



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique



Thèse

Préparée au sein du (laboratoire d'Electrotechnique de Batna (LEB))

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences en électrotechnique
Option : Matériaux Electrotechniques

Sous le Thème :

Contribution à l'Etude et la Modélisation d'une Pompe
Péristaltique

Présentée par :

BARKAT TOUFIK

Devant le jury composé de :

Mr. Taïbi Soufiane	Prof.	Université Batna2	Président
Mme. Kadid Fatima Zohra	Prof.	Université Batna2	Rapporteur
Mr. Abdessemed Rachid	Prof.	Université Batna2	Co-rapporteur
Mr. Benakcha Abdelhamid	Prof.	Université Biskra	Examineur
Mr. Rahem Djamel	Prof.	Université O.E.Bouaghi	Examineur
Mr. Dib Abderrahmane	Prof.	Université O.E.Bouaghi	Examineur

Année universitaire 2019 / 2020

À la mémoire de mon Père

À ma mère, qui m'a donné tout le courage et la patience

À ma femme

À mes frères et mes sœurs

A tous mes amis

A tous je dédie ce travail

Remerciements

En premier lieu et avant tous mes remerciements à dieu qui m'a donné la patience et la force pour finaliser mon travail de thèse.

*Je voudrais exprimer mes remerciements pour mon encadreur madame **KADID Fatima Zohra**, Professeur à l'Université de Batna 2, pour son encadrement, son aide et ses orientations.*

*J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **ABESSEMED Rachid**, Professeur à l'Université de Batna 2, pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté durant ces travaux. Je le remercie pour ses conseils avisés, ses nombreuses remarques et suggestions qui ont pu faire avancer le travail*

*Je souhaite également remercier les membres du jury composé de : Monsieur **Taïbi Soufiane**, Professeur au département d'électrotechnique, Université Mostefa Ben Boulaïd Batna2, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être président du jury de soutenance de cette thèse. Je remercie également Messieurs **Rahem Djamel**, et **Dib Abderrahmane**, Professeurs au département d'électrotechnique, Université O.E.Bouaghi, et Monsieur **Benakcha Abdelhamid**, Professeur au département d'électrotechnique, Université Biskra, pour l'importance qu'ils ont accordé à mon travail en acceptant d'être membre de ce jury.*

*J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **AGGOUNE Mohammed-Salah**, Maître de conférence à l'université de Batna 2, pour son aide précieuse et sa gentillesse.*

*Mes remerciements vont également au personnel du département en particulier Monsieur **BENAGGOUNE Said**, Professeur à l'université de Batna 2 pour son aide administrative et sa gentillesse.*

Contribution à l'Etude et la Modélisation d'une Pompe

Péristaltique

Résumé :

Ce travail est basé sur l'étude et la simulation numérique du comportement de la micropompe piézoélectrique à mouvement péristaltique. La nature de l'actionneur piézoélectrique est un disque piézoélectrique PZT-5H (Titano-Zirconate de Plomb) et le diaphragme est un dioxyde de silicium (SiO_2). En appliquant l'approche FSI (Fluid-Structure Interaction), la simulation de la micropompe sans valves est réalisée au moyen du logiciel Comsol 3.5 Multiphysics. La déformation due à la tension appliquée aux bornes du disque piézoélectrique entraîne un déplacement de la membrane, et par la même la circulation du fluide. A partir des résultats obtenus, la conception optimale a nécessité respectivement une épaisseur de 0.5 mm pour la membrane et pour l'actionneur piézoélectrique. L'étude des effets de la tension sur la déflexion du diaphragme et la nature du fluide sur le débit de la micropompe a été menée et des résultats de simulation probants ont été obtenus.

Mots clés :

Pompe péristaltique à actionneur piézoélectrique, Micropompe sans valves, Actionneur piézoélectrique, Méthode des éléments finis, Ecoulement du fluide.

Contribution to the Study and the Modeling of a Peristaltic Pump

Abstract:

In this work, the behavior of a valveless, diaphragm-founded, piezoelectric micropump is studied and simulated. The nature of the piezoelectric actuator is a PZT-5H (Lead Zirconate Titanate) piezo-disk and the diaphragm is made of Silicon dioxide (SiO_2). Applying Fluid-Structure Interaction (FSI) approach, the simulation for the valveless micropump is carried out in Comsol 3.5 Multiphysics. The deformation due to the applied voltage to the piezoelectric disk causes a displacement of the membrane, and therefore of the fluid flow. From the obtained results, the optimum design required a 0.5 mm thick membrane and piezoelectric actuator with a thickness 0.5 mm. The study of the effects of the voltage on the deflection of the diaphragm and the nature of the fluid on the flow rate of the micropump was done and convincing simulation results were obtained.

Keywords:

Piezoelectric peristaltic pump, Valveless Micropump, Piezoelectric actuator, Finite element method, Fluid flow.

المساهمة في دراسة وتصميم المضخة البيريستالتكية

يستند هذا العمل على الدراسة والمحاكاة العددية لسلوك ميكرو مضخة البيزوإلكتريكية ذات الحركة البيريستالتكية. بحيث قمنا باختيار القرص الضاغط من عنصر PZT-5H (رصاص الزركونيت تيتانيت) والغشاء الحاجز من ثاني اوكسيد السيليكون (SiO₂). ويتم استعمال طريقة المحاكاة والتقريب المسماة (FSI) تطبيق منهج التفاعل بين السوائل والمادة. يتم تنفيذ هذه المحاكاة العددية لسلوك ميكرو مضخة البيزوإلكتريكية ذات الحركة البيريستالتكية برنامج خاص يسمى ب COMSOL 3.5 متنوع الفيزياء ، وأيضا يعتبر المزج بين الطبيعة الكهربائية وبين تشوه القرص الضاغط وفرق الكمون المطبق عليه سببا يؤدي الى انحياز الغشاء الحاجب وهذا الأخير يفرض تحرك السائل من مدخل المضخة الى مخرجها. و من النتائج المحصل عليها نختار قيمة سمك الغشاء الحاجز 0.5 مم وسمك القرص الضاغط 0.5 مم. دراسة التأثيرات فروق الكمون على إزاحة الغشاء الحاجب وطبيعة السوائل على التدفق المضخة البيريستالتكية ودراسة اداء المضخة موضوعة في هذا العمل.

كلمات البحث :

المضخة البيريستالتكية ذات القرص بيزوإلكتريك الضاغط ،الميكرو مضخة دون صمام،القرص الكهروضاغط ، طريقة العناصر المحددة ،تدفق السائل .

SOMMAIRE

Résumé et mots clés.....	I
Sommaire.....	II
Liste des symboles.....	III
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I ETAT DE L'ART DES POMPES PÉRISTALTIQUES

I.1 Introduction	4
I.2 Actionneurs.....	4
I.2.1 Rôle d'un actionneur.....	4
I.3 Différents types d'actionneurs.....	5
I.3.1 Actionneur magnétique.....	5
I.3.2 Actionneur magnétostrictif.....	7
I.3.3 Actionneur électrostatique.....	7
I.3.4 Actionneur piézoélectrique.....	8
I.3.5 Actionneur thermique.....	9
I.3.6 Actionneur optique.....	10
I.4 Microvalves.....	11
I.4.1 Microvalves actives.....	11
I.4.2 Valves passives.....	12
I.5 Micropompes.....	12
I.5.1 Structure d'une micropompe.....	14
I.5.2 Paramètres d'une micropompe.....	15
I.5.3 Catégories des micropompes.....	17
I.5.4 Principes d'actionnement des micropompes à membrane.....	19
I.5.5 Micropompes piézoélectriques.....	19
I.5.6 Micropompes électrostatiques.....	22
I.5.7 Micropompes électromagnétiques.....	23
I.6 Conclusion.....	24

CHAPITRE II

TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX PIEZOÉLECTRIQUES

II.1 Introduction	26
II.2 Matériaux Piézoélectriques.....	26
II.2.1 Cristaux.....	26
II.2.2 Polymères.....	27
II.2.3 Céramiques Piézoélectriques.....	27
II.3 Piézoélectricité.....	28
II.3.1 Effet Direct.....	28
II.3.2 Effet inverse.....	28
II.4 Ferroélectricité.....	30
II.4.1 Polarisation.....	31
II.5 Cycle d'hystérésis.....	32
II.5.1 Température de Curie et transition de phase.....	33
II.6 Choix du matériau piézoélectrique.....	33
II.7 Domaines d'applications des matériaux piézoélectriques.....	34
II.8 Equations tensorielles de la piézoélectricité.....	35
II.8.1 Caractéristiques électriques et mécaniques des matériaux piézoélectriques.....	37
II.8.1.1 Permittivité.....	37
II.8.1.2 Compliance élastique.....	38
II.8.1.3 Constante de charge piézoélectrique.....	38
II.8.1.4 Constante de tension piézoélectrique.....	38
II.8.1.5 Coefficient de couplage électromécanique.....	39
II.8.1.6 Modes de Vibration.....	40
II.8.1.7 Facteur de qualité.....	41
II.9 Conclusion.....	42

CHAPITRE III

MODÈLES MATHÉMATIQUES DE LA MICROPOMPE

III.1 Introduction.....	45
III.2 Description de la micro pompe sans valves.....	45
III.3 Aspects théoriques des pompes sans valves.....	47
III.3.1 Modélisation du comportement mécanique de la membrane.....	47
III.3.2 Étude théorique de la déformation et la déflexion.....	48
III.3.3 Types d'éléments diffuseurs.....	48
III.3.4 Caractéristiques d'une pompe sans valves.....	49
III.4 Analyse des microdiffuseurs.....	50
III.4.1 Mécanique du fluide	50
III.4.1.1 Régimes de flux.....	50
III.4.1.2 Nombre de Reynolds.....	51
III.4.1.3 Hauteur équivalente.....	52
III.5 Equations de fluide.....	52
III.5.1 Equation d'énergie.....	52
III.5.2 Equation de Bernoulli.....	52
III.5.3 Flux laminaire pour des géométries particulières - équation de Poiseuille.....	53
III.5.4 Pertes par friction.....	54
III.5.5 Résultats empiriques (pertes par friction).....	55
III.6 Flux dans un diffuseur ou une buse.....	55
III.6.1 Définition et principe de fonctionnement.....	55
III.6.2 Calcul d'efficacité.....	57
III.7 Couplage fluide-structure.....	60
III.7.1 Formulation eulérienne.....	60
III.7.2 Formulation lagrangienne.....	61
III.7.3 Formulation ALE.....	62
III.7.4 Equations de Navier-stokes.....	62
III.8 Conditions aux limites.....	63
III.8.1 Conditions aux limites aux murs.....	63
III.8.2 Conditions aux limites à l'entrée/sortie.....	63
III.8.3 Limite d'interfaces fluide-solide.....	63
III.8.4 Conditions aux limites du solide.....	63
III.9 Conclusion.....	63

CHAPITRE IV

SIMULATION ET DISCUSSIONS DES PERFORMANCES DE LA MIRO POMPE PÉRISTALTIQUE

IV.1 Introduction.....	66
IV.2 Simulation de l'actionneur piézoélectrique.....	66
IV.3 Schéma et maillage.....	66
IV.4 Simulation de la micropompe.....	69
IV.4.1 Simulation de l'actionneur en 2D	69
IV.4.2 Simulation en 2D de la micro pompe.....	70
IV.4.3 Simulation en 3D de la micro pompe.....	71
IV.5 Etude des performances de la micropompe.....	77
IV.5.1 Variation de la tension de commande.....	77
IV.5.2 Influence de la distance entre les deux centres.....	78
(membrane – matériau piézoélectrique).	
IV.5.3 Influence de l'épaisseur de la colle de fixation.....	79
sur la défloration maximale.	
IV.5.4 Influence de l'épaisseur de la membrane.....	79
sur la déformation maximale.	
IV.5.5 Influence de la viscosité dynamique du liquide.....	81
sur le débit de la micro pompe.	
IV.5.6 Influence de la fréquence d'actionnement sur.....	81
le débit de la micro pompe	
IV.6 Conclusion.....	81
Conclusion Générale.....	83
Annexe.....	86
Bibliographie	93

Principales notations, symboles et constantes physiques

N°	Symbole	Description
1	\vec{F}_m	Force magnétique
2	\vec{I}	Courant électrique appliqué
3	\vec{B}	Induction magnétique
4	F_e	Force électrostatique
5	ϵ_0	Permittivité de vide
6	\vec{E}	Champ électrique appliqué
7	A	Surface entre les deux plaques parallèles
8	Δp	Différence de pressions
9	ΔT	Différence de températures
10	ϵ	Module d'élasticité
11	β	Coefficient de dilatation thermique
12	$\Delta V/V$	Pourcentage de la variation de volume
13	Q_{max}	Débit maximal
14	p_{max}	Pression maximale de sortie
15	dl	Longueur de fil
16	ϵ_p	Efficacité de la pompe
17	$P_{actinneur}$	Puissance requise pour faire fonctionner l'actionneur de la pompe
18	P_{pompe}	Puissance requise pour activer la pompe
19	$\Delta p_{chambre}^{ref}$	Pression dans la chambre de pompage
20	p_{sortie}	Pression à la sortie de la pompe
21	$p_{entrée}$	Pression à l'entrée

22	Δp_{valve}	Pression d'ouverture des valves d'entrée et de sortie
23	$p_{chambre}^{asp}$	Pression dans la chambre de pompage
26	ξ	Rapport de compression
27	f	Fréquence de fonctionnement de la pompe
28	P_r	Polarisation rémanente
29	\vec{E}_C	Champ électrique nécessaire pour réorienter les dipôles du matériau ferroélectrique.
30	P_S	Polarisation de saturation
31	C	Constante de Curie (°K)
32	T_0	Température de Curie-Weiss (°K)
33	T_a	Température absolue (°K)
34	\vec{D}	Induction électrique
35	S	Déformation
36	T	Contrainte
37	S_{ij}	Compliance élastique
38	s_{ij}^E	Compliance à champ électrique constant
39	s_{ij}^D	Compliance à déplacement électrique constant
40	d_{ij}	Constante de charge piézoélectrique
41	g_{ij}	Constante de tension piézoélectrique
42	k	Coefficient de couplage électromécanique
43	U_m	Énergie mutuelle d'interaction élasto-diélectrique
44	U_e	Énergie élastique

