supérieur obtenue par la MVF.

### III.5 Fabrication du micro-actionneur et validation expérimentale

Afin de valider le principe de fonctionnement, un prototype du micro-actionneur proposé a été fabriqué à l'aide des éléments conventionnels disponibles Figure III.13. Il comporte deux aimants 1.3T type NdFeB de 5mm de diamètre et 1mm d'épaisseur, et deux bobines de cuivre identiques avec un diamètre extérieur de 36mm, un diamètre intérieur de 19mm et une hauteur de 20mm. Chaque aimant est fixé au centre d'un disque aluminium fabriqué avec 2,5mm d'épaisseur et 15mm de diamètre. Les deux disques sont percés au centre par un trou de 5mm de diamètre afin de fixer l'aimant. Le canal cylindrique qui loge les disques est un tube en plastique de 10mm de longueur et 15mm de diamètre. Pour maximiser le champ magnétique, un noyau de fer cylindrique de 4mm de diamètre est inséré au centre de chaque bobine.

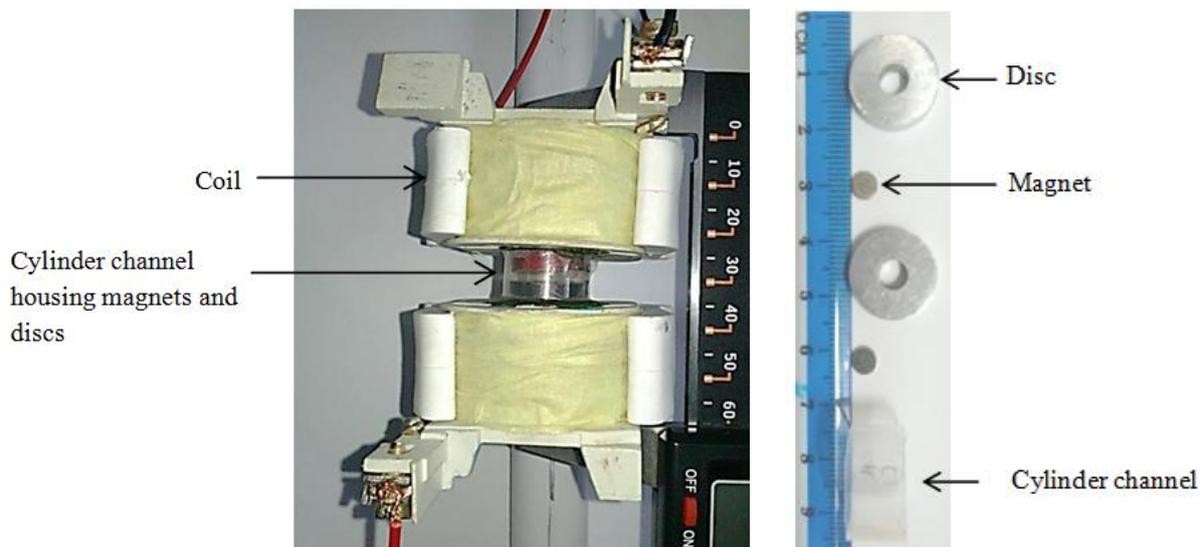


Figure III.13 Fabrication du micro-actionneur proposé.

(a) Prototype expérimentale (b) Éléments constitutifs.

### III.5.1 Mesure expérimentale de la dynamique des aimants

La caractéristique dynamique expérimentale de l'actionnement, c'est-à-dire le déplacement des aimants en fonction du temps, est mesurée en utilisant un capteur de déplacement optoélectronique montré dans la Figure III.14. La tension de sortie du capteur est en fonction de sa surface exposée à la lumière (éclairante). Une fois l'aimant se déplace, la tension de sortie du capteur est enregistrée en temps réel via une carte d'acquisition NI-DAQ. A l'aide d'une application LabVIEW appropriée, la tension acquise est traduite en déplacement. De plus, cette application LabVIEW a pour fonction de contrôler l'alimentation électrique des bobines en utilisant à la sortie de la carte NI-DAQ un amplificateur de puissance. Ici, seule la caractéristique dynamique de l'actionnement de l'aimant supérieur est mesurée et, par conséquent, seule la bobine supérieure sera alimentée par un courant de 1.65A Figure III.15.

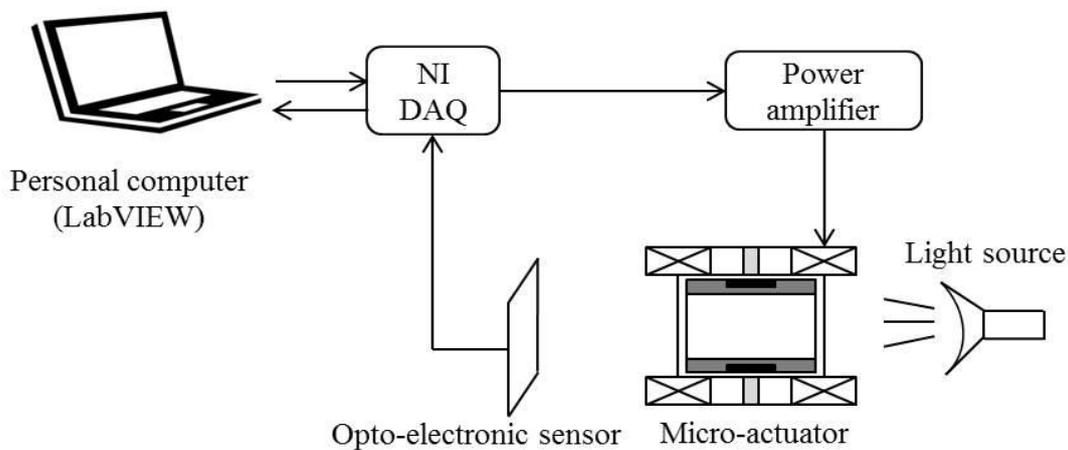


Figure III.14 Mesure de la caractéristique dynamique de l'aimant supérieur.

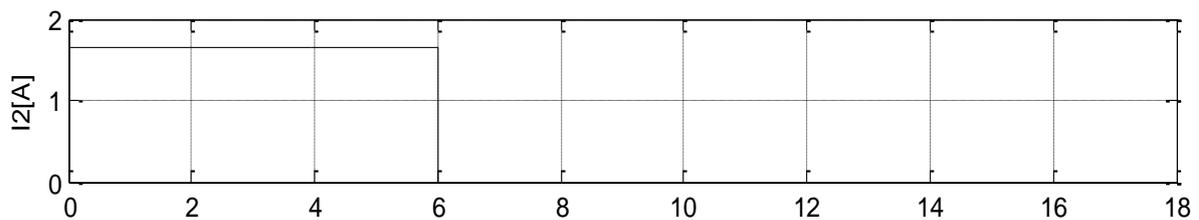


Figure III.15 Courant d'alimentation de la bobine supérieure.

La caractéristique dynamique expérimentale de l'aimant supérieur est représentée sur la Figure III.16. On remarque que de 0 à 6ms, où la bobine supérieure est alimentée par un courant 1.65A, l'aimant supérieur est repoussé vers le bas de sa position initiale 7mm à la position 4mm, pour qu'il atteigne l'aimant inférieur. Ici 0mm est référencier à la face inférieure de l'aimant inférieur. Ensuite, de 6ms à 17ms, la bobine supérieure est désexcitée, c'est pourquoi l'aimant supérieur remonte de nouveau pour regagner sa position initiale

(extrémité supérieure du canal cylindrique). La Figure III.17 illustre une confrontation entre les résultats numériques et expérimentaux relatifs à la caractéristique dynamique de l'aimant supérieur. Comme les frottements ne sont pas pris en compte dans l'équation mécanique, on observe que le temps écoulé dans la caractéristique numérique est inférieur à celui de l'expérimentation. Les caractéristiques expérimentales et numériques de l'actionnement montrent tous les deux que la force électromagnétique appliquée sur l'aimant est suffisante pour assurer un bon fonctionnement du micro-actionneur proposé. Figure III.18.

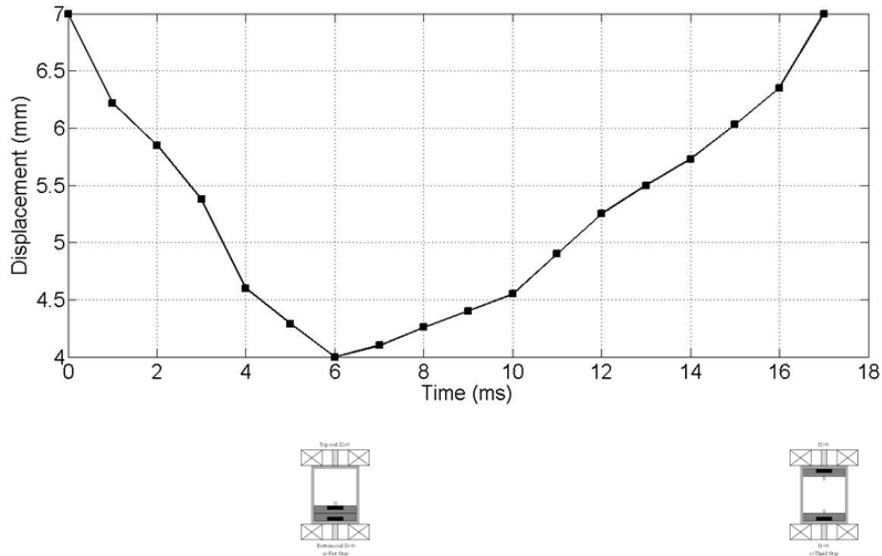


Figure III.16 Caractéristique dynamique expérimentale de l'aimant supérieur.

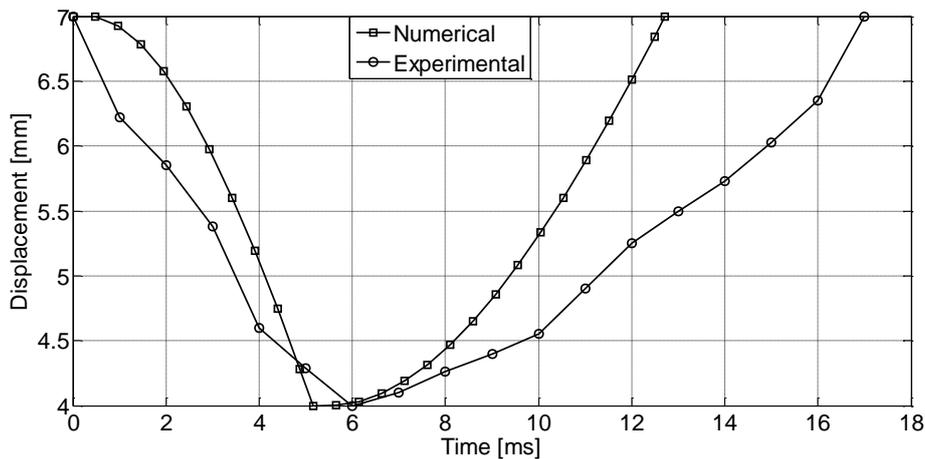


Figure III.17 Confrontation des caractéristiques dynamiques numériques et expérimentales.

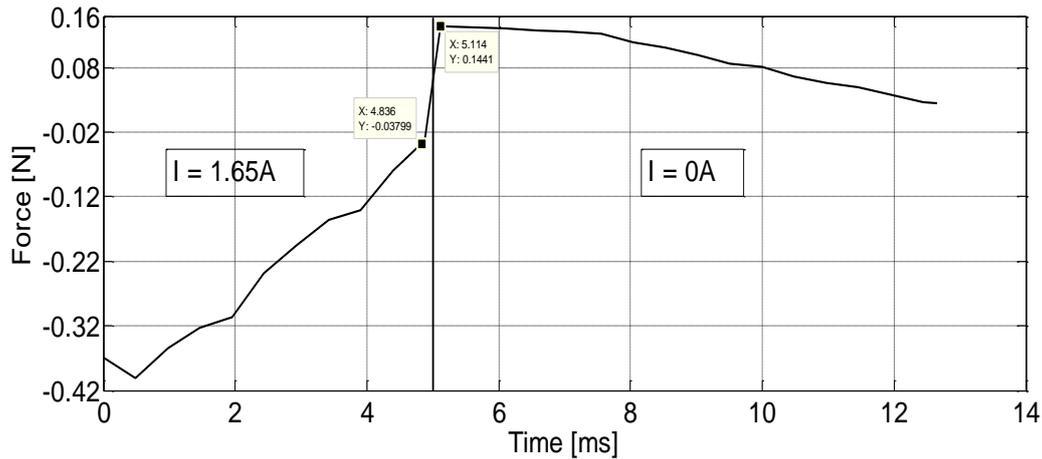


Figure IV.18 Forces magnétiques appliquées sur l'aimant supérieur.

### III.5.2 Caractéristique complète de la dynamique du micro-actionneur

Après la validation expérimentale de l'actionnement de l'aimant supérieur, on s'intéresse ici à la dynamique complète du micro-actionneur, c.-à-d. la dynamique des deux aimants en même temps (système complet), selon les trois étapes de fonctionnement décrites dans les sections précédentes. La Figure III.19 montre la caractéristique dynamique complète du micro-actionneur pour un cycle d'actionnement qui correspond aux trois étapes de fonctionnement. De 0ms à 3.2ms, la bobine supérieure est alimentée et par conséquent l'aimant supérieur est repoussé vers le bas de sa position initiale 7mm pour atteindre l'aimant inférieur. Lorsqu'ils sont assemblés, les deux aimants sont distants de 3mm l'un à l'autre par leurs supports amagnétiques (disques aluminium). Notez que l'aimant est de 1mm d'hauteur, c'est pourquoi la distance entre les aimants apparaît 4mm à l'instant 3.2ms. Lorsque la bobine supérieure est déexcitée et la bobine inférieure est excitée (de 3.2ms à 6.5ms), les aimants assemblés sont repoussés tous les deux en même temps vers le haut pour atteindre l'extrémité supérieure du canal cylindrique. Ensuite, les deux bobines sont déexcitées. Donc, dès l'instant 6.5 ms, les deux aimants commencent à être séparés par leurs forces naturelles de répulsion. À l'instant 11ms, chaque aimant rejoint sa position initiale et donc un cycle d'actionnement est terminé. Les forces électromagnétiques calculées pour un cycle d'actionnement sont représentées sur la Figure III.20. Prenons par exemple la première étape de fonctionnement, la force électromagnétique appliquée sur l'aimant supérieur diminue de 0,36N à environ 0,02N lorsqu'il est repoussé de sa position initiale pour atteindre l'aimant inférieur. Par ici, on peut conclure que le mode de fonctionnement désiré du micro-actionneur électromagnétique proposé est obtenu.

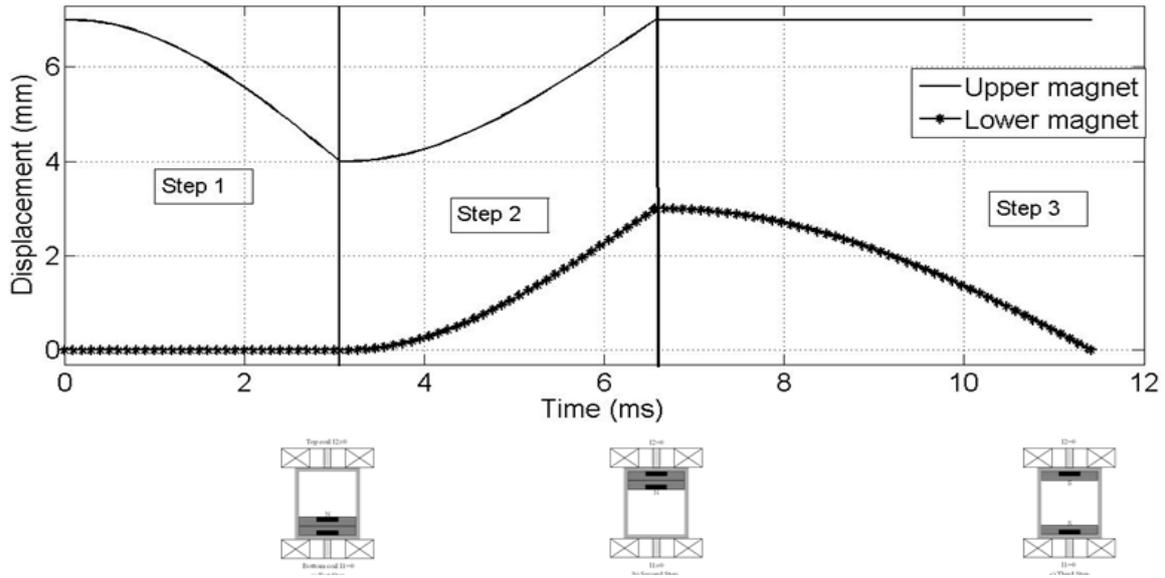


Figure III.19 Caractéristique dynamique complète de l'actionnement.

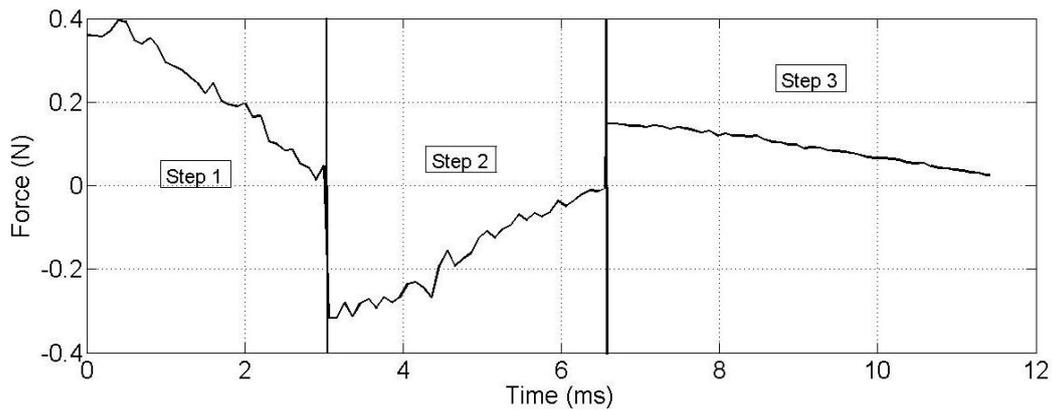


Figure. III.20 Forces électromagnétiques appliquées sur l'aimant supérieur.

### III.6 Conclusion

Ce chapitre a concerné la proposition d'un nouveau micro-actionneur électromagnétique ; constitué de deux aimants permanents fixés au centre de deux disques amagnétiques comme supports, l'ensemble de ces éléments sont logés dans un canal cylindrique. Les deux aimants sont placés de telle sorte qu'une force magnétique naturelle de répulsion sera produite entre eux. Deux bobines coaxiales ont été fixées aux deux extrémités du canal cylindrique, et alimentées en alternance afin de produire l'actionnement désiré. Un premier modèle semi-analytique basé sur la loi de Biot-Savart a été développé afin d'analyser le comportement électromagnétique et identifier la caractéristique dynamique de l'actionnement. Les premiers résultats ont montré que chaque aimant se déplace avec une course de 3mm et d'une période estimée de 4.4ms, pour un courant d'alimentation de 2.5A. Ce courant a été réduit par l'insertion d'un noyau de fer au centre de chaque bobine. Pour identifier de nouveau la caractéristique dynamique du micro-actionneur à noyau de fer, nous avons développé un

deuxième modèle numérique basé sur la méthode MVF. Dans l'objectif de valider expérimentalement son principe de fonctionnement, un premier prototype du micro-actionneur a été fabriqué et testé avec succès.

## **Chapitre IV La micro-pompe**

### IV.1 Introduction

Dans le domaine de la micro-fluidique, la micro-pompe est un dispositif très utilisée dans des applications de plus en plus importantes dans divers domaines tels que les sciences de la vie, l'analyse chimique et le domaine biomédical. Pour répondre à la demande croissante de plusieurs domaines techniques, un grand nombre de micro-pompes ont été conçues fabriquées et testées. L'élément moteur de ces dispositifs est, souvent, un micro-actionneur générateur de la pression. Il existe plusieurs micro-pompes conçues à la base de différents types de micro-actionneurs, par exemple à actionnement piézoélectrique, à micro-actionneur électromagnétique solidaire à membrane élastique,...etc. Les valves sont également considérées comme des éléments constitutifs importants dans une micro-pompe, car les performances d'une micro-pompe sont reliées directement au type de valves utilisées. Dans plusieurs applications, en particulier le domaine biomédical, le micro-pompage concerne des liquides chargés de particules, ce qui nécessite donc l'emploi d'une micro-pompe sans valves. Ce chapitre concerne la conception et la fabrication d'une nouvelle micro-pompe électromagnétique sans valves et bidirectionnelle. Elle peut être utilisée pour écouler le liquide dans les deux directions sans aucune nécessité de changer sa structure. La micro-pompe proposée utilise comme élément moteur le micro-actionneur électromagnétique proposé et validé expérimentalement dans le chapitre précédent. Une modification particulière sera apportée sur les deux disques amagnétiques du micro-actionneur afin d'assurer la fonction de pompage. Un premier prototype de la micro-pompe a été fabriqué et testé avec succès. Afin d'obtenir la caractéristique ainsi que les performances de la micro-pompe fabriquée, plusieurs essais expérimentaux ont été effectués.

### IV.2 Conception de la micro-pompe

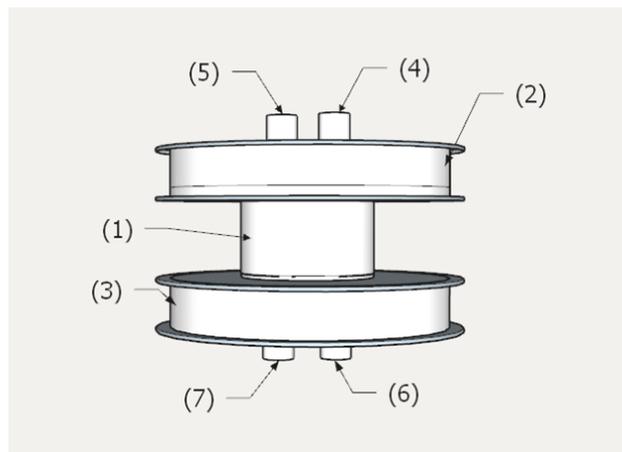


Figure. IV.1 Design de la micro-pompe proposée.

- (1) chambre de pompage, (2) bobine supérieure,
- (3) bobine inférieure, (4)-(5) ouvertures de sortie du liquide,
- (6)-(7) ouvertures d'entrée du liquide.

La micro-pompe proposée est représentée dans la Figure IV.1, elle comporte une chambre de pompage (1) fixée entre deux bobines (2) et (3). La chambre de pompage est dotée d'un coté d'une sortie de liquide à deux ouvertures (4) et (5), et d'autre coté d'une entrée de liquide à deux ouvertures (6) et (7). Cette configuration à double ouvertures assure une distribution homogène et symétrique de la pression du liquide à l'intérieur de la chambre de pompage. Un schéma détaillé qui représente les éléments constitutifs de la micro-pompe est représenté sur la Figure IV.2.