45	U_d	Énergie diélectrique.
46	FQ_m	Facteur de qualité mécanique
47	f_c	Fréquence centrale du matériau piézoélectrique
48	ω	Pulsation
49	L_m	Inductance
50	C_m	Capacité
51	R_m	Résistance
52	FQ	Facteur de qualité général
53	FQ_e	Facteur de qualité électrique
54	f_1, f_2	Fréquences à $-3dB$ en dessous et au-dessus de f_c .
55	A_1, A_2	Sections transversales
56	p	Pression différentielle
57	$W(x, y)$	Déformation de la membrane le long de Oz
58	D_r	Coefficient de rigidité
59	α	Constante fonction des paramètres mécaniques
60	ν	Coefficient de Poisson
61	E_l	Coefficients d'élasticité longitudinale
62	G	Coefficient d'élasticité transversal
63	η_{nd}	Efficacité de l'élément diffuseur
64	Q_0	Débit à vide
65	R_e	Nombre de Reynolds
66	ρ	Densité du fluide

67	μ	Viscosité du fluide
68	\bar{u}	Vitesse moyenne du fluide
69	D_h	Diamètre hydraulique du conduit
70	p_r	Périmètre de la section
71	h_p	Hauteur équivalente de pression
72	h_{cin}	Hauteur équivalente cinétique
73	g	Accélération
74	z_1, z_2	Altitude du fluide par rapport à un plan de référence (mètre)
75	τ	Contrainte de cisaillement locale
76	K	Coefficient de pertes
77	h_m	Hauteur équivalente à la perte supplémentaire pour une variation de section
78	gh_m	Terme des pertes supplémentaires
79	ξ_n	Coefficient de perte globale dans la direction buse
80	ξ_D	Coefficient de perte globale dans la direction diffuseur
81	Δp_d	Chute de pression à travers le diffuseur
82	Δp_n	Chutes de pression à travers le buse
83	v_d	Vitesse d'écoulement du fluide dans un diffuseur
84	v_n	Vitesse d'écoulement du fluide dans un buse
85	ϕ_d, ϕ_n	Débits dans un diffuseur et dans un buse
86	w	Vitesse arbitraire
87	F	Terme de force du corps
88	I	Matrice Identité

89	d_0	Distance entre les deux centres membrane et matériau piézoélectrique.
91	U	Tensions électrique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les nouveaux matériaux utilisés dans des dispositifs de conversion électromécanique, proposent une alternative intéressante aux solutions basées sur la mise en œuvre de matériaux électromagnétiques, et peuvent être source d'innovation et de découverte, par l'accès à des équipements de plus en plus sophistiqués, performants et moins coûteux. Dans ce contexte, les travaux de recherche sur les Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) représentent un effort considérable pour transformer radicalement les dispositifs (micromécanique, microchimique, micro thermique, micro optique, etc...) à l'échelle du micromètre par le biais de techniques de fabrication issues des technologies qui font le succès de l'industrie des circuits intégrés. Considérant l'essor de cette technologie et les nombreux avantages qu'ils représentent, les MEMS s'imposent dans la réalisation de micro capteurs ou de micro actionneurs. En effet, outre les têtes de lecture magnétique et d'impression en jet-d'encre, les capteurs de pression, inertiels, chimiques, etc., des micro systèmes émergent pour des applications de type systèmes comme les lab-on-chip, micro relais, micro connecteurs RF ou optique, micro soupapes, etc... Ce vaste champ d'application suscite cependant de nouveaux intérêts en termes de technologies alternatives et la mise en place de procédés et matériaux pour pallier les lacunes et défauts des micro systèmes. Le développement des micro actionneurs, basé initialement sur le mode d'actionnement électrostatique, qui ne permet pas de générer de fortes densités d'énergie, s'est heurté à un nombre limité d'actuation (actionnement). Il s'est ensuite accéléré avec l'intégration des actionnements thermique, magnétique, piézoélectrique, etc..., avec des films minces ou des films épais lorsque des énergies, déplacements ou forces plus importants sont requis. La technologie des circuits intégrés (photolithographie, dépôts de métaux, d'oxydes, dopage, etc...) associée à des techniques de micro usinage de surface et de volume permet de répondre à beaucoup d'applications et les matériaux actifs apportent de nouveaux espoirs, [1].

Depuis les années 1950, d'énormes progrès ont été réalisés dans la miniaturisation, en particulier dans l'électronique qui permet d'obtenir des circuits de plus en plus compacts. Dans un autre ordre d'idées, les composants mécaniques n'ont pas cessé d'être miniaturisés : il suffit de penser aux appareils photos qui se peuvent être contenus dans une poche tout en incorporant un zoom toujours plus puissant, en passant par la puissance, toujours plus grande que peut fournir une batterie dans un volume toujours plus étroit. Un besoin apparaît de plus en plus pour la miniaturisation de systèmes qui peuvent transformer l'énergie électrique en énergie mécanique afin de la transmettre à un ensemble de système extérieur. Parmi ces systèmes qui transforment cette énergie on trouve la micro pompe. C'est cette dernière qui sera l'objet de notre étude. Une pompe à inversion est une pompe mécanique qui fonctionne alternativement en aspiration et en expulsion. Elle dispose donc

d'une chambre de pompage à volume variable qui se remplit d'abord à partir de l'entrée de la pompe et qui expulse ensuite son contenu vers la sortie de celle-ci, [2].

Une telle pompe délivre évidemment un flux discontinu pulsé. Cet effet peut être plus ou moins marqué en fonction de l'amplitude et de la fréquence de la variation de volume. La variation peut être faite soit par une membrane flexible, soit par un piston. On distingue également une multitude de modes d'actionnement. Parmi, les plus répandues on trouve les actionneurs piézoélectriques, et électrostatiques. Pour obtenir un débit net par une micro pompe à inversion, il est nécessaire que le fluide soit aspiré depuis l'entrée lors du remplissage et soit expulsé de la chambre vers la sortie. Ceci peut être assuré soit par des valves actives ou passives soit par des éléments diffuseurs dans le cas d'une micro pompe sans valves, [3].

Le but de cette thèse consiste à étudier et modéliser une micro pompe péristaltique sans valves à base d'un actionneur piézoélectrique composé d'une membrane flexible et d'un matériau piézoélectrique collé à cette dernière. Pour ce faire, on propose dans le premier chapitre un état de l'art sur les différents actionneurs et leurs principes de fonctionnement. Par la suite, on introduit aperçu détaillé sur les micro pompes. Le deuxième chapitre consiste à étudier le phénomène piézoélectrique, son historique et son origine, la polarisation et le cycle d'hystérésis des matériaux ferroélectriques. Dans ce même ordre d'idées, on présente les matériaux les plus utilisés comme le PZT (Titano-Zirconate de Plomb) et leurs domaines d'application ; ainsi que les conditions permettant de porter un choix adéquat sur ces derniers. Le troisième chapitre porte sur les modèles mathématiques d'une micro pompe péristaltique sans valves à base d'un actionneur piézoélectrique. Le quatrième et dernier chapitre est dédié à la simulation et aux discussions des résultats obtenus. La modélisation du dispositif numérique a été approchée par une discrétisation à éléments finis au moyen du logiciel Multiphysics Comsol 3.5. Pour mettre en évidence les performances de la micro pompe, des variations de certains paramètres ont été introduites. Au vu des travaux publiés par d'autres auteurs, les résultats obtenus dans cette partie sont plus qu'encourageants.

CHAPITRE I
ETAT DE L'ART DES POMPES
PÉRISTALTIQUES

I.1 Introduction

La diversité des systèmes d'actionnement et de mesure a permis de développer un grand nombre de microsystèmes touchant principalement aux applications médicales, de défense et de maintenance industrielle. Les éléments fluidiques comme les vannes, valves et micro pompes sont très étudiés pour délivrer des petites quantités de substances et sont le plus souvent employées à des fins biochimiques. Il existe un réel besoin de manipuler (préhension, transport, pose, orientation,...) les petits objets pour notamment pouvoir assembler d'autres microsystèmes. L'endoscopie constitue également un environnement à part entière où les micro actionneurs apportent beaucoup. Avant d'entamer l'étude des micro pompes, il est nécessaire d'introduire l'actionneur qui représente l'un des éléments principaux de la micro pompe.

I.2 Actionneurs

Les pompes à membrane ont besoin d'un actionneur pour fonctionner. Un actionneur est un organe fournissant la force nécessaire à l'exécution d'un travail ordonné par une unité de commande distante. Idéalement, les actionneurs sont simples à fabriquer, consomment peu d'énergie et peuvent générer de grandes forces et de grands déplacements, tout en ayant un faible temps de réponse de manière à travailler à haute fréquence.

Avant d'introduire les types d'actionnement, il est important de préciser que l'actionneur seul ne fixe pas toutes les caractéristiques des pompes dans lesquelles il est intégré. En effet, d'autres paramètres comme la géométrie et les matériaux de la membrane, le volume de la chambre de pompage ou les différentes caractéristiques des clapets influent sur le fonctionnement de la pompe. Par exemple, des clapets trop souples peuvent limiter la fréquence d'actionnement de la micro pompe et ainsi diminuer le débit souhaité, [4].

I.2.1 Rôle d'un actionneur

Un actionneur a pour rôle de commander un processus à partir d'ordres émis par un système d'informations. Il gouverne les échanges d'énergies des organes principaux du processus. A échelle réduite, on attend d'un micro-actionneur, qu'il remplisse les mêmes fonctions. A l'heure actuelle, on se rend compte que la réalisation de micro-actionneurs pose d'importants problèmes lorsqu'on estime leur efficacité en rendement énergétique ou performances de mouvement, offrant souvent un maigre compromis entre la précision, l'amplitude et la puissance. La création de microsystèmes encourage la naissance de micro-actionneurs fiables et efficaces pour s'offrir l'accès à de nouvelles applications, [4].

Il existe différents types d'actionneurs. Chacun correspond à une micro pompe donnée. Chaque type d'actionneur présente des caractéristiques différentes en terme de volume d'injection suivant le déplacement du diaphragme, le temps de réponse, la consommation d'énergie et la tension d'entrée appliquée, [5].

Généralement, le choix d'un actionneur convenable dépend de la spécificité de l'application. Cela signifie qu'il faut absolument trouver un compromis entre la taille, le débit, la force, le déplacement et la consommation de l'énergie. La figure (I.1) présente les différents actionneurs existant actuellement dans la littérature, [5]. Les énergies d'actionnement peuvent être thermiques, électriques, magnétiques, optiques ou acoustiques.

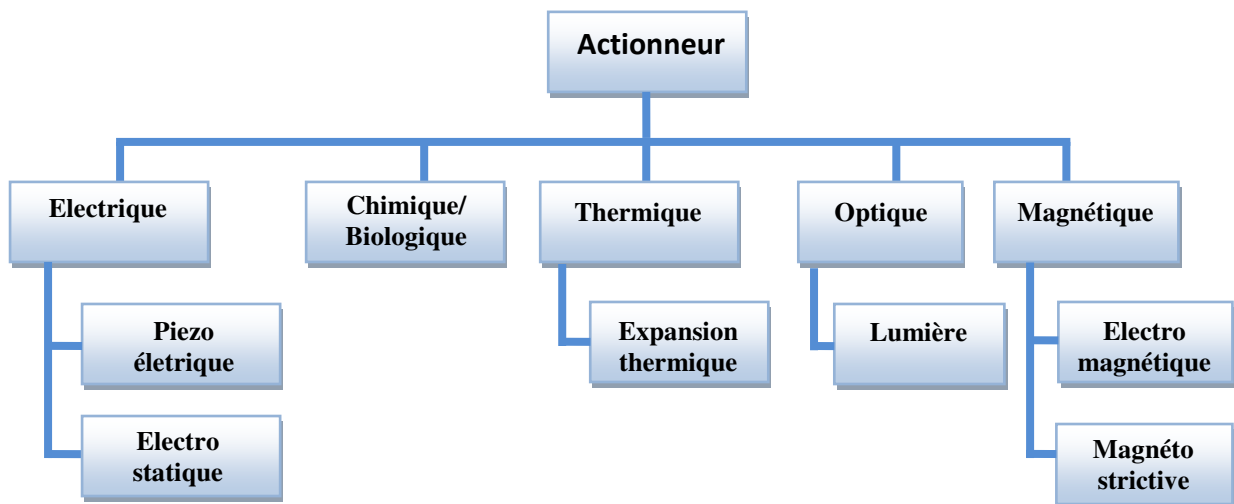


Figure I.1 Types d'actionneurs.

Parmi les applications d'actionneurs, on peut citer :

- les valves et les miro pompes ;
- le commutateur et l'interrupteur ;
- le haut-parleur ;
- le résonateur ;
- la tête d'imprimante à jet d'encre ;
- la tête d'écriture magnétique.

I.3 Les différents types d'actionneurs

I.3.1 Actionneur magnétique

Une bobine est alimentée pour générer un champ électromagnétique visant à repousser ou attirer un aimant permanent collé sur une membrane (diaphragme). Les forces attractives ou répulsives générées sont adjacentes au conducteur et sont proportionnelles au courant appliqué dans la bobine, figure (I.2).

On peut déduire que la force de la place dans un conducteur parcouru par un courant I sur chaque élément $d\vec{l}$ est donnée par :

$$d\vec{F}_m = I d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (I.1)$$

Où \vec{B} est le champ magnétique et I est le courant électrique appliqué.

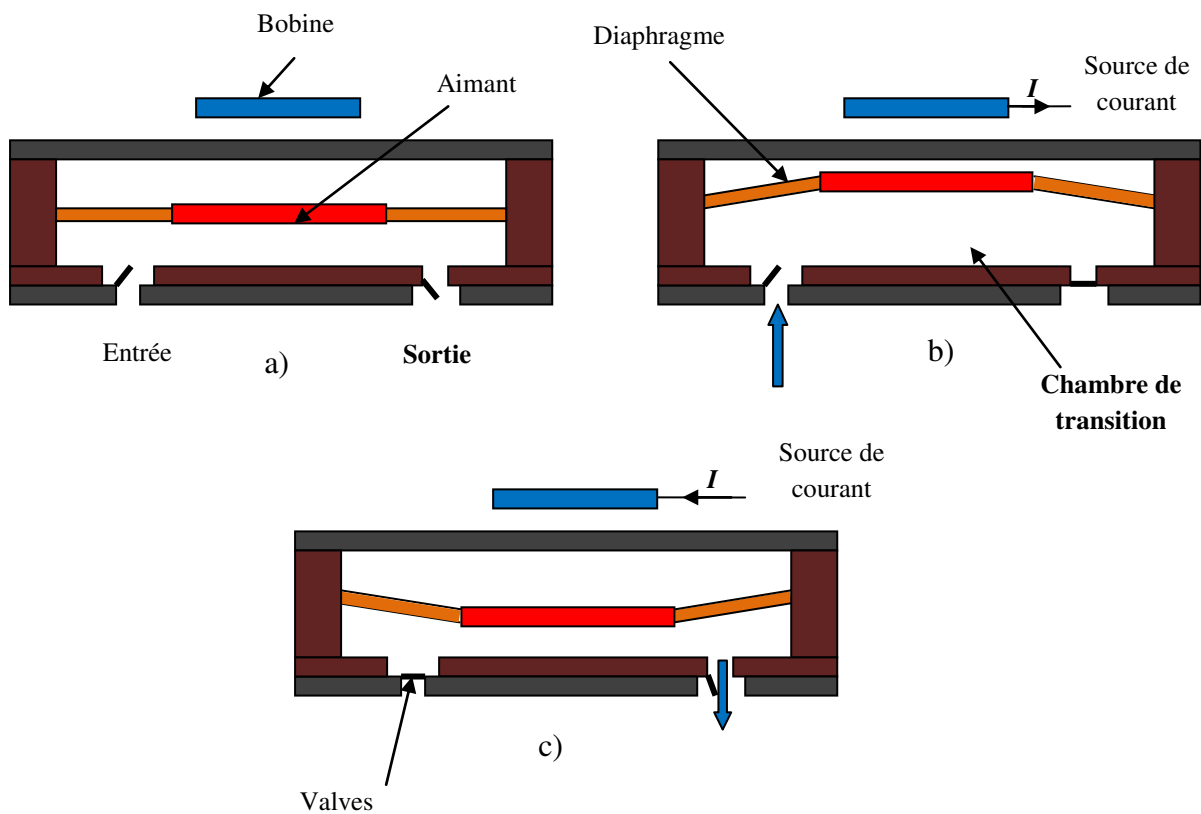


Figure I.2. Micro pompe à actionneur électromagnétique: **a)** état initial (le courant est nul); **b)** déflexion de la membrane vers le haut (aspiration du liquide) et **c)** déflexion de la membrane vers le bas (pompage).

Cet actionneur électromagnétique a une efficacité élevée (temps de réponse court) lors de la conversion de l'énergie électromagnétique en un mouvement mécanique. Les avantages de l'actionneur électromagnétique sont la forte déflexion du diaphragme et la possibilité d'atteindre de hautes fréquences de vibration, donc une grande quantité de liquide. Vu que les champs électromagnétiques apparaissent et disparaissent rapidement, ces dispositifs permettent de fonctionner à des vitesses très rapides, [5].

I.3.2 Actionneur magnétostrictif

Un autre type d'actionneurs magnétiques a pour principe la magnétostriction qui est induite par un champ magnétique extérieur. Ce type d'actionneur est composé des matériaux spécifiques (ferromagnétiques) qui se déforment sous l'effet d'un champ magnétique sans application d'un courant au contraire à un actionneur électromagnétique. Les matériaux magnétostrictifs sont utilisés dans les capteurs de champ magnétique, dans les mémoires magnétiques et dans les applications à déplacement magnétique. L'inconvénient de ces matériaux magnétostrictifs est que les déformations sont faibles, [6].

I.3.3 Actionneur électrostatique

Le fonctionnement de l'actionneur électrostatique est basé sur la force d'attraction entre les charges qui ont lieu entre deux plaques parallèles, dont l'une correspond à une électrode fixe et l'autre à une électrode mobile, figure (I.3). Lorsqu'une tension électrique est appliquée aux bornes de ces deux plaques, la force électrostatique (F_e) résultante provoque le déplacement de membrane de la micropompe. Cette force est donnée par :

$$F_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 A E^2 \quad (\text{I.2})$$

où

ε_0 est la permittivité de l'espace libre, E le champ électrique appliqué et A la surface entre les deux plaques parallèles. Lorsque la tension électrique d'actionnement est diminuée, la membrane revient à sa position initiale.

Les principaux avantages des micro pompes électrostatiques sont :

- une faible consommation d'énergie ;
- un temps de réponse court comparé aux autres types de micro pompes ;

- la déformation de la membrane peut être facilement contrôlée.

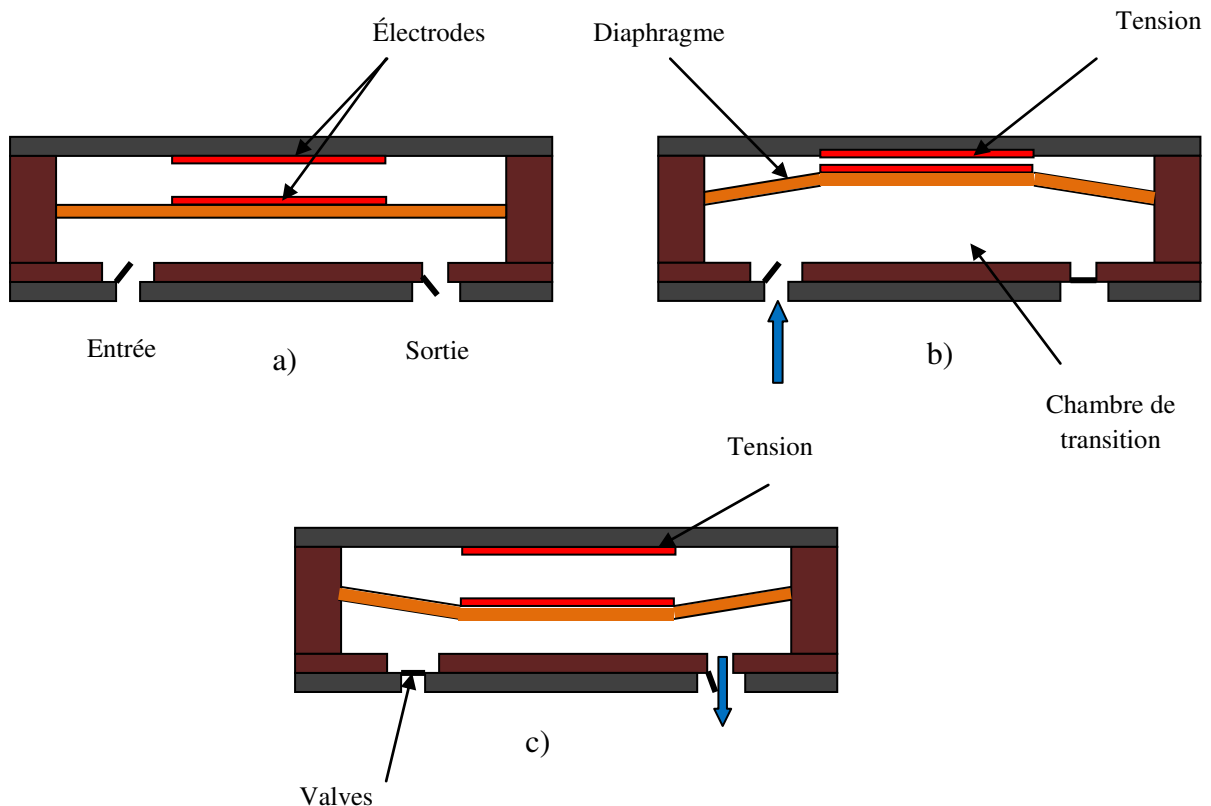


Figure I.3 Fonctionnement d'une micro pompe à actionneur électrostatique: a) état initial (la tension est nulle); b) déflexion de la membrane vers le haut (aspiration du liquide) et c) déflexion de la membrane vers le bas (pompage).

I.3.4 Actionneur piézoélectrique

Le principe de cet actionneur est basé sur l'application d'un champ électrique sur un cristal piézoélectrique, figure (I.4). L'effet piézoélectrique (effet électrostrictif) est lié au couplage qui existe entre la déformation mécanique et celui de la polarisation électrique.

Dans le concept de l'actionneur piézoélectrique, l'idée de base est de convertir l'effort transversal piézoélectrique à un déplacement perpendiculaire. La fabrication des actionneurs piézoélectriques intégrés dans les microsystèmes à base de silicium (Si) requiert le dépôt d'une couche mince supplémentaire de matériau piézoélectrique sur le silicium.

Ce processus, étant relativement complexe. Cela explique pourquoi la plupart des micro pompes à base de Si se manifestent généralement en un disque piézoélectrique collé sur le diaphragme.

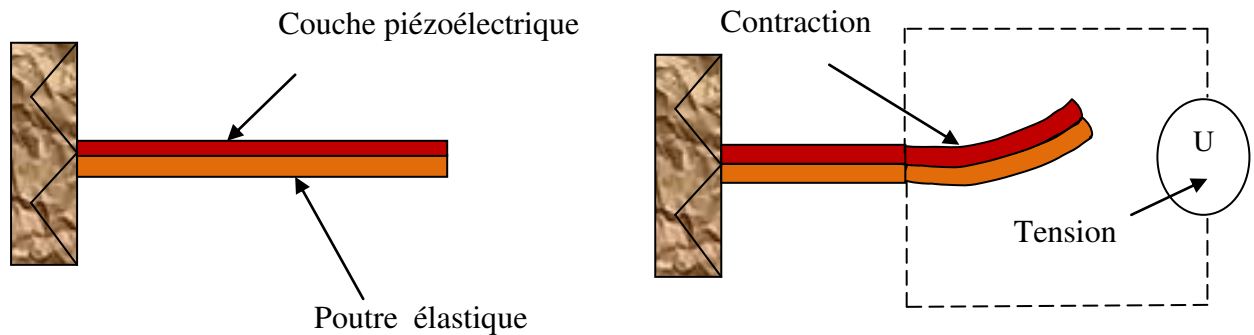


Figure 1.4 Principe de l'actionnement piézoélectrique.

La réponse de ces micro actionneurs est très rapide. Ils opèrent avec une force et une vitesse élevées. La déflexion dépend de la tension électrique élevée. Le diaphragme revient ensuite à sa position initiale lorsque la tension est éliminée.

I.3.5 Actionneur thermique

Cet actionneur est affecté par le changement de la température. Différents types sont utilisés: l'actionneur bimétallique, les alliages à mémoire de forme et l'actionneur pneumatique. L'actionneur bimétallique est obtenu par des changements de la température de deux matériaux collés ensemble et ayant un coefficient de dilatation thermique différent. L'actionneur pneumatique, quant à lui, est obtenu en utilisant une source externe d'air comprimé (sous pression).

Dans le cas thermo pneumatique, c'est l'expansion du volume d'un fluide qui est utilisé comme actionneur. Le fluide peut être un liquide qui se transforme en un gaz, ou tout simplement un gaz qui se dilate lors du réchauffement, figure (I.5). Le changement de la pression des liquides est exprimé par :

$$\Delta p = \chi \left(\beta \Delta T - \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (I.3)$$

Où Δp est la différence de la pression, ΔT la différence de la température, χ le coefficient compressibilité isotherme, β le coefficient de dilatation thermique et V le volume initial.

Pour finir, les alliages à mémoire de forme (AMF) et en particulier les alliages NiTi (Nitinol ou Nickel titanium) peuvent être utilisés pour produire une énergie de stockage très élevée. L'effet mémoire de forme repose sur l'existence d'une transformation de phase réversible de type martensitique thermo élastique entre un état structural haute température appelé *austénite* et un état structural basse température appelé martensite, [7].

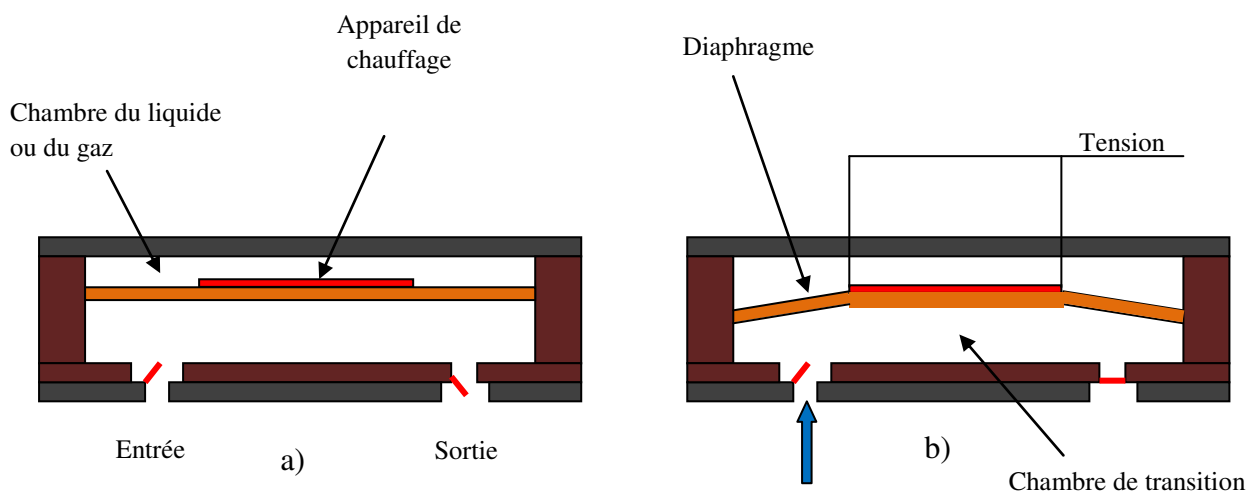


Figure I.5 Fonctionnement d'une micro pompe à actionneur thermique: a) état initial et b) expansion du volume d'un fluide provoquant une aspiration du liquide vers l'intérieur.