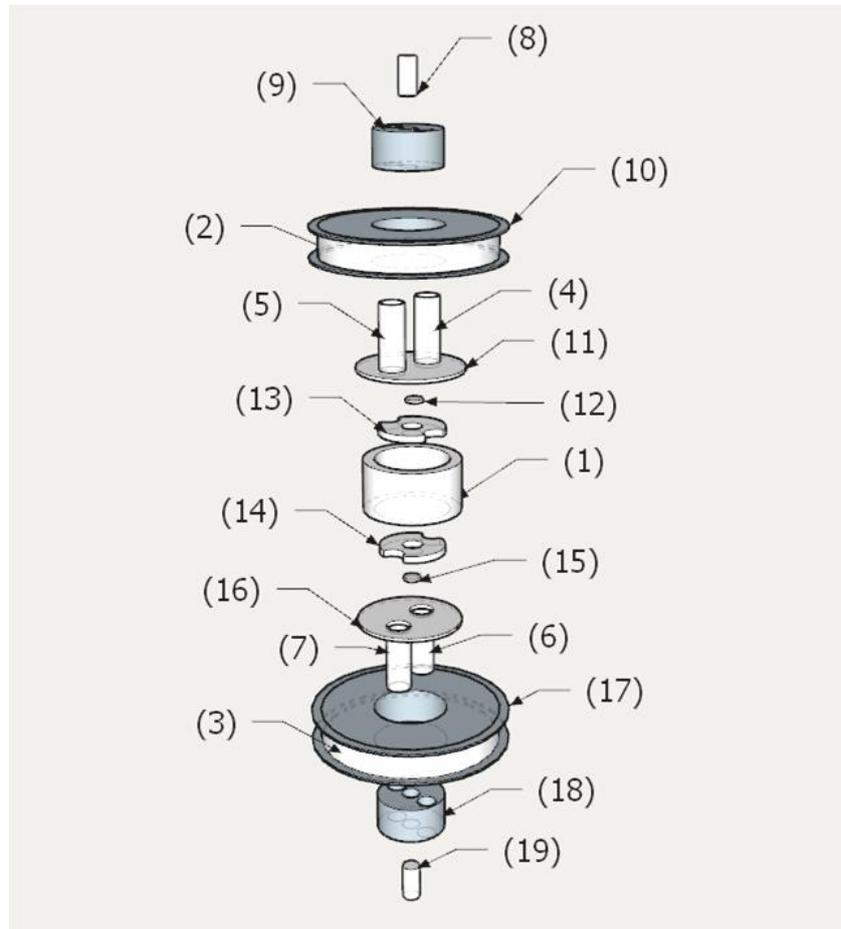


Figure IV.2 Eléments constitutifs de la micro-pompe.

(8)-(19) noyaux de fer, (9)-(18) supports des noyaux de fer,  
 (10)-(17) supports des bobines, (11)-(16) couvercles, (12)-(15) aimants,  
 (13)-(14) disques amagnétiques.

En effet, la chambre de pompage (1) est un cylindre, dans lequel coulissent deux disques amagnétiques (13) et (14), au centre du disque (13) est fixé l'aimant permanent (12), et au centre du disque (14) est fixé l'aimant permanent (15). Les deux aimants sont fixés de telle sorte qu'une force magnétique naturelle de répulsion sera produite entre les disques (13) et (14) c.-à-d., avec polarisation magnétique opposée ; le pôle Sud de (12) en face du pôle Sud de (15), comme dans le cas du micro-actionneur proposé précédemment. Afin d'assurer la

fonction de pompage du liquide, les disques (13) et (14) sont percés des deux cotés par des demi-trous symétriques et placés dans le cylindre 1 de façon à constituer, en se rapprochant l'un à l'autre, un disque plein sans trous. La chambre de pompage (1) est fermée par les deux couvercles (11) et (16), chaque couvercle comporte deux ouvertures. L'actionnement est produit par l'interaction des champs magnétiques des deux aimants et les champs magnétiques produits par les deux bobines (2) et (3). Ces deux bobines sont réalisées sur des formes toriques isolantes (10) et (17). Afin de maximiser l'induction magnétique, deux noyaux de fer (8) et (19) sont intercalés aux centres des deux bobines. Les deux supports (9) et (18) assurent la bonne fixation des noyaux de fer, et pareillement de la tuyauterie des ouvertures (4), (5), (6) et (7).

### IV.3 Principe de fonctionnement de la micro-pompe

Dans cette micro-pompe, le pompage du liquide est produit par un mouvement particulier des disques amagnétiques, sans l'emploi de valves. Cependant, l'actionnement est réalisé par un mouvement axial et périodique des disques (13) et (14), selon trois étapes principales constituant ainsi un cycle de pompage de temps  $T_c$  (Figure IV.4). Pour chaque étape les courants d'alimentations des deux bobines sont représentés sur la Figure IV.5.

Initialement, par le biais de la force magnétique naturelle de répulsion entre les aimants (12) et (15), le disque (13) se retrouve à l'extrémité supérieure de la chambre (1) refermant les ouvertures de sortie (4) et (5), tandis que le disque (14) se retrouve à l'extrémité inférieure de la chambre (1) refermant les ouvertures d'entrée (6) et (7) (Figure IV.4.a). Dans la première étape de fonctionnement, on procède à l'excitation de la bobine supérieure (2) par un courant électrique  $i_1$  de façon à produire une force magnétique de répulsion entre cette bobine et l'aimant supérieur (12), provoquant ainsi le déplacement du disque (13) vers le bas pour qu'il rejoigne le disque (14) (Figure IV.4.b). A la fin de cette première étape, les deux disques (13) et (14) se trouvent collés à l'extrémité inférieure de la chambre de pompage (1), formant ainsi un disque plein sans trous qu'on appelle (13-14). Le liquide se retrouve donc piégé entre le disque plein (13-14) d'un coté et les ouvertures de sortie (4) et (5) de l'autre coté. La deuxième étape de fonctionnement commence par l'excitation de la deuxième bobine numérotée (3) par un courant électrique  $i_2$ , et en même temps par mettre hors tension la bobine (2). La force magnétique de répulsion ainsi produite entre la bobine (3) et le disque plein (13-14), agit de façon à refouler le disque plein (13-14) vers le haut pour qu'il atteigne l'extrémité supérieure de la chambre de pompage (Figure IV.4.c). Par cet actionnement, le liquide précédemment piégé dans la chambre est pompé à travers les ouvertures de sortie (4) et (5). Egalement, le déplacement du disque plein (13-14) vers le haut provoque l'aspiration du liquide provenant des ouvertures d'entrée (6) et (7). A la fin de cette deuxième étape, on se retrouve à la fois par un liquide pompé à travers les ouvertures de sortie (4) et (5), et par une chambre de pompage alimentée par le liquide à travers les ouvertures d'entrée (6) et (7). Le disque plein (13-14) se retrouve à l'extrémité supérieure de la chambre de pompage.

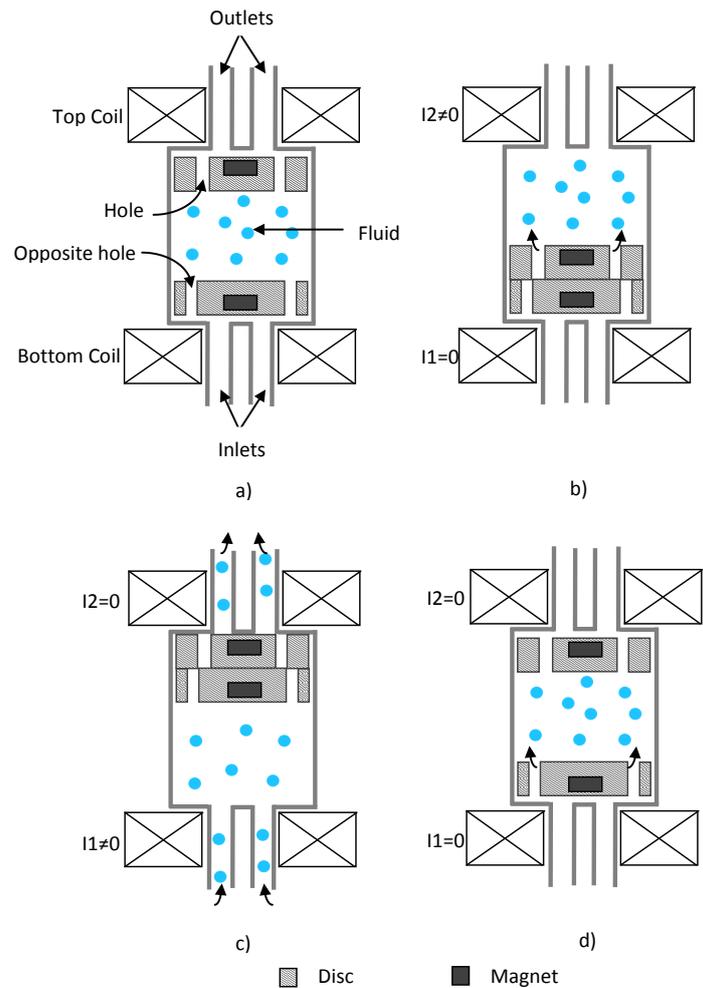


Figure IV.3 Principe de fonctionnement de la micro-pompe : les étapes  
 (a) Etat initial, (b) Etape 1, (c) Etape 2, (d) Etape 3.

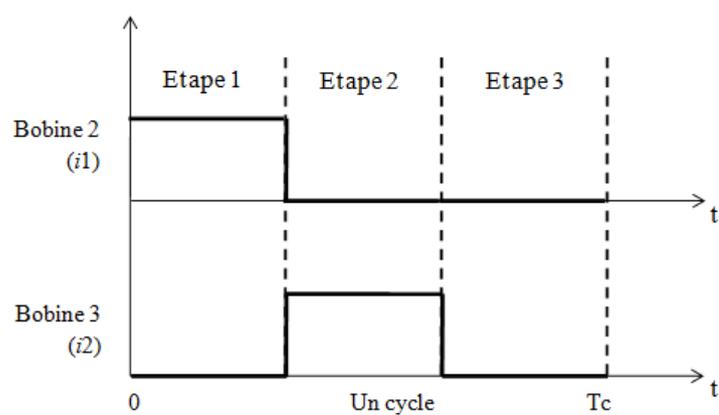


Figure IV.4 Courant d'alimentation des bobines selon les trois étapes.

La troisième étape de fonctionnement commence par mettre hors tension électrique les deux bobines (2) et (3) (Figure IV.4.d). Par le biais de la force magnétique naturelle de répulsion

entre les deux aimants (12) et (15), les disques (13) et (14) sont séparés à nouveau. Subséquemment, le disque (14) est repoussé vers le bas pour rejoindre l'extrémité inférieure de la chambre de pompage, tandis que le disque (13) conserve sa position à l'extrémité supérieure de la chambre. On se retrouve donc à l'étape d'initialisation précédemment décrite. A la fin de la troisième étape, un cycle de pompage de temps  $T_c$  a été achevé comme prévu, ce cycle se répète jusqu'à ce que la quantité désirée du liquide soit atteinte.

Pour changer la direction d'écoulement du liquide, il suffit de changer le mode d'alimentation des deux bobines sans changer la structure de la micro-pompe. La Figure IV.6 montre les formes d'ondes des courants d'alimentations des deux bobines (2) et (3) produisant le pompage du liquide dans le sens contraire, c.-à-d., du haut vers le bas. Avec une telle alimentation, les ouvertures (4) et (5) ont pour fonction d'entrée du liquide tandis que la sortie du liquide sera assurée par les ouvertures (6) et (7). Le principe de fonctionnement reste inchangé comme indiqué dans le cycle d'actionnement précédent.

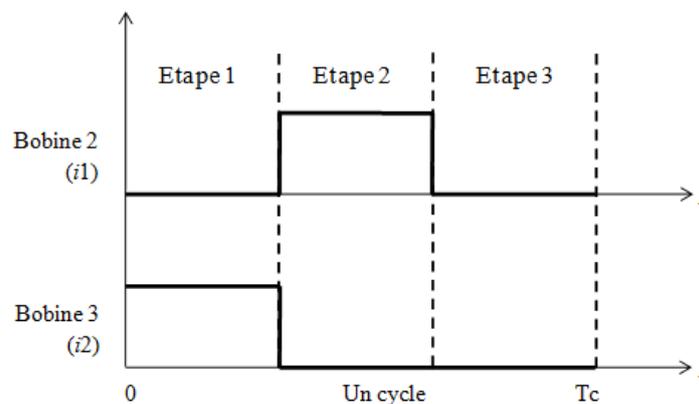


Figure IV.5 Courant d'alimentation des bobines : inversion du sens de pompage.

#### IV.4 Modélisation de la micro-pompe

##### IV.4.1 Les pertes de charges fluidiques

###### ❖ Pertes de charge régulières

Les pertes de charge sont des chutes de pression dues à la résistance que rencontrent les fluides en écoulement, les pertes régulières correspondent à l'écoulement le long des conduites et dépendent de deux paramètres. Le premier paramètre est relatif au type d'écoulement, donc du nombre de Reynolds ( $Re$ ) :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (IV. 1)$$

Dans cette dernière équation  $V$  est la vitesse débitante,  $D$  est le diamètre du tube et  $\nu$  est la viscosité cinématique. Le deuxième paramètre est relatif à la rugosité interne de la conduite, comme illustré dans la Figure IV.7.