Les performances et la consommation d'énergie dépendent de la température environnante. Les déplacements importants ne sont réalisables qu'à des températures élevées. Le changement de la température peut être induit par l'utilisation d'un chauffage résistif opérant à faible voltage qui nécessite un système de refroidissement, [7].

I.3.6 Actionneur optique

La lumière peut être utilisée pour réaliser un déplacement. Elle peut être transformée directement ou indirectement en une déformation mécanique. Ce signal optique excite, par la génération des photons, un actionneur en silicium qui modifie à son tour la pression électrostatique.

Plusieurs micro pompes ont été développées se servant des micro actuations optiques. Parmi elles, celle qui est activée par un rayon Laser. Cette lumière fournie est convertie en chaleur qui vaporise le liquide de la chambre de la micro pompe et déplace le diaphragme. Elles démontrent, entre autre, un grand potentiel pour le transport du sang, [7].

I.4 Les micro valves

Pour contrôler la circulation des fluides de quelques microlitres dans de très petites canalisations, il faut construire une ou plusieurs chambres. Ces chambres jouent le rôle d'une phase de transition entre une entrée et une sortie et des micro valves y sont installées afin de contrôler la circulation du fluide.

Les valves se divisent en deux types: passif et actif. La valve passive fonctionne à l'aide d'un fluide en circulation qui l'ouvre et de la pression inverse qui la ferme. Quant à la valve active, elle est actionnée de l'extérieur. Par ailleurs, en utilisant la technique de la micro fabrication d'une micro pompe, il est possible de fabriquer ces deux types de micro valves (active et passive) en fonction des besoins et des performances.

I.4.1 Les micro valves actives

Les valves actives communément appelées valves bidirectionnelles intègrent des actionneurs électromagnétiques, électriques (piézoélectriques ou électrostatiques) ou thermiques. Elles sont intégrées dans les micro pompes et sont faciles à contrôler.

Le déplacement du diaphragme des valves piézoélectriques nécessite un actionneur qui est composé d'électrodes et des plaques piézoélectriques qui se mettent en mouvement lors de l'application d'une tension électrique. En exerçant une force électrostatique entre ces deux électrodes, l'actionneur électrostatique peut également être utilisé pour ouvrir et fermer ces valves actives, [7],[8].

Les valves actives qui opèrent en changeant la température du liquide déposé dans une chambre nécessitent des actionneurs thermo pneumatiques. L'échauffement de ce liquide se fait à l'aide d'une résistance. On arrive alors à augmenter la pression à l'intérieur de la chambre contenant le liquide, ce qui déforme le diaphragme et les valves s'ouvrent et se ferment selon les pressions.

Les valves actives qui fonctionnent en utilisant un actionneur magnétique opèrent grâce à l'application d'un courant dans une bobine extérieure permettant d'ouvrir et de fermer les orifices des valves. Ce type de valves présente de la souplesse et des performances élevées durant son fonctionnement. Malheureusement, elles montrent des signes de fatigue et d'usure pour les pièces mobiles, ce qui raccourcit leur durée de vie. De plus, leur coût est élevé en raison de la complexité de fabrication, [7],[9].

I.4.2 Les valves passives

Contrairement aux valves actives, les valves passives sont unidirectionnelles et opèrent sans actionneur extérieur. Elles sont contrôlées par les écoulements, ce qui ne nécessite pas l'utilisation d'énergie extérieure, [10].

On distingue deux types des valves passives. Les valves passives fixes et les valves anti-retour (clapet). Dans les valves anti-retour, il existe une pièce mécanique qui empêche l'écoulement de fluide dans le sens inverse. On trouve ces pièces sous plusieurs formes (diaphragme, clapet (anti-retour) et balle).

Pour ce qui est des valves passives fixes, elles n'ont pas besoin de parties mobiles, car la direction d'écoulement est le résultat de l'agencement des composants. Ces valves endurent les pressions élevées. Elles peuvent toutefois se rompre en raison de l'utilisation à long terme. L'autre inconvénient majeur est qu'elles ont des problèmes de collage, en particulier celles qui ont une pression d'ouverture faible, [10].

L'inconvénient de ces deux types de valves réside au niveau du temps de réponse marqué par le temps de transition entre la fermeture et l'ouverture d'une valve. Cet inconvénient est négligé dans les micro pompes sans valves (valveless micropump), comme l'accélérateur magnéto hydrodynamique qui met en mouvement le fluide grâce à une combinaison de deux champs électrique et magnétique.

I.5 Les micro pompes

Les maladies chroniques font appel aux systèmes implantables miniaturisés. Une de ces méthodes du traitement consiste à utiliser une micro pompe pour injecter les médicaments. Cette micro pompe est une partie principale de ces systèmes d'injection.

Plusieurs travaux concernant les micro pompes ont été réalisés et divers articles correspondants publiés, [6]. Grâce à une interface électronique de contrôle, les micro pompes deviennent de plus en plus flexibles et permettent le transit de fluides à travers des canaux de faibles dimensions. Cette opération est généralement actionnée par une commande extérieure (électrique, électromagnétique ou piézoélectrique). Ces micro pompes couvrent de nombreux domaines d'applications. À l'échelle microscopique, elles peuvent être fabriquées par des MEMS dans le domaine biomédical servant à l'injection de médicaments. Les critères de conception d'une micro pompe implantable sont :

- les petites dimensions;
- la biocompatibilité;
- un déplacement suffisant pour atteindre les débits souhaités et précis;
- une pression de pompage suffisante pour déplacer les médicaments;
- une faible consommation d'énergie;
- un fonctionnement sûr pendant une période prolongée.

Grâce aux nombreuses études faites sur les micro pompes basées sur des MEMS, leur taille a été miniaturisée (l'échelle des canaux est de l'ordre des quelques dizaines ou des centaines des micromètres) et le contrôle et la génération des quantités minimales de fluides ont été grandement facilités.

Dans le domaine biomédical, ces micro pompes sont utilisées dans les systèmes d'injection des médicaments à usage unique ou dans les microsystèmes chimiques d'analyse. Elles sont aussi employées dans les systèmes chimiques micro fluidiques et présentent beaucoup d'avantages :

- réduction d'intervention manuelle;
- réduction des quantités d'échantillons;
- réduction de la consommation de réactifs;
- amélioration de la qualité des expériences;
- réduction du temps d'analyse;
- réduction du coût de nombreux processus standards.

Dans les systèmes de libération de médicaments, l'emploi de micro pompe offre beaucoup d'avantages pour des patients atteints de maladies chroniques. De plus, grâce à une automatisation du pompage, ces dispositifs permettent de réduire les douleurs et assurent l'injection des médicaments vers la cible avec de grandes précisions et fiabilité.

La première micro pompe MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) a été d'abord développée dans les années 1980 (micro pompe de Smith en 1984), [6].

C'était un système péristaltique (c'est un type de micro pompes à déplacements positifs) sur silicium, dont le rôle était de contrôler l'injection de l'insuline pour maintenir le niveau de glycémie constant.

I.5.1 Structure d'une micro pompe

Une micro pompe est divisée en quatre parties, figure (I.6):

- la chambre de transition des médicaments;
- les micro valves unidirectionnelles, telle que la valve d'entrée (reliée à un réservoir extérieur des médicaments);
- le circuit de contrôle;
- l'actionneur (piézoélectrique, magnétique, électrostatique,...).

La conception d'une micro pompe est tributaire de l'application souhaitée. Pour cela, il faut définir :

- le principe de pompage le plus adéquat pour l'application (catégorie de la micro pompe utilisée);
- l'actionneur qui correspond le mieux pour atteindre les performances désirées;
- le type de micro valves à employer, [4].

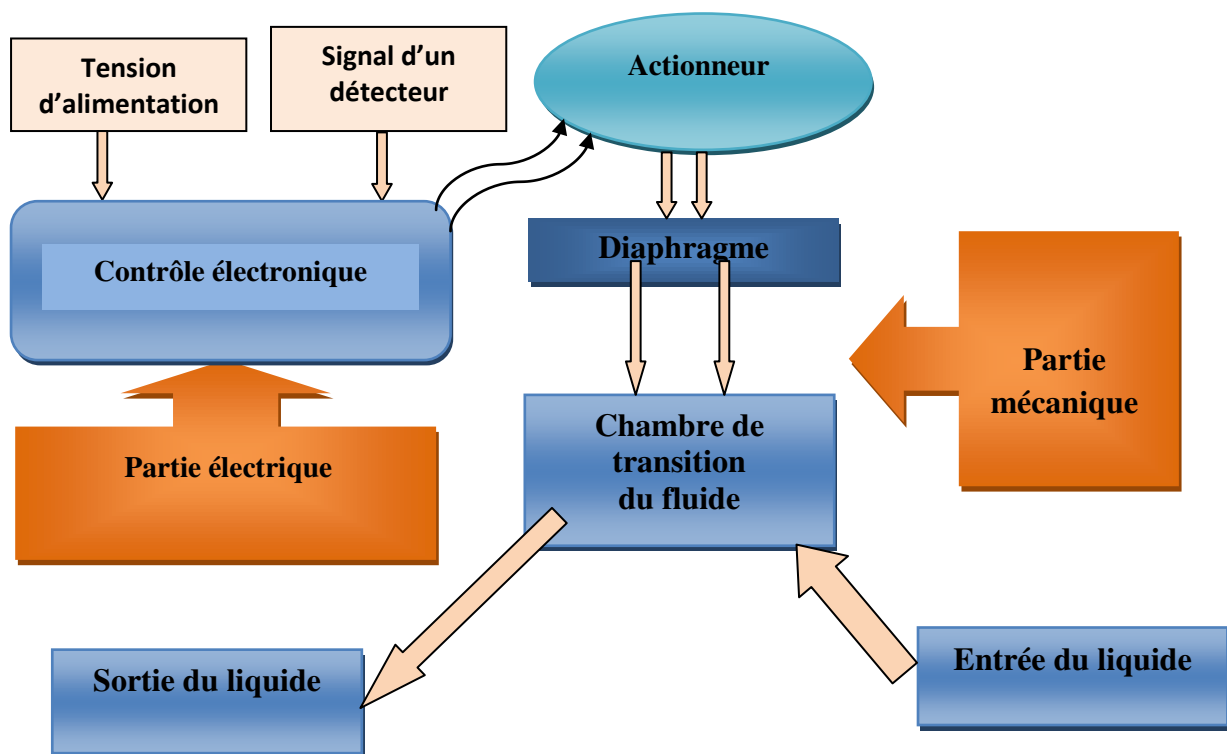


Figure 1.6 Description simplifiée du fonctionnement d'une micro pompe.

I.5.2 Les paramètres d'une micro pompe

Les performances d'une micro pompe dépendent de son principe de fonctionnement. Une micro pompe est principalement caractérisée par les paramètres suivants, [2]:

- le débit maximal représenté par Q_{max} (obtenu en l'absence de contre pression);
- la contre pression représentée par p_{max} (la contre pression s'oppose au travail effectué par la pompe), le débit devient nul pour un maximum de contre pression;
- les fréquences de fonctionnement (celles des micro pompes à membranes seulement);
- la fréquence de résonance;
- la puissance requise pour activer la pompe; cette puissance peut être exprimée comme suit :

$$P_{pompe} = Q \Delta p \quad (I.4)$$

où Q est le taux du volume de l'écoulement et Δp la différence de la pression produite par la pompe.

L'efficacité de la pompe (ε_p) peut être exprimée comme suit:

$$\varepsilon_p = \frac{P_{pompe}}{P_{actinneur}} \quad (I.5)$$

où $P_{actinneur}$ est la puissance requise pour faire fonctionner l'actionneur de la pompe.

De nombreux facteurs peuvent affecter le rendement de la pompe comme les pertes par frottement (rendement mécanique), la fuite du liquide, les pertes qui sont dues à la construction imparfaite (présence de bulles),...

Un autre paramètre important est l'auto-amorçabilité de la pompe ; c'est-à-dire sa capacité à aspirer le liquide au démarrage, alors que sa chambre de pompage est initialement remplie d'air. Cette capacité d'amorçage est limitée par la compressibilité de l'air qui empêche d'atteindre les pressions suffisantes à l'ouverture des valves d'entrée et de sortie de la pompe. Soit Δp_{valve} la pression d'ouverture des valves d'entrée et de sortie, pour que la valve de sortie s'ouvre au refoulement, la pression dans la chambre de pompage $\Delta p_{chambre}^{ref}$ doit être telle que, [2]:

$$\Delta p_{chambre}^{ref} \geq p_{sortie} + \Delta p_{valve} \quad (I.6)$$

où

p_{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 $p_{chambre}^{asp}$ doit être telle que :

$$p_{chambre}^{asp} \leq p_{entrée} - \Delta p_{valve} \quad (I.7)$$

où

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

$$\frac{p_{chambre}^{ref}}{p_{chambre}^{asp}} = \frac{V_0}{V_0 + \Delta V} \quad (I.8)$$

où

V_0 est le volume de la chambre de pompage à la fin de la phase de refoulement (appelé volume mort) ΔV est le volume déplacé par la membrane lors d'un cycle de fonctionnement de la pompe (appelé cylindrée). En définissant le rapport de compression $\xi = \frac{\Delta V}{V_0}$ [2], l'auto-amorçabilité d'une pompe à membrane est alors définie par la condition :

$$\xi \geq \frac{p_{sortie} + \Delta p_{valve}}{p_{entrée} - \Delta p_{valve}} - 1 \quad (I.9)$$

Enfin, le dernier paramètre important est la fréquence de fonctionnement f de la pompe. En effet, le débit Q de la pompe dans son régime linéaire de fonctionnement peut être approximé par, [2] :

$$Q = \Delta V \cdot f \quad (I.10)$$

Ainsi, la fréquence d'actionnement peut être ajustée pour atteindre le débit souhaité et la cylindrée maximisée pour favoriser l'amorçabilité de la pompe. Les différentes caractéristiques des micro pompes à membrane ayant été exposées, vont permettre d'évaluer les performances des micro pompes à membrane et leur principe d'actionnement.

I.5.3 Catégories des micro pompes

La miniaturisation et la biocompatibilité des matériaux sont les critères essentiels dans la conception d'une micro pompe destinée pour un dispositif médical implantable. Généralement, il existe deux catégories de micro pompes [5], [9] : mécaniques ou non-mécaniques.

Le diagramme de la figure (I.7) illustre les 3 types de micro pompes mécaniques: (1) rotative; (2) réciproque et (3) apériodique. Le premier type présente des micro pompes à rotor unique ou multiple.

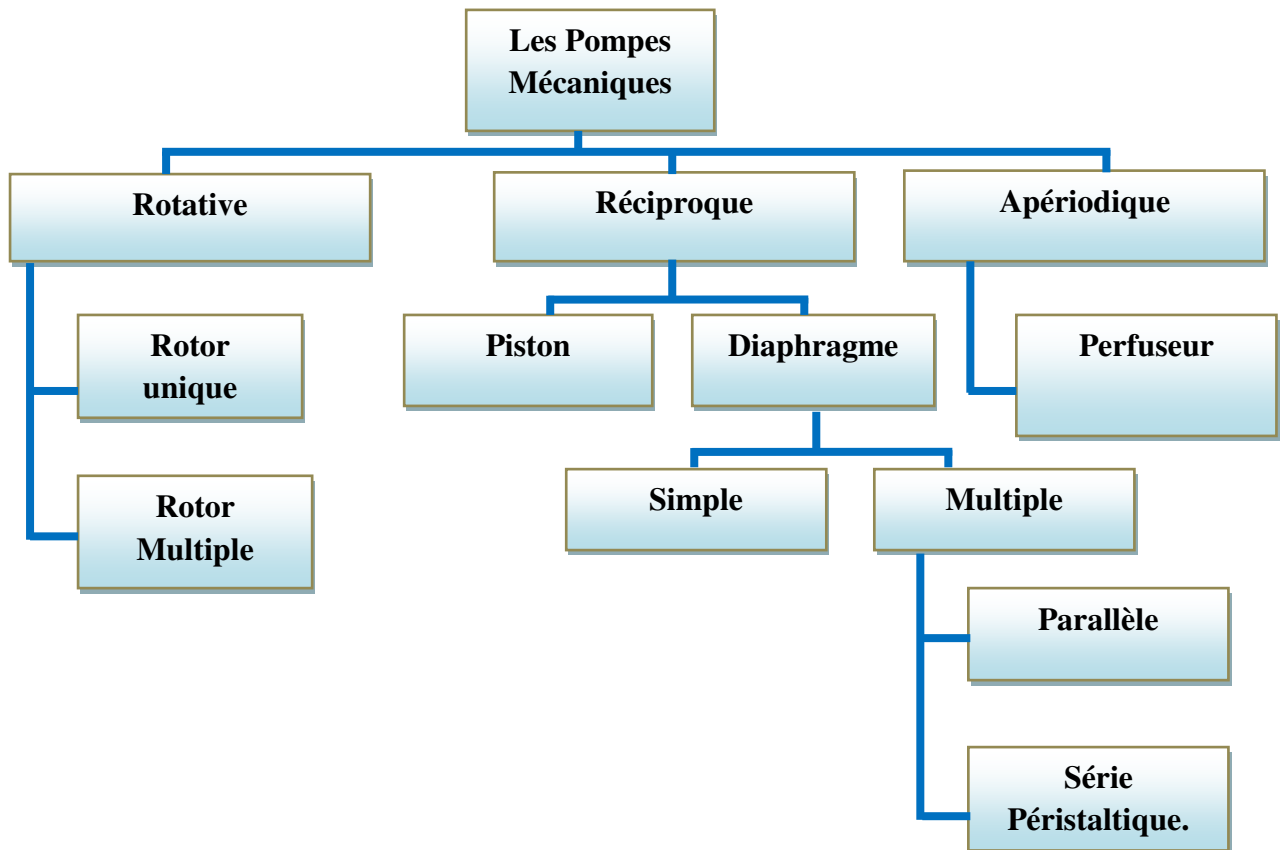


Figure I.7 Les différents types de micro pompes mécaniques.

Le deuxième comprend des micro pompes avec piston ou diaphragme (multiple, parallèle, série péristaltique). Tandis que le troisième type présente les micro pompes à perfusion (en exerçant une pression positive).

Dans les micro pompes mécaniques, les actionneurs peuvent être électriques, magnétiques ou thermiques. L'actionneur représente la partie la plus importante d'une micro pompe et le choix d'actionneur définit la performance et la consommation de la micro pompe, car chaque actionneur a besoin d'une source d'énergie et a un temps de réponse. La littérature ne définit pas suffisamment quel est le meilleur actionneur à utiliser, chacun possédant ses avantages et ses inconvénients.

La micro pompe employant un actionneur électrique à une faible consommation d'énergie, mais requiert une tension élevée que celle d'un actionneur magnétique. De plus, l'actionneur magnétique a une déviation plus grande que la membrane (diaphragme) et une réponse plus rapide.

Les micro pompes mécaniques utilisent une force périodique produite par un actionneur externe. Cet actionneur externe est utilisé pour convertir l'énergie absorbée en une énergie mécanique, [7]. L'énergie absorbée est donc convertie en force appliquée sur le diaphragme de la micro pompe. Cette énergie peut être une énergie électrique, magnétique, thermique ou optique. À cause de cette force d'actionnement, le diaphragme (membrane) change le volume du récipient de fluide. Le changement de volume résultant de cette action produit une pression directe augmentée jusqu'à la valeur requise pour déplacer le fluide à travers des micro valves et dans la ligne de sortie.

Par ailleurs, les micro pompes non-mécaniques n'ont pas besoin d'actionneur pour déplacer les fluides. Le diagramme de la figure (I.8) illustre les types de micro pompes non-mécaniques (micro pompes continues): (1) les micro pompes centrifuges; (2) électro hydrodynamiques (EHD); (3) magnétohydrodynamiques (MHD); (4) les micro pompes acoustiques et (5) les micro pompes électro osmotiques (EO) qui sont basées sur les interactions entre le fluide et un champ électromagnétique, [6],[7].

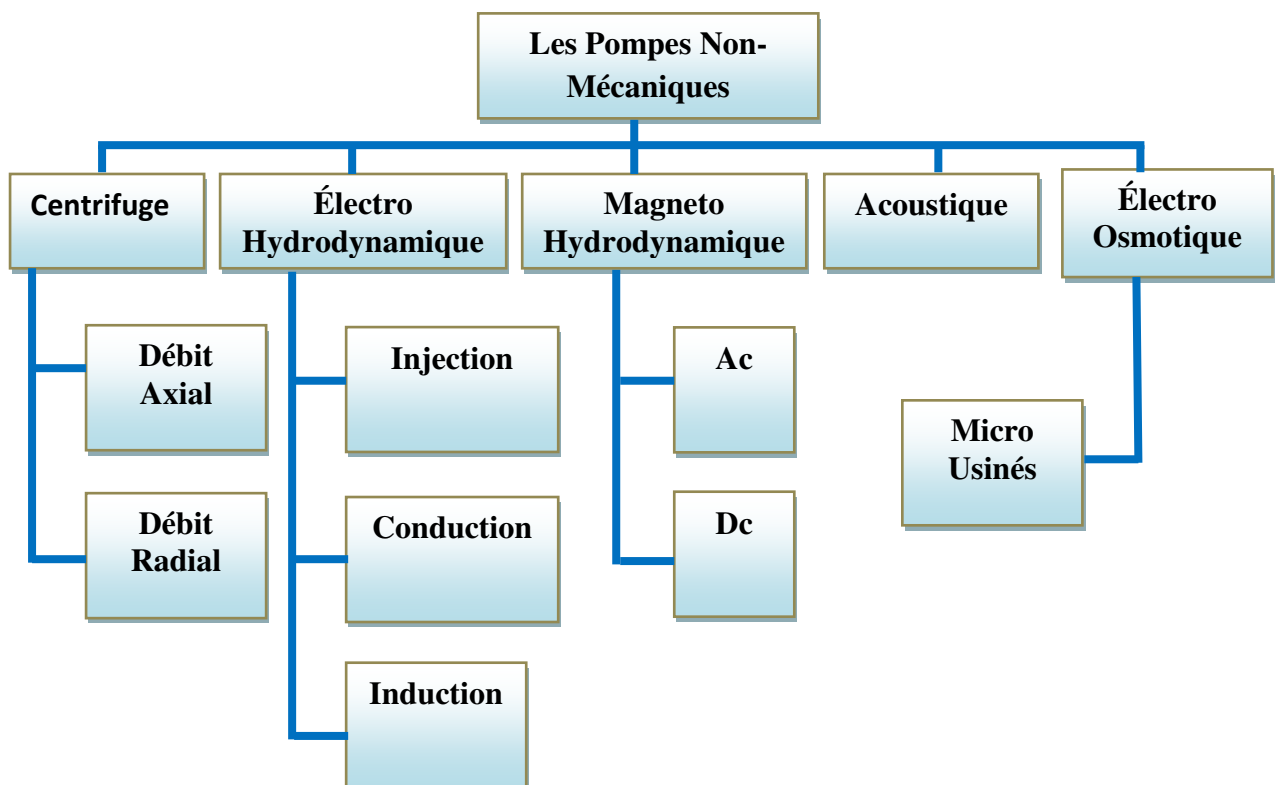


Figure I.8 Les différents types de micro pompes non – mécaniques.

La plupart des micro pompes non-mécaniques ont un long temps de réponse. D'autre part, leur débit n'est pas élevé et n'atteint pas parfois le 10 ml/min, [5]. Par contre, ce faible débit convient davantage au dosage précis des fluides.

En bref, comme il a été mentionné ci-dessus, les pompes non-mécaniques offrent des débits beaucoup plus stables et précis que les pompes mécaniques, mais ne sont pas adaptés à la manipulation des liquides à forte viscosité, [4], [5].

Les micropompes précédemment mentionnées n'ont pas besoin de membranes d'actuations pour acheminer les fluides d'un site à un autre. Ces micro pompes présentent toutefois un inconvénient, puisqu'elles sont limitées par leur mécanisme et par leurs matériaux à des fluides présentant des caractéristiques spécifiques. Leur pompage est qualifié de sélectif.

I.5.4 Les principes d'actionnement des micro pompes à membrane

La pompe à membrane est une pompe de type volumétrique, également appelée pompe à déplacement positif. Pour créer le débit de fluide, gaz ou liquide, une membrane élastique est déplacée et génère une variation de volume. Lorsque la membrane est tirée vers le haut, elle produit l'aspiration du fluide ; lors de la descendre vers le bas, le fluide est refoulé ce qui génère une pression de sortie ou hauteur de refoulement.

Ce déplacement alternatif de va et vient est réalisé soit par un moteur électrique, soit par actionneur (piézoélectrique, électromagnétique, électrostatique, ...) qui applique directement à la membrane le mouvement de translation linéaire.

En combinaison de cette variation de volume créé par le déplacement de la membrane, des clapets (soupapes) situés à l'aspiration et au refoulement de la pompe gèrent le passage et le sens du fluide pour obtenir le débit.

Dans qui suit, les performances de différentes pompes à membranes sont présentées et comparées en fonction de leur principe d'actionnement, de manière à faire ressortir les tendances fortes liées au principe d'actionnement en lui-même, [5].

I.5.5 Les micro pompes piézoélectriques

L'utilisation de céramiques piézoélectriques telles que le PZT en tant qu'actionneur de micro pompes date des années 1970 avec le développement de la technologie « jet d'encre », [7]. L'actionneur piézoélectrique contracte la chambre de la tête d'impression, éjectant ainsi des gouttes d'encre vers le support. Deux configurations d'actionneurs piézoélectriques sont possibles : la configuration en contraintes latérales et la configuration en contraintes axiales, [8],[9]. La figure

(I.9) illustre le principe de fonctionnement d'une micro pompe avec actionneur piézoélectrique en configuration de contraintes latérales.

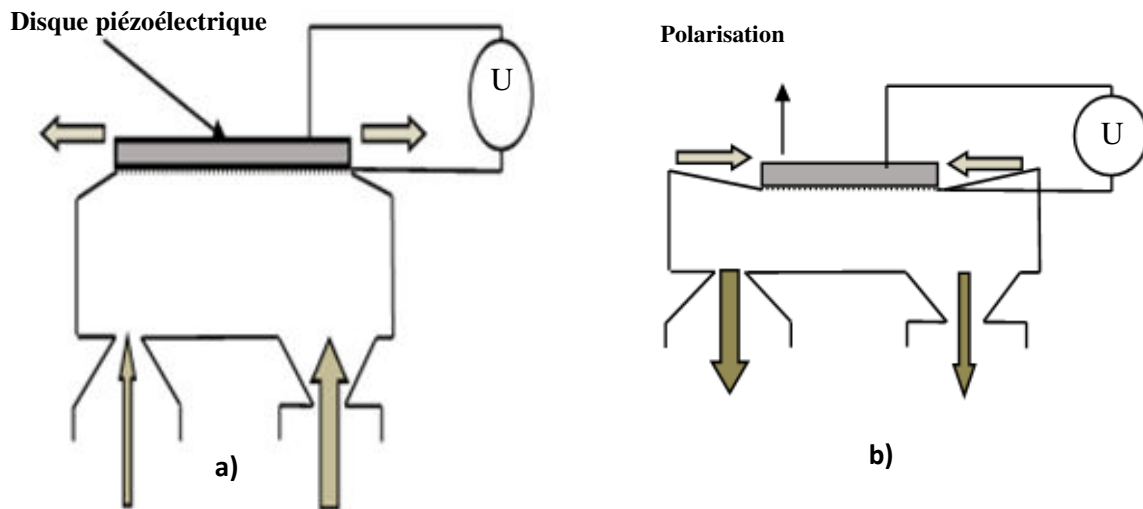


Figure I.9 Principe de fonctionnement d'une micro pompe avec actionneur piézoélectrique en configuration de contraintes latérales **a)** à l'aspiration **b)** au refoulement

Dans la configuration de contraintes latérales, l'actionneur est un disque piézoélectrique collé à la surface extérieure de la membrane. Sous l'application d'une tension électrique U , le moment de flexion du disque piézoélectrique force la membrane à se courber et change ainsi le volume de la chambre. Les contraintes internes, la polarisation ainsi que la valeur de la tension appliquée déterminent la plage de déflexion de la membrane. Dans la plupart des micro pompes piézoélectriques, l'actionnement est bidirectionnel afin de maximiser cette plage de déflexion en appliquant $\pm U$, [9].