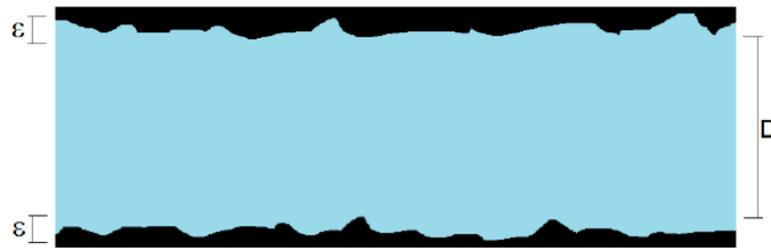


Figure. IV.6 Rugosité interne d'une conduite.

La rugosité absolue  $\varepsilon$  représente l'épaisseur moyenne des aspérités de la surface de la conduite. Pour une conduite d'un diamètre  $D$  donné on appelle la rugosité relative le rapport  $\varepsilon/D$ . Par cela, on introduit la perte de pression comme suit :

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{IV. 2})$$

Où  $L$  est la longueur de la conduite,  $D$  est le diamètre interne de la conduite, le terme  $\frac{1}{2} \rho V^2$  représente l'énergie cinétique volumique du fluide et  $f$  est le coefficient de frottement de la conduite. Sachant que le coefficient de frottement dépend du type d'écoulement, pour un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique horizontale, il s'écrit :

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{IV. 3})$$

Pour un écoulement turbulent, l'équation empirique de Colebrook est :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (\text{IV. 4})$$

#### ❖ Pertes singulières

Dans tous les cas ci-après, il résulte du passage du liquide au point singulier une perte de charge donnée par la formule :

$$\Delta P = k \frac{V^2}{2g} \quad (\text{IV. 5})$$

Dans laquelle:

$\Delta V$  est la perte de charge en mètre de liquide, et  $V$  vitesse moyen du liquide.  $g$  est l'accélération de la pesanteur en mètre par seconde.  $k$  est un coefficient sans unité dépend de la nature du point singulier dont il s'agit.

#### ❖ Pertes dues au changement brusque de diamètre de la conduite

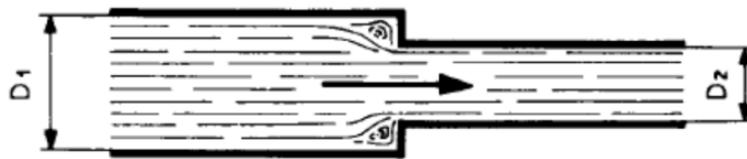
Il existe, principalement, deux types de changement brusque de diamètre de la conduite ; le rétrécissement (Figure IV.8.a) et l'élargissement Figure IV.8.b. Dans le cas d'un rétrécissement, le coefficient  $k$  est donné par :

$$k = 0.5 \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right] \quad (\text{IV. 6})$$

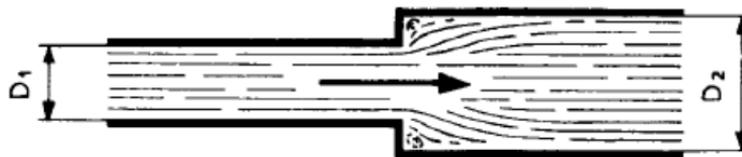
Tels que  $D_1$  est le diamètre intérieur de la conduite avant le rétrécissement et  $D_2$  est de diamètre intérieur de la conduite après rétrécissement. Dans le cas d'un élargissement, le coefficient  $k$  est donné par :

$$k = \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right]^2 \quad (\text{IV. 7})$$

\*



(a)



(b)

Figure. IV.7 Changement brusque de diamètre d'une conduite.

(a) rétrécissement, (b) élargissement

#### IV.4.2 Modèle géométrique

La Figure IV.9 montre le modèle géométrique de la micro-pompe. Dans ce modèle les pertes mécanique et fluide sont prises en compte d'une manière approximative afin de rapprocher à la dynamique réel de la micro-pompe. La méthode des volumes finis MVF avec maillage rectangulaire a été utilisée pour la solution du problème électromagnétique équivalent et pour déterminer également les caractéristiques de cette micro-pompe. Pour éviter le remaillage en déplaçant les disques amagnétiques (selon les trois étapes de fonctionnement de la micro-pompe), nous avons employé la technique dite de 'changement des propriétés physiques'. Rappelons que cette technique a été détaillée dans le chapitre précédent.

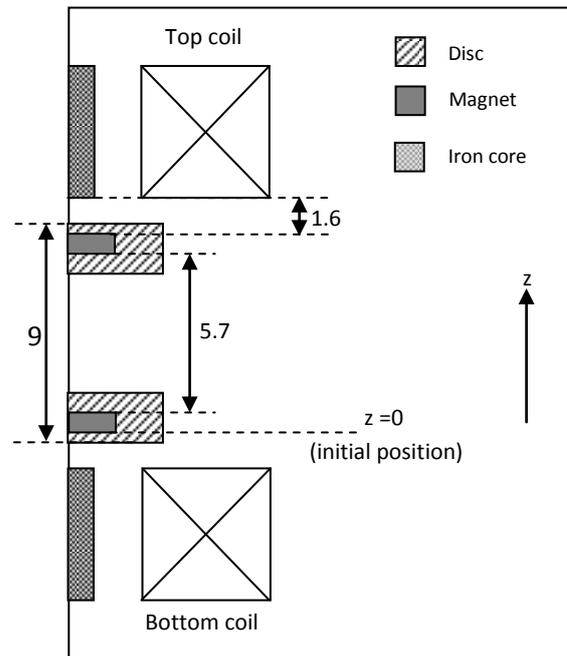


Figure IV.8 Modèle géométrique de la micro-pompe.

#### IV.4.3 Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation numérique de la micro-pompe proposée sont montrés sur les Figures suivantes. La Figure IV.10, représente la caractéristique dynamique des disques en fonction du temps, on remarque que la présence du liquide (micro-pompe en charge) à ralentir le déplacement des disques par rapport à la dynamique obtenue dans le chapitre précédent (micro-actionneur à vide). Dans la première étape, le disque inférieur prend 30ms pour atteindre la position désirée. Dans la deuxième étape, il fallait 10ms pour que l'ensemble des deux disques arrivent à descendre vers l'extrémité inférieure de la chambre de pompage.

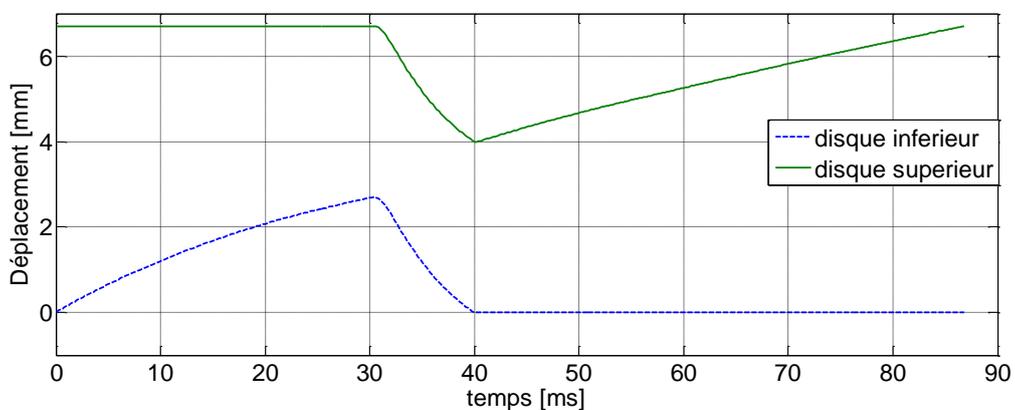


Figure IV.9 Caractéristique dynamique de la micro-pompe en charge.

La troisième étape est la plus lente, où le disque supérieur prend vers 47ms pour arriver à sa position initiale. On constate, qu'un cycle de pompage vaut 87ms. La Figure IV.11 montre l'évolution de la vitesse des disques pendant les trois étapes de fonctionnement. Pendant la première étape, la vitesse du disque inférieur se baisse de 0.18m/s à 0.05m/s en raison des pertes mécaniques et surtout les pertes de charge fluide. Dans la deuxième étape la vitesse des disques augmente rapidement dans le sens négatif jusqu'à sa valeur maximale -0.4m/s, le signe négatif signifié que le sens de déplacement est changé. Puis la vitesse diminue en raison des pertes jusqu'à -0.18m/s. Pendant la troisième étape la vitesse est diminuée très lentement jusqu'à 0.05m/s.

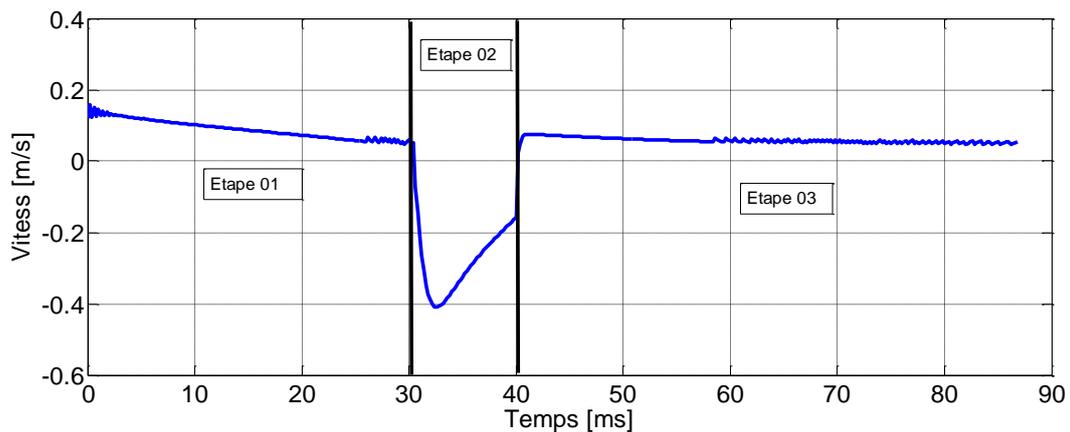


Figure IV.10 Vitesse des disques pendant un cycle.

La Figure IV.12 montre les forces électromagnétiques appliquées pendant les trois étapes de fonctionnement. Dans la première étape, la force appliquée sur le disque inférieur diminue de 0.85N à 0.08N. Dans la deuxième étape, la force appliquée sur les deux disques diminue de 0.7N à -0.08N. Dans la troisième étape, la force appliquée sur le disque supérieur décroît de 0.27N à 0.08N.

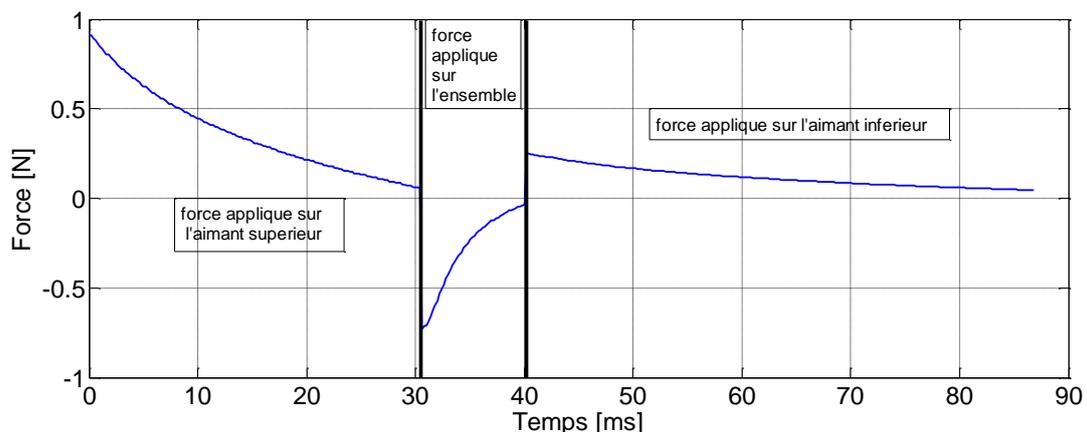


Figure IV.11 Force magnétique appliquée sur les disques pendant un cycle.

## IV.5 Fabrication et évaluation expérimentale de la micro-pompe

### IV.5.1 Fabrication de la micro pompe

Comme premier prototype, la micro-pompe électromagnétique fabriquée est représentée dans la Figure IV.13. La chambre de la micro-pompe est un cylindre creux en aluminium, fabriquée en utilisant un usinage de précision. Le cylindre est de diamètre intérieur de 15mm, de diamètre extérieur de 21mm et une longueur de 9mm. Les deux couvercles ont une épaisseur de 1mm, chacun comprend deux orifices de 2,5mm de diamètre comme entrées et sorties. Pour réduire les frottements et permettre un bon déplacement des disques à l'intérieur du canal ainsi que pour réduire les pertes de pression à travers les disques, le jeu entre le cylindre et les disques est choisi 50 $\mu$ m. C'est pourquoi, les deux disques sont identiques et ils sont fabriqués avec 14,95mm de diamètre et une épaisseur de 2,8mm.

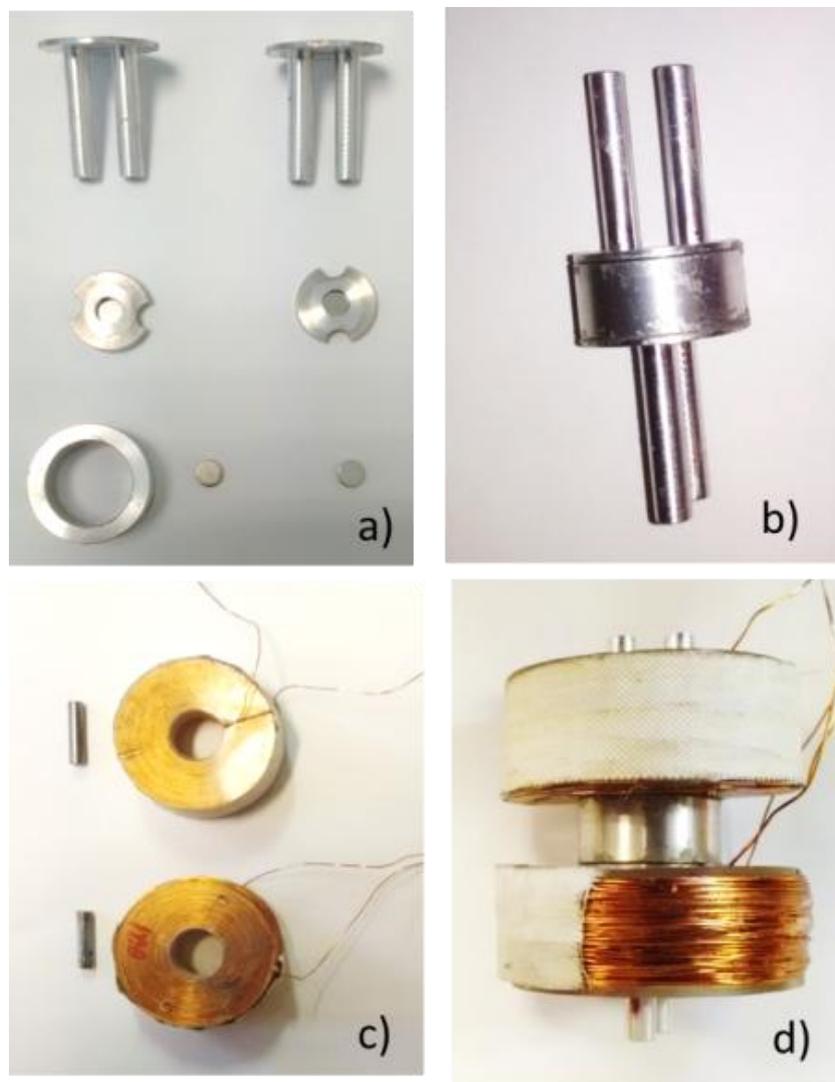


Figure IV.12 Photographie de la micro-pompe fabriquée.

- (a) composants de la chambre de pompage, (b) la chambre de pompage assemblée  
(c) bobines externes avec barres de fer. (d) la micro-pompe assemblée.

Chaque disque est percé en son centre par un trou de diamètre 5mm pour loger l'aimant permanent, et ils sont également percés latéralement spécialement pour permettre au fluide de passer à la fois en mode d'alimentation du fluide et en mode d'initialisation. Les aimants utilisés sont deux aimants permanents de type NdFeB de diamètre 5mm, hauteur 1mm et aimantation axiale de 1.32T. Les deux bobines de cuivre sont émaillées avec un diamètre intérieur 13mm, diamètre extérieur 43mm et hauteur 12mm. Afin de maximiser la force électromagnétique, une barre de fer de diamètre de 4 mm est insérée au centre de chaque bobine.

#### IV.5.2 Mise en marche de la micro-pompe

A fin d'évaluer les caractéristiques expérimentales ainsi que les performances de la micro-pompe proposée et fabriquée, un banc d'essais a été réalisé Figure IV.14.

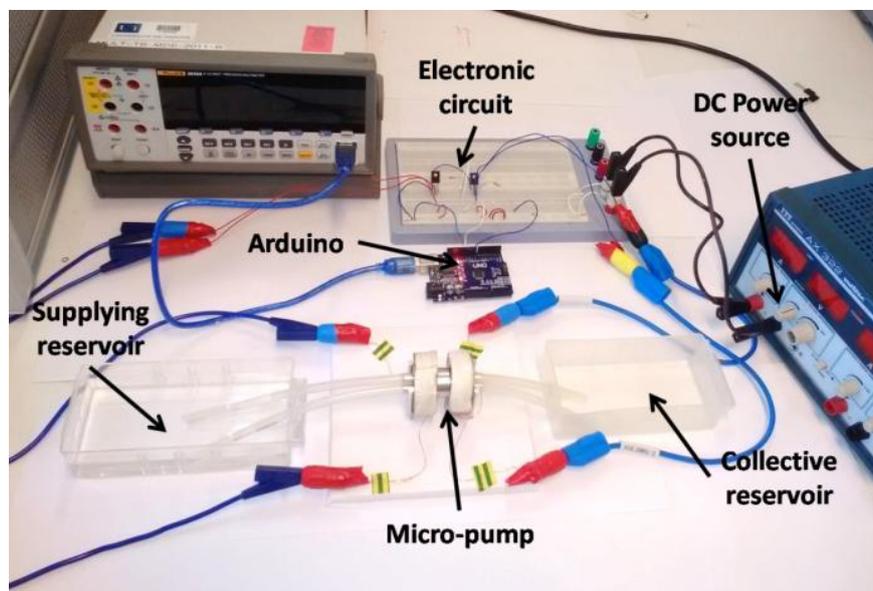


Figure IV.13 Photographie du banc d'essais.

Les deux bobines de la micro-pompe sont alimentées en courant continu (DC) par deux transistors de puissance utilisés comme amplificateurs de puissance Figure IV.15. Pour générer les formes d'ondes désirées des courants électriques comme décrits dans les sections précédentes, les deux transistors sont commandés par un circuit électronique numérique constitué principalement d'une carte à microcontrôle basée sur un circuit Arduino-UNO. Les signaux de commande des deux transistors sont écrits en langage de programmation C en tenant compte des temps d'activation des trois modes de fonctionnement de la micro-pompe selon les trois étapes décrites précédemment.

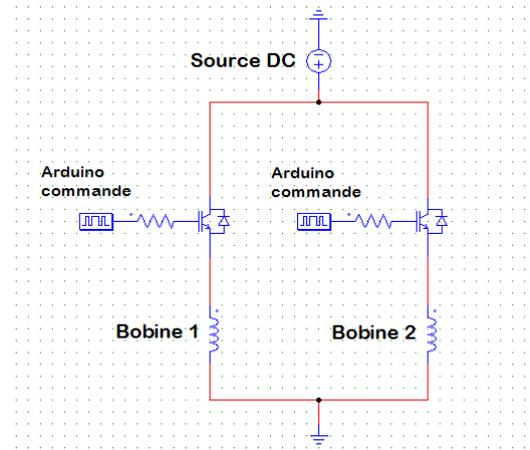


Figure IV.14 Circuit de commande de la micro-pompe.

Le programme écrit en langage C permet un contrôle flexible des trois temps d'activation relatifs aux trois temps des trois étapes de fonctionnement, et par conséquent un contrôle de la fréquence de travail de la micro-pompe inversement proportionnelle à un cycle de pompage.

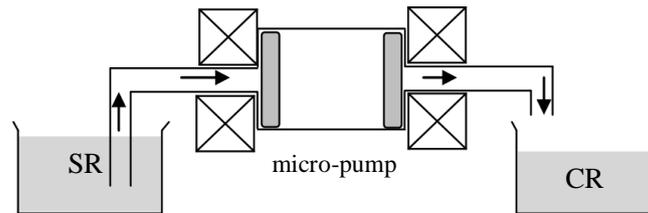


Figure IV.15 Schématisation de l'installation de mesure.

La Figure IV.16 montre le schéma synoptique de l'installation de mesure du débit de la micro-pompe ainsi que sa validation expérimentale. Dans cette expérience, les entrées et sorties de la micro-pompe sont reliées à des conduites de 15cm de longueur et 3mm de diamètre. Les deux conduites sont immergées dans un réservoir d'alimentation en fluide (SR) relativement grand et un réservoir de collecte (CR).

### IV.5.3 Résultats expérimentaux

L'objectif ici consiste à fournir le débit  $Q$  [ml/mn] de la micro-pompe ainsi que sa contre-pression, ces deux paramètres représentent les deux principales caractéristiques des micro-pompes. Egalement, dans cette section, les influences de diverses grandeurs expérimentales sur le débit telles que la fréquence de travail, la contre-pression ainsi que le courant de fonctionnement, ont été évaluées. La Figure IV.17 montre le débit mesuré pour différentes valeurs de la fréquence de travail allant de 1Hz à 3.3Hz. Dont, le tableau IV.1 et représente les fréquences de fonctionnements et la durée de chaque étapes qui constituent la fréquence

globale. Dans cette expérience le courant est fixé à 2A. Il est clairement observé que le débit augmente lorsque la fréquence de travail augmente.

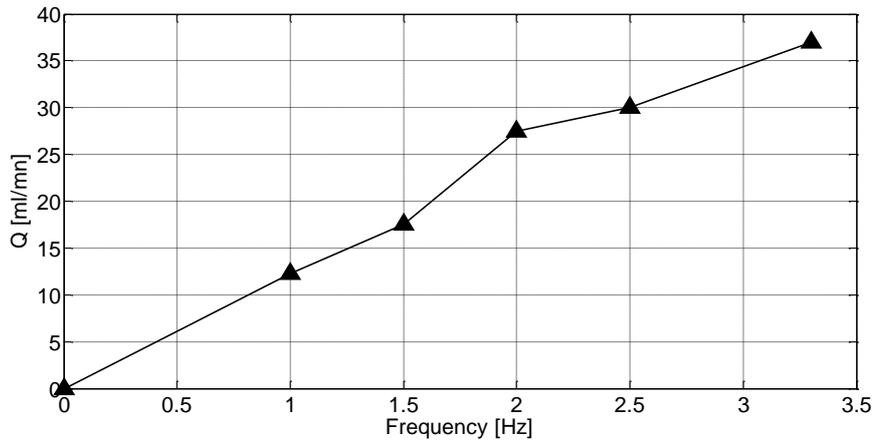


Figure IV.16 Débit en fonction de la fréquence de travail.

	Etape 1 [s]	Etape 2 [s]	Etape 3 [s]	Fréquence [Hz]
La durée de commutation pour chaque étape [s]	0.3	0.3	0.4	1.0 Hz
	0.2	0.2	0.26	1.5 Hz
	0.15	0.15	0.2	2.0 Hz
	0.1	0.1	0.2	2.5 Hz
	0.1	0.1	0.1	3.3 Hz

Tableau IV.1 Duré des trois étapes d'actionnement.