La figure (I.10) illustre le principe de fonctionnement d'une micro pompe avec actionneur piézoélectrique dans une configuration de contraintes axiales. Dans cette configuration, le disque piézoélectrique est placé entre la membrane et un support rigide. Par conséquent, les deux faces du disque sont contraintes. Comme dans la configuration de contraintes latérales, une tension électrique U est appliquée au disque et la contrainte axiale provoque la déformation de la membrane. L'avantage de cette configuration réside dans une plus grande plage de pressions générées car de plus grandes forces sont développées par l'actionneur piézoélectrique. Cependant, sa fabrication requiert une couche additionnelle (capot) par rapport à la configuration en contraintes latérales, [9].

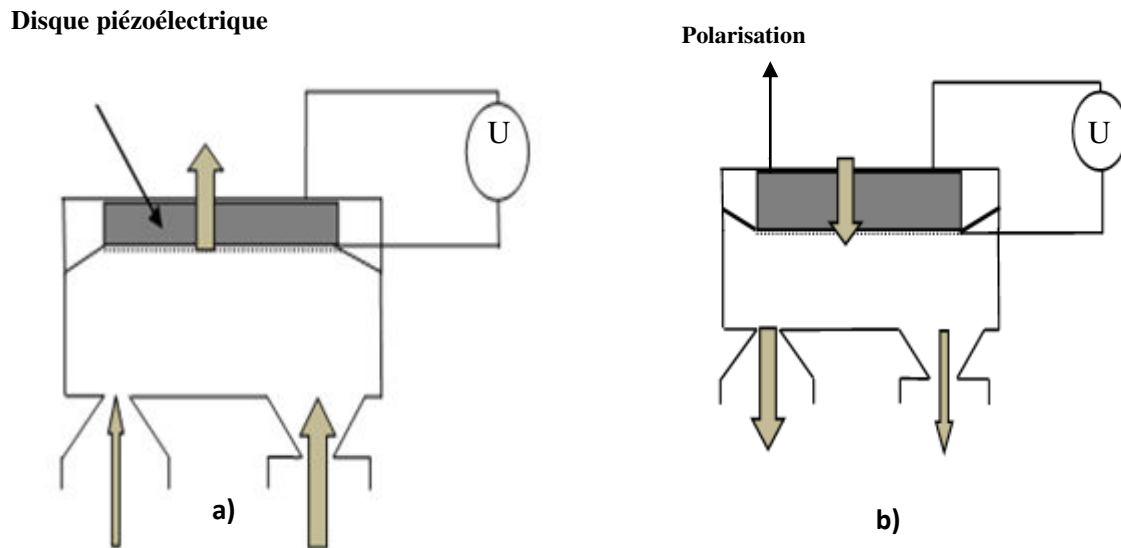


Figure I.10 Principe de fonctionnement d'une micropompe avec actionneur piézoélectrique en configuration de contraintes axiale **a)** à l'aspiration **b)** au refoulement

De nombreuses micro pompes piézoélectriques ont été rapportées dans la littérature, [10]. Les principales caractéristiques de certaines d'entre elles sont présentées dans le Tableau I.1.

Auteur	ΔV [μL]	f [Hz]	Q_{max} [mL min ⁻¹]	p_{max} [kPa]	P [W]	η_{max} [1]
Olsson et al	>0.024	560	16	17	NC	NC
Olsson et al	>0,005	3500	2.3	74	NC	NC
Kamper et al	0,6	70	0.4	210	NC	NC
Bartels Microtechnik	>0,5	100	6	55	0.2	<0,7%

Tableau I.1 : Principales caractéristiques de quelques micro pompes piézoélectriques, [9].

Le principal avantage de ces micros pompes réside dans leur haute fréquence de fonctionnement, tirant profit du faible temps de réponse d'actionneur piézoélectrique. Ainsi, les micros pompes piézoélectriques atteignent généralement des débits plus élevés (jusqu'à 16 mL min⁻¹) par rapport aux autres micros pompes à membrane.

Cependant, leur inconvénient majeur provient de leur course très faible (de l'ordre de quelques microns), ce qui limite la cylindrée de la micro pompe ($< 1 \mu\text{L}$) et donc ses capacités d'auto-amorçage.

I.5.6 Les micro pompes électrostatiques

La figure (I.11) illustre le principe de fonctionnement d'une micro pompe avec un actionneur électrostatique.

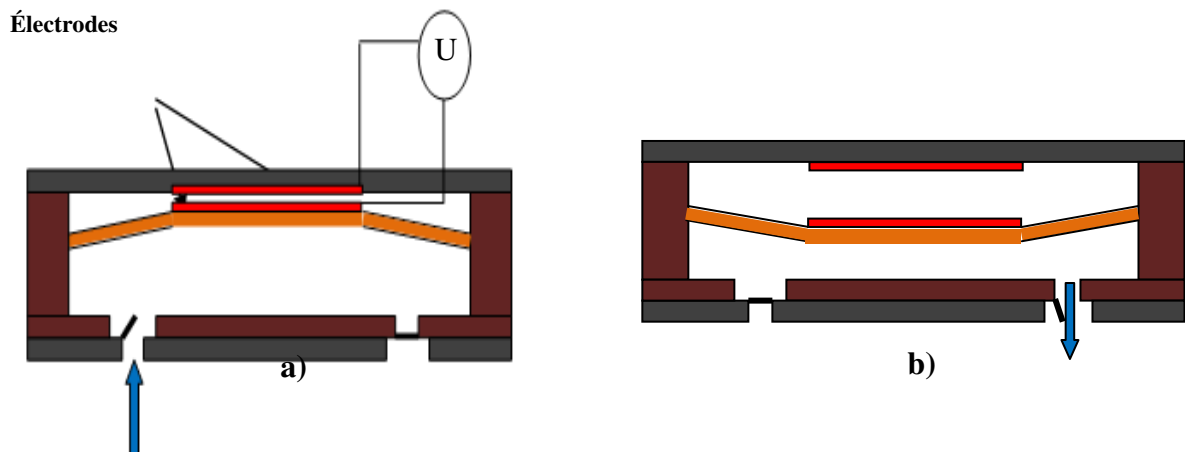


Figure I.11 Principe de fonctionnement d'une micro pompe avec actionneur électrostatique
a) à l'aspiration b) au refoulement

Une première électrode métallique est déposée sur la membrane tandis qu'une seconde électrode est placée sur un support rigide créant ainsi une capacité plane dont une des deux électrodes est mobile. En appliquant une tension, les forces électrostatiques induites entre ces deux électrodes attirent la membrane et changent ainsi le volume de la chambre. Cette étape représente l'aspiration alors que le refoulement est caractérisé par l'absence de tension.

Afin de prévenir les courts-circuits, une couche isolante est déposée à la surface des électrodes. Il faut noter que l'actionnement n'est pas réversible car les forces électrostatiques sont seulement attractives. Quelques caractéristiques de pompes électrostatiques ont été rapportées dans la littérature, [10]. Dans le Tableau I.2, figurent les principales caractéristiques de quelques-unes d'entre elles.

Auteur	ΔV [μL]	f [Hz]	Q_{max} [mL min^{-1}]	p_{max} [kPa]	P [W]	η_{max} [1]
Zengerle <i>et al</i>	>0.009	300	0.16	29	0.001	< 0.19%
Richter <i>et al</i>	0.04	400	0.26	NC	NC	NC

Tableau I.2 : Principales caractéristiques principales de quelques micro pompes électrostatiques, [9].

Les micro pompes électrostatiques possèdent certains avantages : une réalisation utilisant uniquement des matériaux et des procédés standards de micro fabrication, une forte compacité et de hautes fréquences de fonctionnement (> 100 Hz). Néanmoins, la force électrostatique est inversement proportionnelle à la distance entre les deux électrodes. Ainsi, la distance entre les deux électrodes doit être contrôlée très précisément (quelques μm). Les actionneurs électrostatiques sont donc difficiles à fabriquer. De plus, ne déformant les membranes que de quelques microns, ils ne peuvent générer que de faibles cylindrées (< 40 nL),[10].

I.5.7 Les micro pompes électromagnétiques

La figure (I.12) illustre le principe de fonctionnement d'une micro pompe avec un actionneur électromagnétique.

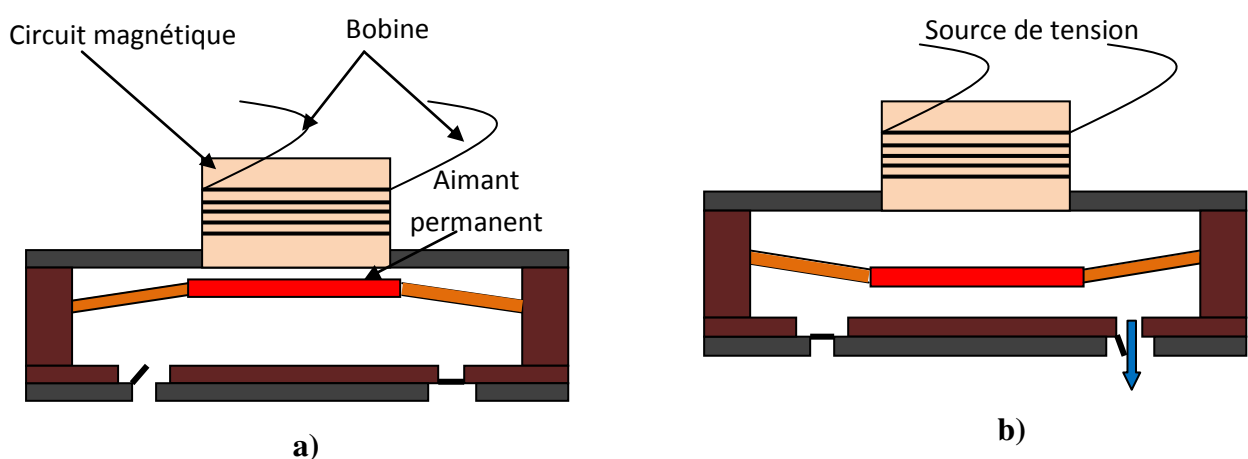


Figure I.12 Principe de fonctionnement d'une micro pompe avec actionneur électromagnétique **a)** à l'aspiration **b)** au refoulement

Les actionneurs électromagnétiques sont généralement composés d'un aimant permanent (placé sur la membrane de la pompe) et d'une bobine. Le passage d'un courant électrique dans la bobine va générer une force électromagnétique dite de Lorentz qui attire ou repousse l'aimant permanent.

Quelques micro pompes magnétiques ont été rapportées dans la littérature, [10]. Les principales caractéristiques de l'une d'entre elles sont présentées dans le Tableau I.3.

Auteur	ΔV [μL]	f [Hz]	Q_{max} [mL min ⁻¹]	p_{max} [kPa]	P [W]	η_{max} [1]
Yamahata <i>et al</i>	>2.8	30	5	28	3.7	<0,015%

Tableau I.3 : Caractéristique d'une micro pompe électromagnétique

Les actionneurs électromagnétiques fournissent de grandes cylindrées (> 1 μL) comparativement aux actionneurs piézoélectriques et électrostatiques qui ne sont limités qu'à quelques centaines de nano litres. Néanmoins, l'utilisation d'actionneurs électromagnétiques pour les micro pompes MEMS est limitée, car peu de matériaux magnétiques peuvent être facilement micro-usinés. De plus, la bobine dissipe beaucoup d'énergie par effet Joule, ce qui réduit l'efficacité des actionneurs électromagnétiques et les rend inadaptés pour des dispositifs portables. Enfin, l'important volume de la bobine réduit la compacité atteignable de ce type de micro pompe.

Il existe d'autres variétés de micro pompes dans la littérature comme les micro pompes pneumatique, thermo nématique, électro hydrodynamique et la micro pompe bimétallique, etc...), que nous n'allons pas exposer dans ce chapitre.

I.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'état de l'art des micro pompes. Ces dernières se divisent en deux catégories : les micro pompes mécaniques et non mécaniques. Nous nous sommes intéressés aux micros pompes mécaniques avec un mouvement péristaltique. Le rendement de la micro pompe varie selon les caractéristiques suivantes: la forme, la nature des matériaux, les propriétés mécaniques et les propriétés électriques. Le chapitre suivant sera l'objet de l'étude des matériaux piézoélectriques et leurs propriétés.

CHAPITRE II
TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX
PIEZOÉLECTRIQUES

II.1 Introduction

La découverte expérimentale de la piézoélectricité date de 1880. Ce sont les frères Pierre et Jacques Curie qui ont été les premiers à observer que : certains cristaux, lorsqu'ils sont soumis à une pression, dans des directions particulières, voient apparaître des charges positives et négatives sur certaines portions de leur surface. Ces charges sont proportionnelles à la pression et disparaissent quand la pression cesse. La piézoélectricité est donc un phénomène réversible, [4]. Ce premier résultat correspond à ce que l'on appelle l'effet piézoélectrique « direct ». Le mot piézoélectrique tiré du grec « piézo » veut dire serrer ou presser. Il existe aussi un effet piézoélectrique « inverse » parfois qualifié de « réciproque » ou « inverse » : quand un cristal piézoélectrique est polarisé par un champ électrique appliqué, il se déforme selon un taux proportionnel au champ électrique appliqué. Cet effet a été prédit en 1877 par Lord Kelvin et a été vérifié expérimentalement par Pierre et Jacques Curie dès 1881. Par la suite, le formalisme de la piézoélectricité a été développé par Duhem, Pickles et particulièrement par Woldemar Voigt en 1894, [4]. Les premières applications industrielles apparaissent pendant la première guerre mondiale avec le générateur d'ondes ultrasonores pour la mesure et la détection sous-marine mis au point par Paul Langevin. A partir de 1943, les progrès technologiques permettent l'élaboration des premiers matériaux piézoélectriques sous forme de céramiques de zircono-titanate de plomb (PZT) de formule de base $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ furent mises au point. Aujourd'hui les céramiques de types PZT sont utilisées dans de nombreuses applications telles que les générateurs d'impulsions, les capteurs et les actionneurs, [4]. Dans ce chapitre, on présente un aperçu général sur la technologie des matériaux piézoélectriques, le phénomène de la piézoélectricité et la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables.

II.2 Les matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques peuvent être regroupés en trois classes principales, [7] :

- les cristaux ;
- les polymères ;
- les céramiques.

II.2.1 Les cristaux

Les cristaux, dont le plus connu est le quartz SiO_2 , ont des propriétés peu intéressantes pour des applications telles que les générateurs d'ultrasons. Leurs principaux défauts sont les constantes piézoélectriques élevées, ainsi qu'un coefficient de couplage électromécanique trop faible.

II .2.2 Les polymères

Les polymères comme respectivement le Poly-Vinyl- DiFluoridène ou PVDF et le P(VDF-TrFE) partiellement cristallisés peuvent permettre d'obtenir des matériaux plus compliants, mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à l'acoustique sous-marine en réception. Le PVDF est le représentant le plus connu, les chaînes de polymères peuvent s'orienter lorsqu'on applique un champ électrique, [7] .

II.2.3 Les céramiques piézoélectriques

Les céramiques piézoélectriques se sont vite imposées par leurs forts coefficients piézoélectriques. La famille des céramiques comporte de nombreux éléments, citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, les titanates de plomb ou les méta-niobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution. La famille des PZT (Plomb, Zirconate, Titanate), Les zirconotitanates de plomb (PZT) apparus en 1954, [7], constituent maintenant la première grande source de ferroélectriques de structure pérovskite. La formule générale d'une pérovskite est ABO_3 , où la valence des cations A est comprise entre +1 et +3 et la valence des cations B entre +3 et +6. Dans le cas d'une symétrie cubique, les cations A sont situés aux sommets du cube, les cations B au milieu du cube et les atomes d'oxygène au centre des faces. La structure pérovskite est ainsi constituée d'un réseau d'octaèdres BO_6 reliés entre eux par les sommets et entourés par les cations A, figure II.1.

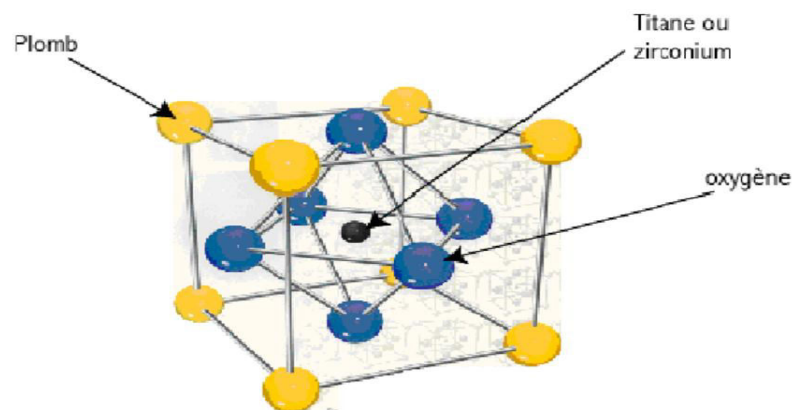


Figure II.1 Structure de la maille perovskite de type ABO_3 , [7].

II.3 La piézoélectricité

On appelle piézoélectricité, la propriété que possèdent certains matériaux (cristaux, céramiques, polymères ou composites) à pouvoir transformer une énergie électrique en une énergie mécanique. La charge électrique est proportionnelle à la contrainte mécanique imposée : c'est l'effet piézoélectrique direct. L'effet réciproque, encore appelé effet inverse, fait que l'application d'un champ électrique externe provoque une déformation mécanique du matériau.

L'effet piézoélectrique ne peut s'observer que dans certains corps non-conducteurs, possédant une anisotropie cristalline. Ainsi, le déplacement des charges a lieu dans une direction privilégiée sous les efforts de traction ou de compression. Cet axe de polarisation résulte de la création de dipôles à l'échelle cristalline, par séparation du barycentre des charges positives et négatives, sous l'effet de la déformation, [4].

II.3.1 L'effet direct

On distingue les effets piézoélectriques direct et inverse. L'effet direct est un phénomène qui se traduit par l'apparition d'un champ électrique lorsque le matériau est soumis à une contrainte mécanique (F), figure (II.2).

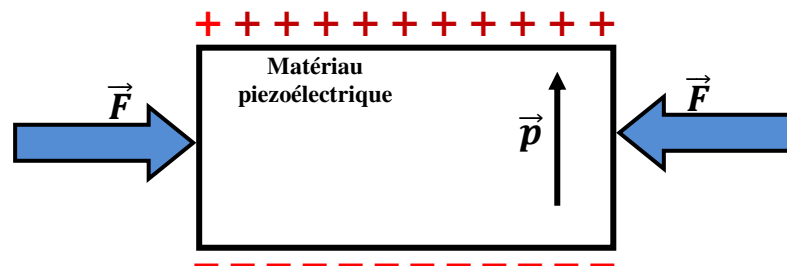


Figure II.2 L'effet direct d'un matériau piézoélectrique

II.3.2 L'effet inverse

L'effet piézoélectrique est réversible. Un matériau piézoélectrique soumis à un champ électrique (E) se déforme sous l'action des forces internes. Cette déformation change de sens avec le sens du champ électrique appliqué, figure (II.3).

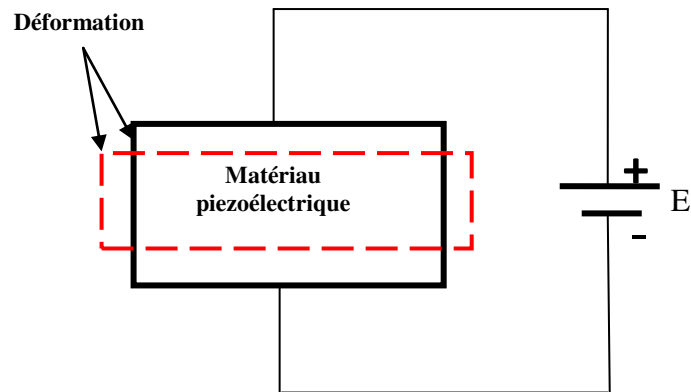


Figure II.3 Effet inverse d'un matériau piézoélectrique

Seules les classes de matériaux non centro-symétriques présentent un effet piézoélectrique. En effet, dans ces matériaux et à l'échelle de la maille, les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident plus quand ils subissent une action provenant de l'extérieur : une force mécanique par exemple Figure (II.4), [7].

L'origine de l'effet piézoélectrique s'explique facilement dès lors par l'apparition de dipôles électriques induits par ces charges au sein du réseau cristallin. Dans la nature, les matériaux sont répartis en 32 classes cristallines. Parmi ces 32 classes, seules 21 sont non centro-symétriques et 20 d'entre elles sont piézoélectriques tableau (II.1). Parmi elles, les matériaux dont la polarisation varie en fonction de la température et appelés pyroélectriques sont au nombre de 10.

Les matériaux ferroélectriques qui sont un sous-groupe des pyroélectriques sont de structures diverses : pérovskites, pyrochlores. Ceux avec la structure pérovskite sont les plus étudiés en piézoélectricité. On peut citer par exemple le titanate de baryum ($BaTiO_3$) qui fut le premier matériau ferroélectrique sous forme de céramique découvert au milieu des années 1940 et qui possède des propriétés intéressantes, [7].

Il y a ensuite le zircono-titanate de plomb PZT (Titano-Zirconate de Plomb) qui fut découvert quelques années après et a depuis supplanté le ($BaTiO_3$) en raison de ses hautes performances piézoélectriques et de sa température de Curie élevée , [7].

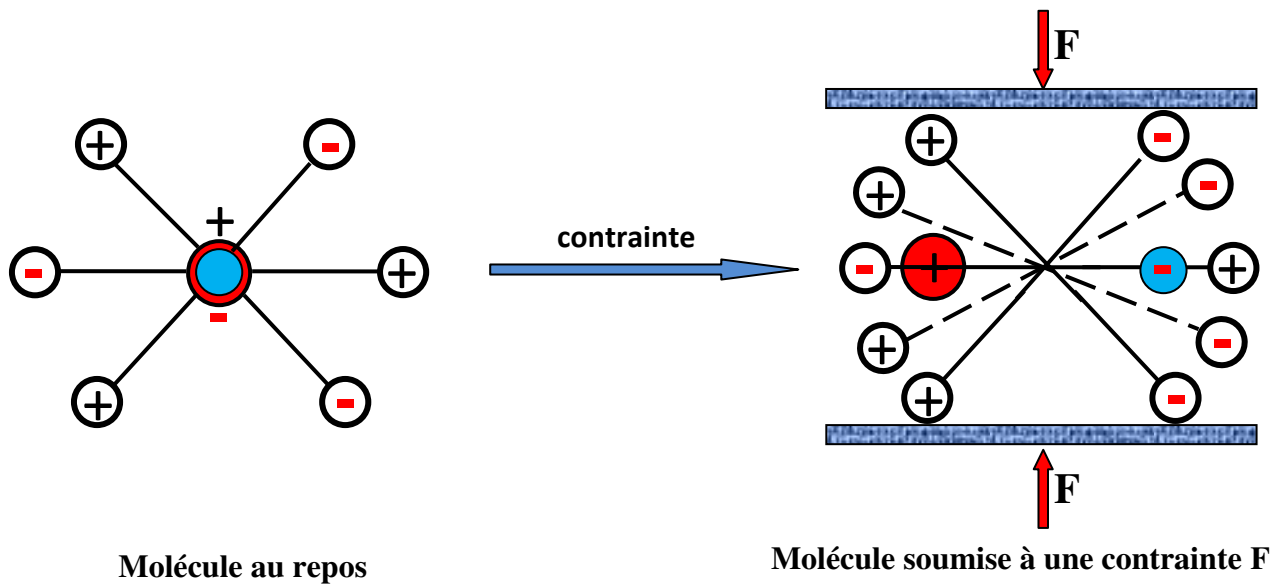


Figure II.4 Effet d’une action mécanique (contrainte) sur une molécule de symétrie noncentro symétrique (polaire), [7].

32 classes cristallines				
11 Centrosymétriques		21 non centrosymétriques		
11 non piézoélectriques	20 piézoélectriques			1 non piézoélectrique (classe cubique 432)
	10 pyroélectriques : polaire		10 non pyroélectriques : non polaires	
	9 Ferroélectriques	1 Non ferroélectriques	10 Non ferroélectriques	
	Ex: BaTiO ₃ , PbTiO ₃ , KNbO ₃	Ex: Tourmaline	Ex: Quartz	

Tableau II.1 Classes cristallines des matériaux et l’origine du phénomène piézoélectrique

II.4 La ferroélectricité

La ferroélectricité forme un sous-groupe de la pyroélectricité comme le montre la Tableau II.1. La direction de polarisation d’un cristal ferroélectrique varie en fonction du champ électrique extérieur.

Elle peut être simplement réorientée voire même s'inverser si le champ est suffisamment intense, [7]. Le terme ferroélectrique a été utilisé pour la première fois en 1935, par Muller pour rappeler le comportement hystérétique de la polarisation électrique macroscopique en fonction du champ électrique appliqué. Un matériau ferroélectrique ne présente pas de propriété macroscopique piézoélectrique avant polarisation. Une fois polarisé, il devient alors piézoélectrique.

II.4.1 La polarisation

Les ferroélectriques sont des matériaux dont il est possible de réorienter l'axe de polarisation en les soumettant à un champ électrique suffisamment fort, [7], [8].

- ❖ Du point de vue macroscopique, le matériau ferroélectrique "non polarisé" est organisé en différents domaines de polarisations aléatoires dont il résulte une polarisation macroscopique nulle, figure (II.4.a).
- ❖ Le matériau soumis à un champ électrique figure (II.4.b) aura pour tendance de réaligner ses différents domaines dans la direction d'application du champ, le matériau est alors macroscopiquement polarisé (polarisation P_s).
- ❖ Cet effet de polarisation est "rémanent", c'est à dire que lorsque l'on supprime le champ électrique tous les domaines ne retournent pas dans un état d'orientation aléatoire et il existe alors un état de polarisation macroscopique rémanent (P_r) du matériau, figure (II.4.c).

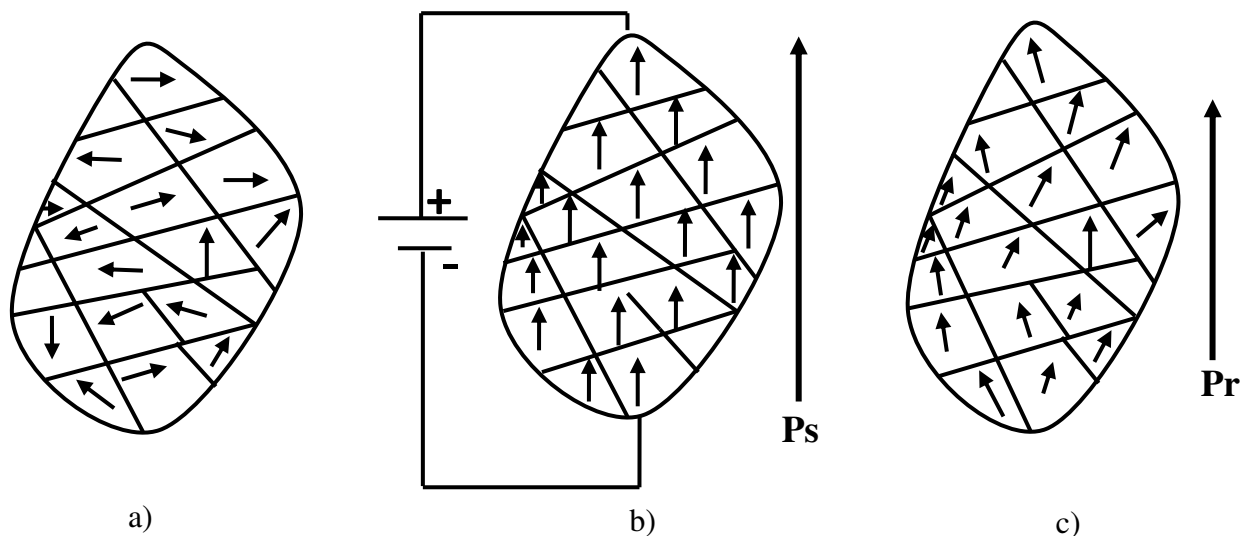


Figure II.4 Schématisation des domaines

a) avant polarisation, b) pendant polarisation, c) après polarisation

II.5 Cycle d'hystérésis

Le matériau ferroélectrique polarisé possède une polarisation rémanente à champ nul. L'évolution de la polarisation en fonction du champ apparaît sous la forme d'un cycle d'hystérésis $P = f(E)$ figure (II.5). Le champ coercitif noté E_C est le champ électrique nécessaire pour réorienter les dipôles du matériau ferroélectrique.