En effet, le débit est mesuré pour une contre pression relativement faible au niveau des conduites de sorties. On observe que la micro-pompe a réalisée un débit élevé de 37ml/mn pour une fréquence de travail maximale de 3,3Hz (un cycle de 0,3s). D'un autre coté, on peut calculer le débit ( $Q_{cal}$ ) par l'équation :

$$Q_{cal} = \Delta V_{chambre} * f_{pompage} \tag{IV.8}$$

Avec  $\Delta V_{chambre}$  est le volume de la chambre de pompage et  $f_{pompage}$  la fréquence de pompage. La Figure IV.18 représente une confrontation entre les valeurs mesurées et calculées du débit pour différentes fréquences. On remarque que les deux résultats sont presque identiques.

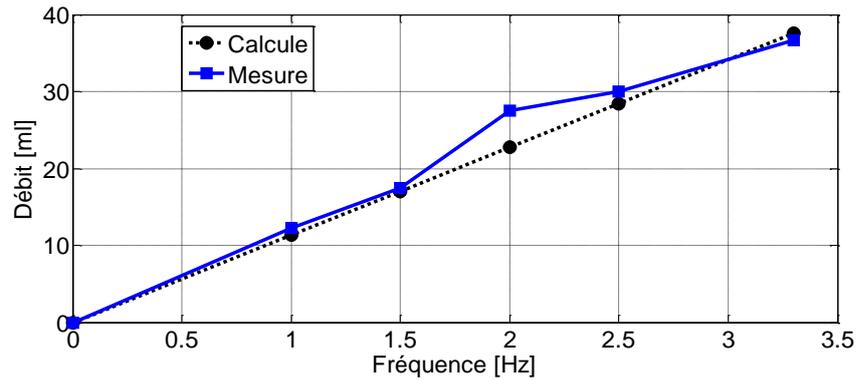


Figure IV.17 Comparaison entre le débit mesuré et le débit calculé.

Dans la Figure IV.19, on montre le débit mesuré en fonction de différentes valeurs du courant d'alimentation des bobines. Dans ces tests expérimentaux, la fréquence de travail est fixée à 3,3Hz. Il est évident que le débit augmente à mesure que le courant de fonctionnement augmente, avec une relation approximativement linéaire. Par exemple, la micro-pompe fournit un débit de 18ml / mn pour un courant de fonctionnement de 1,6A. Notons, que la puissance consommée peut être fortement réduite lorsqu'un faible débit est requis.

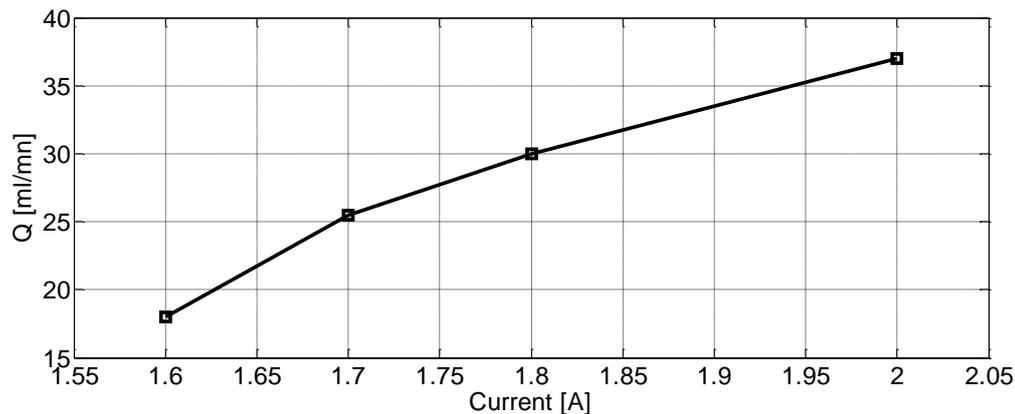


Figure IV.18 Débit en fonction du courant d'alimentation.

Afin d'évaluer la caractéristique de la contre-pression de la micro-pompe, une deuxième installation de mesure a été réalisée Figure IV.20 et Figure IV.21. La contre-pression est mesurée en fonction du niveau de liquide dans la conduite verticale de sortie qui remplace le réservoir CR. Cette contre-pression est fonction de  $\Delta h$ . La Figure IV.22, montre le débit mesuré pour différentes valeurs de la contre-pression déduite de la conduite verticale. Pour cette caractéristique, le courant d'alimentation et la fréquence de travail sont 2A et 3,3Hz, respectivement. On observe que le débit diminue lorsque la contre-pression augmente. Il est montré que la micro-pompe pompe le fluide avec un débit d'environ 6,2ml / mn pour une contre-pression maximale de 1,94kPa.

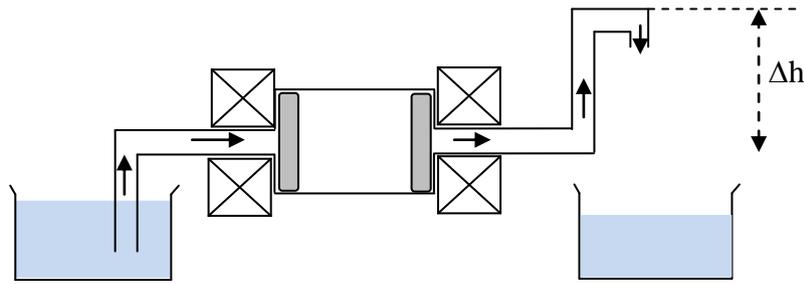


Figure IV.19 Schématisation de l'installation de mesure de la contre-pression.

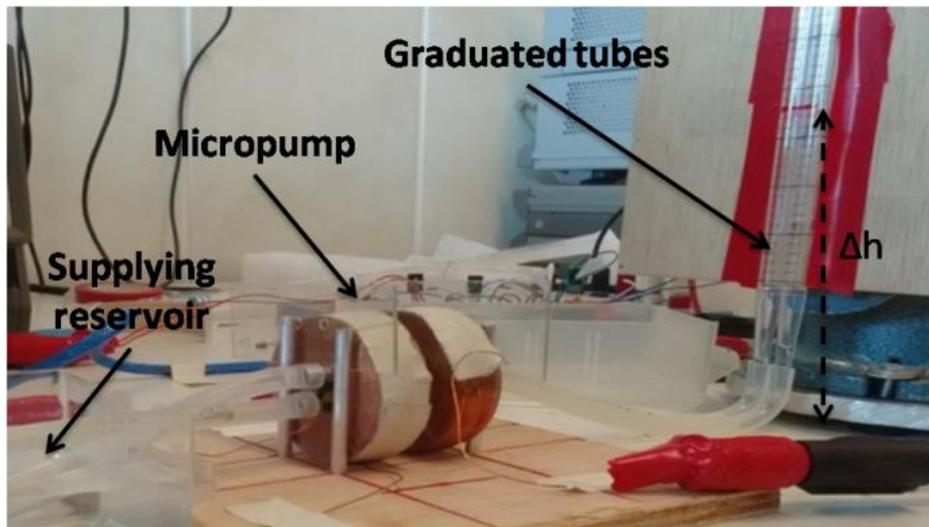


Figure IV.20 Photographie de l'installation de mesure de la contre-pression.

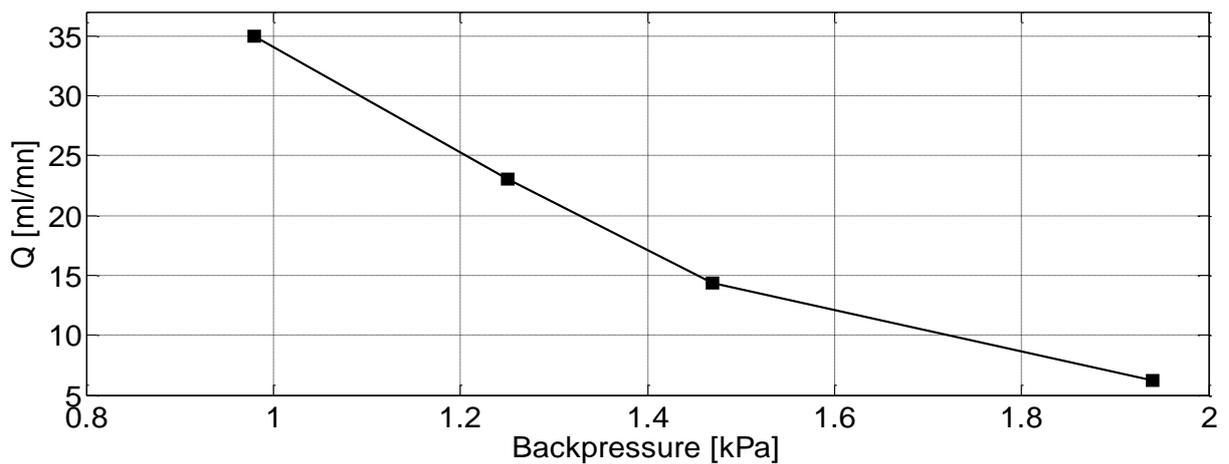


Figure IV.21 Débit en fonction de la contre-pression.

Une autre caractéristique nous semble utile est également évaluée; il s'agit de la contre-pression en fonction de la fréquence de travail représentée sur la Figure IV.23. Dans cette caractéristique expérimentale, le courant d'alimentation est maintenu à 2A. Comme prévu, on

peut observer que la contre-pression augmente lorsque la fréquence de fonctionnement augmente.

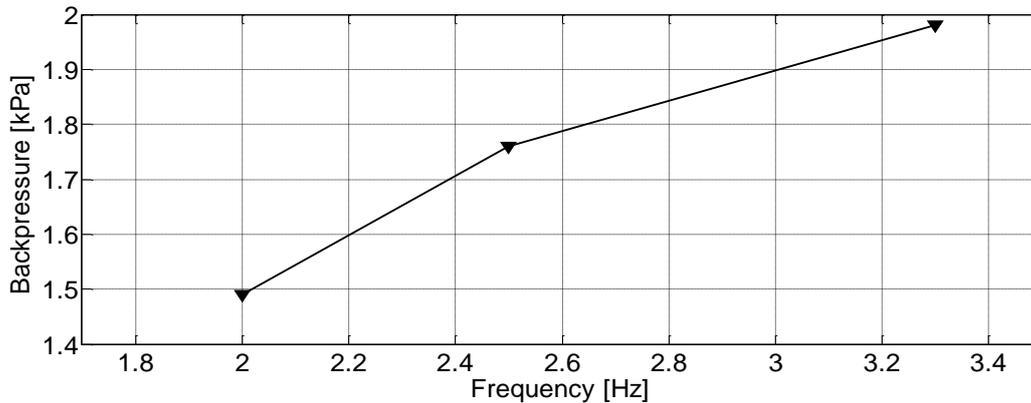


Figure IV.22 Contre-pression en fonction de la fréquence de travail.

Avec les résultats ci-dessus, nous avons présenté l'effet de divers paramètres expérimentaux tels que la fréquence de fonctionnement, la contre-pression et le courant de fonctionnement sur le débit. Par exemple, il est montré que la micro-pompe reste en fonctionnement de pompage du fluide avec un débit de l'ordre de 6,2ml / mn, même avec une contre-pression de 1,94kPa. L'évaluation expérimentale représentée par les différentes caractéristiques précédentes, montre la performance du prototype fabriqué de la micro-pompe proposée. D'ailleurs, les résultats obtenus permettent d'établir une loi de contrôle du débit de la micro-pompe en fonction d'un ou plusieurs paramètres.

#### IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle micro-pompe électromagnétique a été conçue, fabriquée et évaluée. L'utilisation d'un micro-actionneur électromagnétique symétrique fabriqué avec deux aimants permanents et deux bobines, a donné naissance à une nouvelle micro-pompe bidirectionnelle sans valves. En ce qui concerne d'autres méthodes d'actionnement, l'actionneur électromagnétique proposé est un type d'actionnement simple qui peut présenter une alternative dans la fabrication des micro-pompes. Les résultats expérimentaux du premier prototype fabriqué indiquent la performance de la micro-pompe avec laquelle nous avons pompé avec succès le fluide. Ses caractéristiques de fréquence de travail, de débit d'écoulement et de contre-pression ont été caractérisées expérimentalement. La micro-pompe a montré un débit élevé de 37ml / mn pour une fréquence de fonctionnement maximale de 3,3Hz. De plus, elle continue de pomper le fluide avec un débit de 6,2ml / mn pour une contre-pression de 1,94kPa. Les développements futurs incluent la miniaturisation des éléments de la micro-pompe tels que les bobines, le canal cylindrique et les disques en utilisant une technique d'optimisation appropriée.

## **Conclusion générale**

## Conclusion Générale

Selon plusieurs publications scientifiques relatives aux composants micro-fluidiques réalisés jusqu'à présent, on trouve la micro-pompe qui est indéniablement l'un des microsystèmes qui a connu un plus grand intérêt. Cela est dû, sans doute, au rôle que joue la fonction de pompage dans les systèmes micro-fluidiques. Nous avons souligné que la conception de micro-pompes sans valves efficaces et peu coûteuses est l'un des principaux défis. Cette conception dépend principalement du micro-actionneur associée. L'actionnement électromagnétique est le plus favorable à être le meilleur compromis entre les différents actionneurs grâce aux grandes capacités de déplacement, aux forces magnétiques élevées ainsi que à son temps de réponse rapide.

Dans ce contexte, nous avons proposé, modélisé et fabriqué une nouvelle micro-pompe électromagnétique à aimants permanents. La micro-pompe proposée est une micro-pompe bidirectionnelle et sans valve.

Dans ce projet de thèse nous avons illustré les différentes méthodes d'actionnement utilisées dans les micro-actionneurs dédiés aux applications micro-pompes. Pour notre part, nous avons opté pour le micro-actionneur électromagnétique. Afin d'identifier ses caractéristiques, deux méthodes de modélisation électromagnétique ont été présentées et détaillées ; la modélisation semi-analytique basée sur la loi de Biot-Savart et celle numérique basée sur la MVF. En effet, le micro-actionneur électromagnétique proposé est constitué principalement de deux aimants permanents et de deux bobines. Ses caractéristiques dynamiques, dans les cas sans et avec noyaux ferromagnétiques, ont été obtenues. Ces caractéristiques concernent le déplacement des aimants en fonction du temps. Le premier prototype fabriqué du micro-actionneur a été testé expérimentalement. Le bon fonctionnement du micro-actionneur fabriqué nous a permis, par la suite, de fabriquer la micro-pompe électromagnétique envisagée. Ses caractéristiques telles que sa fréquence de travail, le débit d'écoulement et de la contre-pression ont été caractérisées expérimentalement. Les résultats expérimentaux du premier prototype fabriqué de la micro-pompe indiquent la performance élevée de cette micro-pompe, avec laquelle nous avons pompé avec succès le fluide.

Le développement futur concerne la miniaturisation des éléments constitutifs de la micro-pompe tels que les bobines, les aimants, le canal cylindrique et les disques amagnétiques en utilisant une technique d'optimisation appropriée.

## Références

- [Shabanian 16] Shabanian, A., Goldschmidtboeing, F., Vilches, S., Phan, H. H., Kashekodi, A. B., Rajaeipour, P., & Woias, P. A novel piezo actuated high stroke membrane for micropumps. *Microelectronic Engineering*, 158, 26-2. 2016.
- [Eladi 14] Eladi, P. B., Chatterjee, D., & DasGupta, A. Design and development of a piezoelectrically actuated micropump for drug delivery application. In *Micro and Smart Devices and Systems*, pp. 127-141. Springer India.
- [Shen 08] Shen, C. Y., & Liu, H. K. Fabrication and drive test of piezoelectric PDMS valveless micro pump. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 31(4), 615-623. 2008.
- [Cazorla 16] Cazorla, P. H., Fuchs, O., Cochet, M., Maubert, S., Le Rhun, G., Fouillet, Y., & Defay, E. A low voltage silicon micro-pump based on piezoelectric thin films. *Sensors and Actuators A: Physical*, 250, 35-39. 2016.
- [Zhang 16] Zhang, R., You, F., Lv, Z., He, Z., Wang, H., & Huang, L. Development and Characterization a Single-Active-Chamber Piezoelectric Membrane Pump with Multiple Passive Check Valves. *Sensors*, 16(12), 2108. 2016.
- [Teymoori 05] Teymoori, M. M., & Abbaspour-Sani, E. Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 117(2), 222-229. 2005.
- [Teymoori 02] Teymoori, M. M., & Abbaspour-Sani, E. A. A novel electrostatic micromachined pump for drug delivery systems. In *Semiconductor Electronics, 2002. Proceedings. ICSE 2002. IEEE International Conference on*(pp. 105-109). IEEE. Dec. 2002.
- [Bourouina 97] Bourouina, T., Bossebuf, A., & Grandchamp, J. P. Design and simulation of an electrostatic micropump for drug-delivery applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 7(3), 186. 1997.
- [Patrascu 11] Patrascu, M., Gonzalo-Ruiz, J., Goedbloed, M., Crego-Calama, M., & Brongersma, S. H. Design, fabrication and characterization of electrostatic micro actuators for microfluidic platforms. *Procedia Engineering*, 25, 1181-1184. 2011.

- [Oosterbroek 99] Oosterbroek, R. E., Berenschot, J. W., Nijdam, A. J., Pandraud, G., Elwenspoek, M. C., & van den Berg, A. New design methodologies in< 111> oriented silicon wafers. *MESA Research Institute for Micro Electronics Materials Engineering, Sensors & Actuators*, no date. 1999.
- [Getpreecharsawas 06] Getpreecharsawas, J., Puchades, I., Hournbuckle, B., Fuller, L., Pearson, R., & Lyshevski, S. An electromagnetic MEMS actuator for micropumps. In *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 2006. MEMSTECH 2006. Proceedings of the 2nd International Conference on* (pp. 11-14). IEEE. May. 2006.
- [Guo 06] Guo, S., Wang, J., Pan, Q., & Guo, J. Solenoid actuator-based novel type of micropump. In *Robotics and Biomimetics, ROBIO'06. IEEE International Conference on* (pp. 1281-1286). IEEE. Dec. 2006.
- [Dau 09] Dau, V. T., Dinh, T. X., Nguyen, Q. D., Amarasinghe, R., Tanaka, K., & Sugiyama, S. Microfluidic valveless pump actuated by electromagnetic force. In *Sensors, IEEE* (pp. 679-682). IEEE. Oct. 2009.
- [Pan 05] Pan, T., McDonald, S. J., Kai, E. M., & Ziaie, B. A magnetically driven PDMS micropump with ball check-valves. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(5), 1021. 2005.
- [Ou 12] Ou, Y. C., Yu, C. S., Yang, C. C., Chang, C. M., Tang, Y. H., & Lin, Y. H. Biomimic PDMS Valve Applied in Thermopneumatic Micropump. 15(4), 317-322. 2012.
- [Van 90] Van de Pol, F. C. M., Van Lintel, H. T. G., Elwenspoek, M., & Fluitman, J. H. J. A thermopneumatic micropump based on micro-engineering techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 21(1-3), 198-202. 1990.
- [Yang 11] Yang, L. J., & Lin, T. Y. A PDMS-based thermo-pneumatic micropump with Parylene inner walls. *Microelectronic Engineering*, 88(8), 1894-1897. 2011.
- [Sim 03] Sim, W. Y., Yoon, H. J., Jeong, O. C., & Yang, S. S. A phase-change type micropump with aluminum flap valves. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13(2), 286. 2003.
- [Takagi 94] Takagi, H., Maeda, R., Ozaki, K., Parameswaran, M., & Mehta, M. Phase transformation type micro pump. In *Micro Machine and Human*

- Science*,. *Proceedings. 5th International Symposium on* (p. 199). IEEE. Oct.1994.
- [Zhan 96] Zhan, C., Lo, T., Liu, L., & Peihsin, T. A silicon membrane micropump with integrated bimetallic actuator. *Chinese journal of electronics*, 5(2), 33. 1996.
- [Yang 96] Yang, Y., Zhou, Z. Y., Ye, X. Y., & Jiang, X. N. A Bimetallic Actuated Micropump. *CHINESE JOURNAL OF SCIENTIFIC INSTRUMENT*, S1. 1996.
- [Benard 98] Benard, W. L., Kahn, H., Heuer, A. H., & Huff, M. A. Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 7(2), 245-251. 1998.
- [Benard 97] Benard, W. L., Kahn, H., Heuer, A. H., & Huff, M. A. A titanium-nickel shape-memory alloy actuated micropump. In *Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS'97 Chicago., International Conference on* (Vol. 1, pp. 361-364). IEEE. Jun. 1997.
- [Nason 06] Nason, C. K., Stutz Jr, W. H., & Yap, D. Y. *U.S. Patent No. 7,052,251*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.2006.
- [Yamahata 05] Yamahata, C. Magnetically actuated micropumps. PhD Thesis, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. 2005.
- [Remy 13] Remy Lefevre. Conception et r\_ealisation d'une micropompe intelligente : applications dans le domaine biom\_edical. Autre. Universit\_e Grenoble Alpes, 2013.
- [Sina 05] Sina Khalilian. Development of a Low Cost Micro-pump Thèse doctorat, Spécialité, Mechanical and manufacturing engineering. University of Calgary. 2005.
- [Anders 05] Anders Brask. Electroosmotic micropumps, these doctorat, Department of Micro and Nanotechnology Technical University of Denmark, 2005.
- [Jeong 05] Jeong, O. C., Park, S. W., Yang, S. S., & Pak, J. J. Fabrication of a peristaltic PDMS micropump. *Sensors and Actuators A: Physical*, 123, 453-458. 2005.
- [Nguyen 08] Nguyen, T. T., & Goo, N. S. Development of a peristaltic micropump for bio-medical applications based on mini LIPCA. *Journal of Bionic Engineering*, 5(2), 135-141. 2008.
- [Dewa 97] Dewa, A. S., Deng, K., Ritter, D. C., Bonham, C., Guckel, H., & Massood-Ansari, S. Development of LIGA-fabricated, self-priming, in-

line gear pumps. In *Solid State sensors and Actuators, TRANSDUCERS'97 Chicago. International Conference on* (Vol. 2, pp. 757-760). IEEE. 1997.

- [Laser D 04] Laser D. J. and Santiago J. G., "A review of micropumps", *J. Micromechanics Microengineering*, V. 14, pp. 35–64. 2004.
- [Kruzch 01] Krutzch W. C. and Cooper P., "Introduction: classification and selection of pumps", *Pump Handbook ed I*, J. Karassik *et al* ,New York: McGraw-Hill , 2001.
- [Richter 98] Richter. M. Linnemann, R. and Woais, P. "Robust design of gas and liquid micropumps," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 68, no. 1–3, pp. 480–486, Jun. 1998.
- [Van Lintel 88] Van Lintel ., H. T. G. Van de Pol, F. C. M. and Bouwstra, W. "A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon," *Sensors and Actuators*, vol. 15, pp. 153–167, 1988.
- [Benard 97] Benard, W. L. Kahn, H. Heuer, A. H. and Huff, M. A. "A titanium-nickel shapememory alloy actuated micropump," *Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)*, vol. 1, pp. 361–364, 1997.
- [Guo 99] Guo, S. Sugimoto, K. and Fukuda, T. "A new type of capsule medical micropump," *1999. Proceedings. 1999*, pp. 55–60, 1999.
- [Guo 97] Guo, S. Nakamura, T. and Fukuda, T. "Development of the micro pump using ICPF actuator," *Robotics and Automation*,., no. April, pp. 266–271, 1997.
- [Stemme 93] Stemme E. and Stemme G., "A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump", *Sensors Actuators A* 39, pp. 159–167. 1993.
- [Zengerle 94] Zengerle R. and Richter M., "Simulation of microfluid systems", *J. Micromech. Microeng.*, V. 4, No. 4, pp. 192–204. 1994.
- [Koch 98] Koch M., Harris N., Evans A.G.R., White N.M. and Brunnschweiler A., "A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation", *Sensor Actuator A Phys A* 70, pp. 98–103. 1998.
- [Nguyen 04] Nguyen N.T. and Truong T.Q., "A fully polymeric micro-pump with piezoelectric actuator," *Sensor Actuator B Chemical* 97,pp.137–143. 2004.

- [Pan 05] Pan T., McDonald S.J. , Kai E.M. and Ziaie B., “A magnetically driven PDMS micro-pump with ball check-valves.”, *Micromechanics and Microengineering* 15,pp. 1021–1026. 2005.
- [Yang 04] Yang K. , PhD thesis, “The fabrication and analysis of piezoelectric valveless micro-pump”, National Yunlin University of Science and Technology. 2004.
- [Shen 08] Shen M., Yamahata C. and MAM G., "A high-performance compact electromagnetic actuator for a PMMA ball-valve micro-pump". *J. Micromech. Microeng.*, pp. 250-319. 2008.
- [Xiao 08] Xiao X., M.Sc. Thesis, “Development of a novel micro-pump system” , department of mechanical and manufacturing engineering, University of Calgary. 2008.
- [Kwang 06] Kwang W. O. and Chong H. A., “A review of micro-valves”, *J. Micromechanics Microengineering*, V. 16, pp.13-19. 2006.
- [Olsson 97] Olsson A., Enoksson P., Stemme G. and Stemme E., “Micromachined flat-walled valveless diffuser pumps”, *J. Microelectromech. Syst.* 6, pp. 161–166. 1997.
- [Morris 03] Morris C. J. and Forster F. K., “Low-order modeling of resonance for fixed-valve micro-pumps based on first principles pump”, *J. Microelectromech. Syst.* 12, pp. 325–334. 2003.
- [Feldt 02] Feldt C. and Chew L., “Geometry-based macro-tool evaluation of non-moving-part valvular microchannels” *J. Micromechanics Microengineering*, pp. 662–669. 2002.
- [Bendib 01] Bendib S. and Olivier F., “Analytical study of microchannel and passive micro-valve application to micro-pump simulator” , *SPIE 4593*, pp. 283-291. 2001.
- [Dewa 97] Dewa A.S., Deng K., Bonham C., Ritter D.C., Guckel H. and Masood-Ansari S., “Development of LIGA-fabricated, self-priming, in-line gear pumps”, *9th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 757-760. 1997.
- [Woiias 05] Woiias P., “Micro-pumps - past, progress and future prospects”, *Sensors and Actuators B* 105, pp. 28–38. 2005.

- [Richter 90] Richter A. and Sandmaier H., "An electrohydrodynamic micro-pump". Proc. of the MEMS '90, Napa Valley, USA, pp. 99–104. 1990.
- [Bart 89] Bart. S. F., Mehregany M., Tavrow L.S. and Lang J.H., "Microfabricated electrohydrodynamic pumps", Transducers'89 Switzerland, p. 113. 1989.
- [Chen 02] Chen C. and Santiago J. G., "A Planar Electroosmotic Micro-pump", J. MEMS, V. 11, pp. 672-683. 2002.
- [Nisar 08] Nisar A., Afzulpurkar N., Mahaisavariya B. and Tuantranont A., "MEMS-based micro-pumps in drug delivery and biomedical applications", Sensors and Actuators B:Chemical 130, pp. 917-942. 2008.
- [Lemoff 00] Lemoff. A.V. and Lee A.P., "An AC electrohydrodynamic micro-pump", Sensors and Actuators B 63,pp. 178–185. 2000.
- [Nava 05] Electroceramic-Based, M. E. M. S. "fabrication-technology and applications/Edited by: Nava Setter." 2005.
- [Amirouche 09] Amirouche F., Zhou Y., and Johnson T. "Current micro-pump technologies and their biomedical applications", Microsystem Technologies, v 15, n 5, pp. 647-666. 2009.
- [Chen 07] Chen S. C., Cheng C. H. and Lin Y. C., "Analysis and experiment of a novel actuating design with a shear mode PZT actuator for microfluidic application", Sensors and Actuators A Physical, V. 135, pp. 1-9. 2007.
- [Paul 98] Paul P. H., Arnold D. and Rakestraw D. J., "Electrokinetic generation of high pressures using porous microstructures", Proc. Micro Total Analysis Systems Banff, Canada, pp. 49-52. 1998.
- [Lemarquand 99] Lemarquand, V. Charpentier, J. F. and Lemarquand, G. "Nonsinusoidal torque of permanent-magnet couplings," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 4200–4205, Sep. 1999.
- [Lemarquand 90] Lemarquand, G. and Lemarquand, V. "Annular magnet position sensor," *IEEE. Trans. Magn.*, vol. 26, no. 5, pp. 2041–2043, Sep. 1990.
- [Ravaud 08] Ravaud, R. Lemarquand, G. Lemarquand, V. and Depollier, C. "Ironless loudspeakers with ferrofluid seals," *Arch. Acoust.*, vol. 33, no. 4S, pp. 3–10, 2008.
- [Sawa 90] Sawa, K. and Hirano, T. "An evaluation of the computational error near the boundary with magnetostatic field calculation by B.E.M.", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 26, No. 2, pp. 403-406, Mar. 1990.

- [Demerdach 90] Demerdach, N. A. and Wang, R. “Theoretical and numerical difficulties in 3-D vector potential methods in finite element magnetostatic computations”, IEEE Trans. Magn., Vol. 26, No. 5, pp. 1656-1658, Sep. 1990.
- [Alotto 98] Alotto, P. Delfino, F. *et al.*, “A mixed face-edge finite element formulation for 3D magnetostatic problems”, IEEE Trans. Magn., Vol. 34, No. 5, pp. 2445-2448, Sep. 1998.
- [Kanayama 90] Kanayama, H. Motoyama, H. *et al.*, “Three-dimensional Magnetostatic analysis using Nedelec’s elements”, IEEE Trans. Magn., Vol. 26, No. 2, pp. 682-685, Mar. 1990.
- [Yun 97] Yun, Z. Q. B. Tan, D. and Hung, J. “Alternative vector formulations for magnetostatics”, IEEE Trans. Magn., Vol. 33, No. 2, pp. 1239-1242, Mar. 1997.
- [Golovanov 97] Golovanov, C. “Développement de formulations éléments finis 3-D en potentiel vecteur magnétique: application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement”, Thèse de doctorat, Spécialité genie électrique, Institut national polytechnique de Grenoble, 1997.
- [Biro 96] Biro, O. Preis K. and Richter, K. R. “On the use of the magnetic vector potential in the nodal and edge finite element analysis of 3-D magnetostatic problems”, IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No. 3, pp. 651-654, May 1996.
- [Fetzer 97] Fetzer, J. Kurz, S. and Lehner, G. “Comparison of analytical and numerical integration techniques for the boundary integrals in the BEMFEM coupling considering TEAM workshop problem no. 13”, IEEE Trans. Magn., Vol. 33, No. 2, pp. 1227-1230, Mar. 1997.
- [Coulomb 81] Coulomb, J. L. “Finite element three dimensional magnetic field computation”, IEEE Trans. Magn., Vol. 17, No. 6, pp. 3241-3246, Nov. 1981.
- [Preis 91] Preis, K. Bardi, I. *et al.*, “Numerical analysis of 3-D magnetostatic fields”, IEEE Trans. Magn., Vol. 27, No. 5, pp. 3798-3803, Sep. 1991.
- [Nath 93] Nath, S. and Lord, W. “Three dimensional hybrid finite-boundary element model for eddy current NDE”, IEEE Trans. Magn., Vol. 29, No. 2, pp. 1853-1856, Mar. 1993.
- [Cheriet 07] Cheriet, A. “Contribution à la modélisation tridimensionnelle par la methode des volumes finis de dispositifs électromagnétique”, Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique, Université de Biskra, 2007.

- [Cheriet 07] Cheriet, A. Feliachi, M. Mimoune, S. M. “Nonconforming mesh generation for finite volume method applied to 3-D magnetic field analysis”, *EPJ. App. Phys.*, Vol. 37, No. 2, pp. 191-195, Feb. 2007.
- [Mabrouk 13] Mabrouk, A. E. H., Cheriet, A., Feliachi, M., & Lakhdari, A. E. Transient axisymmetric FVM analysis of electodynamic levitation devices. *The European Physical Journal Applied Physics*, 61(1), 10602. 2013.
- [Guo 07] Guo, S. Wang, J. & Guo, J. A novel type of micropump using solenoid actuator for biomedical applications. In *Robotics and Automation*, IEEE International Conference on (pp. 654-659). IEEE. April. 2007.
- [Böhm 99] Böhm, S. Olthuis, W. & Bergveld, P. A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials. *Sensors and Actuators A: Physical*, 77(3), 223-228 1999.
- [Beckers 14] Beckers, G. & Dehez, B. Design and modeling of an electromagnetic peristaltic micropump. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2014 IEEE/ASME International Conference on (pp. 180-185). IEEE. July. 2014.
- [Zhu 08] Zhu, J. Lu, H. Guo, Y. & Lin, Z. Development of electromagnetic linear actuators for micro robots. In *Electrical Machines and Systems, ICEMS*. International Conference on (pp. 3673-3679).IEEE. Oct. 2008.
- [Getpreecharsawas 06] Getpreecharsawas, J. Puchades, I. Hournbuckle, B. Fuller, L. Pearson, R. & Lyshevski, S. An electromagnetic MEMS actuator for micropumps. In *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design. MEMSTECH*. Proceedings of the 2nd International Conference on (pp. 11-14). IEEE. May, 2006.
- [Chang 07] Chang, H. T. Lee, C. Y. Wen, C. Y. & Hong, B. S. Theoretical analysis and optimization of electromagnetic actuation in a valveless microimpedance pump. *Microelectronics journal*, 38(6), 791-799. 2007.
- [Lee 09] Lee, C. Y. Chen, Z. H. Chang, H. T. Wen, C. Y. & Cheng, C. H. Design and fabrication of novel micro electromagnetic actuator. *Microsystem technologies*, 15(8), 1171-1177. 2009.
- [Dau 09] Dau, V. T. Dinh, T. X. Nguyen, Q. D. Amarasinghe, R. Tanaka, K. & Sugiyama, S. Microfluidic valveless pump actuated by electromagnetic force. In *Sensors*, 2009 IEEE (pp. 679-682). IEEE. Oct. 2009.

- [Al-Halhouli 10] Al-Halhouli, A. T. Kilani, M. I. & Büttgenbach, S. Development of a novel electromagnetic pump for biomedical applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 162(2), 172-176. 2010.
- [Blanchard 05] Blanchard, D. Ligrani, P. & Gale, B. Single-disk and double-disk viscous micropumps. *Sensors and Actuators A: Physical*, 122(1) 149-158. 2005.

## **Résumé**

Le travail de cette thèse concerne la conception et la fabrication d'une nouvelle micro-pompe bidirectionnelle sans valves. Tout en présentant un état de l'art sur les micro-actionneurs utilisés dans les applications micro-pompes. La micro-pompe proposée dans cette thèse est réalisée à l'aide d'un micro-actionneur électromagnétique à aimants permanents, prévu pour écouler un liquide dans les deux directions sans l'utilisation de valves conventionnelles. Dans cette micro-pompe, le pompage du liquide est produit par un mouvement axial et cyclique de deux disques amagnétiques de formes particuliers contenant les aimants permanents, dont chaque cycle comporte trois étapes principales contrôlées par les courants d'alimentations de deux bobines. Afin d'identifier la caractéristique dynamique de la micro-pompe, une modélisation électromagnétique a été effectuée par un code de calcul utilisant la méthode MVF. Un premier prototype de cette micro-pompe a été fabriqué. Ses caractéristiques expérimentales telles que la fréquence de travail, le débit d'écoulement et la contre-pression montrent le succès du prototype fabriqué.

## **Mot clés**

Micro-actionneur, aimants, micro-pompe, sans valves, bidirectionnelle, MVF.

---

## **Abstract**

The work of this thesis concerns the design and manufacture of a new bidirectional valveless micro-pump. An overview of the state of the art on micro-actuators used in micro-pumps is presented. The micro-pump proposed in this thesis is carried out using an electromagnetic micro-actuator which contains permanent magnets, intended to flow a liquid in both directions without the use of conventional valves. In this micro-pump, the pumping of the liquid is produced by an axial and cyclic movement of two non-magnetic discs manufactured with a particular form and containing the permanent magnets, each cycle comprises three main stages controlled by the supply currents of two coils. In order to identify the dynamic characteristic of the micro-pump, an electromagnetic modeling was performed by a computer code using the FVM method. A first prototype of this micro-pump has been manufactured. Its experimental characteristics such as the working frequency, the flow rate and the back pressure show the success of the manufactured prototype.

## **Key words**

Micro-actuator, magnets, micro-pump, valveless, bidirectional, FVM.

---