La polarisation rémanente P_r correspond à la valeur de la polarisation à champ nul. Sous des valeurs élevées de champ, on a la polarisation de saturation P_S , [8].

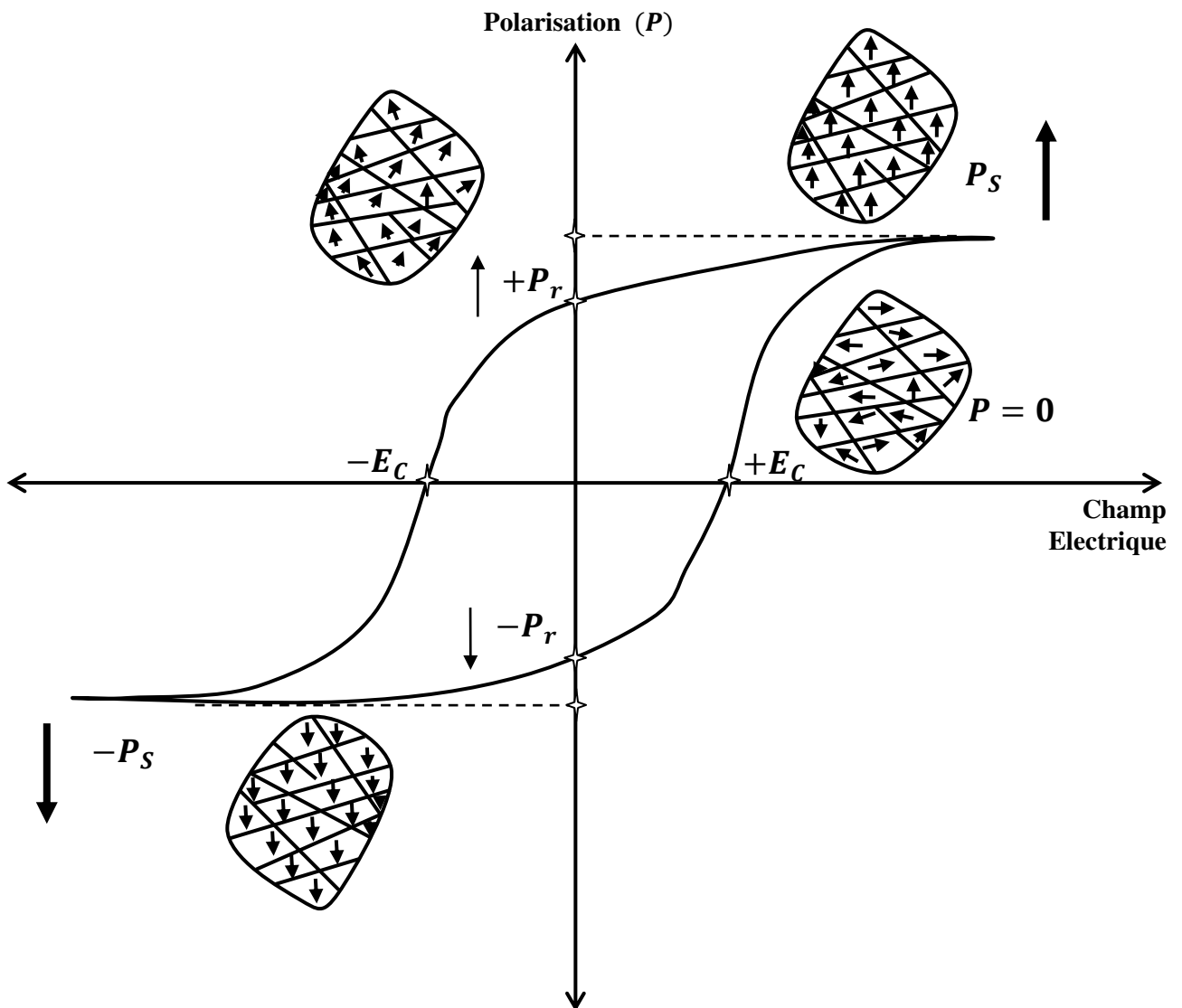


Figure II.5 Cycle d'hystérésis de la polarisation d'un matériau ferroélectrique.

Un matériau ferroélectrique peut être polarisé si on le soumet à un champ électrique supérieur au champ coercitif. Un matériau ferroélectrique polarisé présente alors des propriétés piézoélectriques.

II.5.1 Température de curie et transition de phase

La transition de phase d'un matériau ferroélectrique correspond à un changement dans la structure cristalline, qui se produit généralement à une température bien définie et qui s'accompagne d'une modification de l'orientation et/ou de l'amplitude de la polarisation électrique. Le matériau passe de l'état ferroélectrique à l'état para-électrique, [8].

Le point de Curie T_c est la température au-delà de laquelle un matériau ferroélectrique subit une transition de phase structurale vers un état où la polarisation spontanée de la maille disparaît. Au-delà de cette température, le matériau ferroélectrique se retrouve dans un état para électrique non polaire. Le passage polaire - non polaire correspond à une transition de phase, [8].

La symétrie cristalline de la phase non polaire est toujours plus élevée que celle de la phase polaire. Au point de Curie, la permittivité diélectrique relative :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{II.1})$$

atteint une valeur maximale. Au-dessus de cette température, le matériau ferroélectrique devient paraélectrique et ϵ_r suit la loi de Curie-Weiss :

$$\epsilon_r = \frac{C}{T_a - T_0} \quad (\text{II.2})$$

C : constante de Curie ;

T_0 : température de Curie-Weiss (°K) ;

T_a : température absolue (°K).

II.6 Choix du matériau piézoélectrique

La comparaison des valeurs caractéristiques de matériaux piézoélectriques permet de choisir le matériau le plus adapté à l'action qui sera utilisé, [8]. Le tableau II.2 montre les caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectriques.

Paramètres / matériau	Quartz SiO_2	PVDF	PZT
Densité (g/cm^3)	2.56	1.76	7.5
Constante diélectrique ϵ_r	4.5	12	200- 4000
Constante de charge $d_{33} \times 10^{-12}$ (C/N)	2	20	40-750
Constante de tension $g_{33} \times 10^{-33}$ (Vm/N)	50	190	15-40
Température de Curie ($^{\circ}C$)	573	180	< 350
Coefficient de couplage $K(\%)$	10	14	40-70

Tableau II.2 Constantes physiques des matériaux piézoélectriques.

II.7 Domaines d'applications des matériaux piézoélectriques

Il est possible de distinguer trois grandes classes d'applications des matériaux piézoélectriques selon qu'il s'agisse de l'effet piézoélectrique direct et/ou inverse qui est mis en jeu, Tableau (II.3), [7].

Applications basée sur l'effet direct	Applications basée sur l'effet inverse	Applications basée sur les deux effets
Microphone	Haut-parleur	Transducteur d'ultrasons pour diagnostic (échographie)
Hydrophone	Buzzer	CND par ultrasons
Capteur de choc	Transducteur sonar	Détecteur de proximité ou de présence
Accéléromètres	Nébuliseur	Mesure de distances ou de débits
Bouton poussoir	Nettoyage par ultrasons	Gyroscope
Allumage	Relais	Filtres fréquentiels (ondes volumiques SAW)
Capteur de pression ou de contraintes	Micro positionnement	Lignes à retard
	Ajustement laser	Transformateur piézoélectrique
	Imprimante à jet d'encre	
	Dispositifs acousto-optiques	
	Pompe piézoélectrique	

Tableau II.3 Applications des matériaux piézoélectriques en fonction de l'effet utilisé.

II.8 Equations tensorielles de la piézoélectricité

L'effet piézoélectrique est la conséquence d'un couplage entre le comportement électrique et mécanique d'un matériau piézoélectrique. L'anisotropie des propriétés piézoélectriques d'un solide implique l'utilisation d'expressions tensorielles. En premier lieu, il convient de définir un système d'axes pour repérer le matériau piézoélectrique. Par convention, l'axe de polarisation est dirigé selon l'axe 3 (ou z). Conformément à la norme IEEE « IEEE Standard of Piezoelectricity », [Mee96], on définit un trièdre de référence orthogonal $oxyz$. Les indices 1, 2 et 3 de la figure (II .6) correspondent respectivement aux directions des axes Ox , Oy et Oz pour les composantes normales et les indices 4, 5 et 6 aux plans yOz , xOz et xOy pour les composantes tangentielles ou de cisaillement.

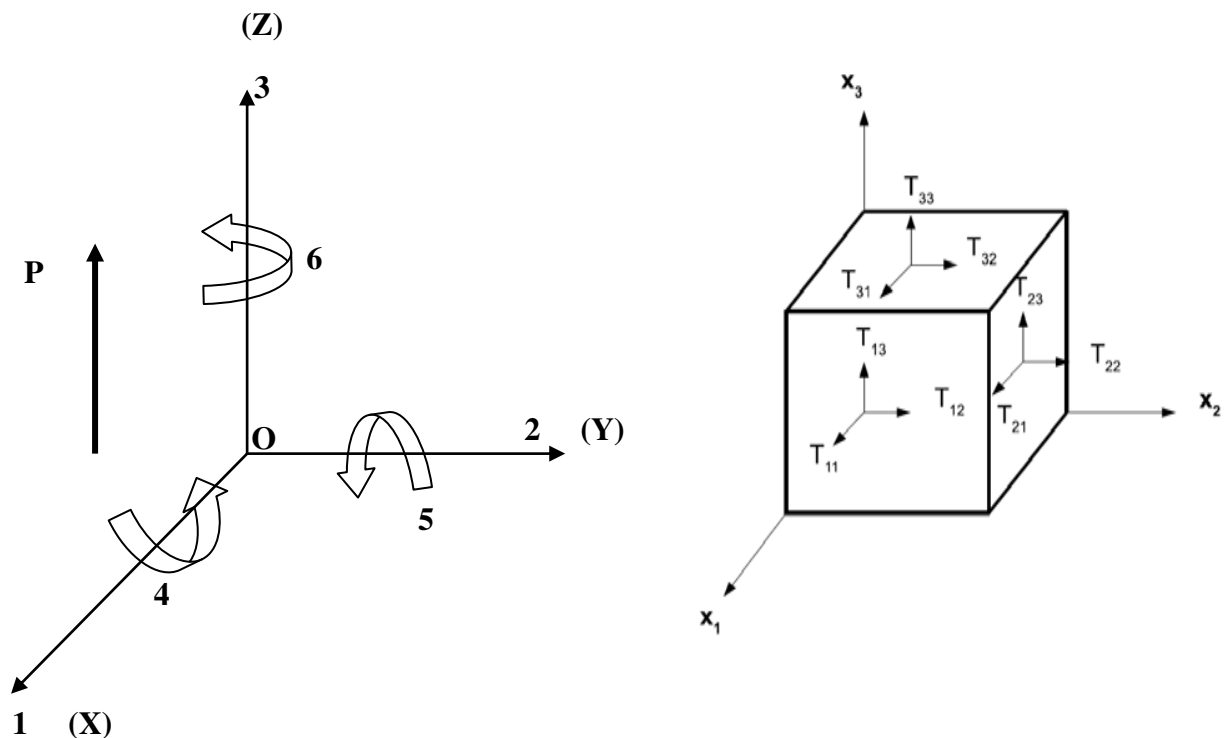


Figure II.6 Définition des axes conventionnels pour un matériau

Lorsque le phénomène de la pyroélectricité est négligeable (i.e. l'effet thermique est négligeable aussi), l'effet piézoélectrique peut se traduire par les huit équations fondamentales reliant les grandeurs électriques (champ électrique " E " et induction " D ") aux grandeurs mécaniques (contrainte " T " et déformation " S ") comme indiqué dans le Tableau (II.4).

Variables indépendantes	Grandeurs mécaniques	Grandeurs électriques
(S, D) en fonction de (E, T)	$S = s^E \cdot T + d^t \cdot E$	$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E$
(T, E) en fonction de (D, S)	$T = c^D \cdot S - h^t \cdot D$	$E = -h \cdot S + \beta^S \cdot D$
(S, E) en fonction de (D, T)	$S = s^D \cdot T + g^t \cdot D$	$E = -g \cdot T + \beta^T \cdot D$
(T, D) en fonction de (E, S)	$T = c^t \cdot S - e^t \cdot E$	$D = e \cdot T + \varepsilon^S \cdot E$

Tableau II.4 Équations de la piézoélectricité

Le tableau (II.4) présente un glossaire des grandeurs mécaniques, électriques ainsi que piézoélectriques et leurs significations utilisés pour décrire les systèmes d'équations qui sont définis ci dessous, [6], [7], [8].

avec :

X^t la transposé de la matrice X ;

X^E indique que la grandeur X est considérée à champ électrique constant ;

X^D indique que la grandeur X est considérée à induction électrique constante ;

X^T indique que la grandeur X est considérée à contrainte constante ;

X^S indique que la grandeur X est considérée à déformation constante.

Le tableau (II.5) présente les grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques.

Symbole	Signification	Unité	Dimension
\vec{D}	Déplacement électrique ou induction	C/m^2	(3×1)
\vec{E}	Champ électrique	V/m	
ϵ	Permittivité électrique	F/m	(3×3)
β	Constante d'imperméabilité diélectrique	m/F	
S	Déformation relative	----	(6×1)
T	Contrainte mécanique	N/m^2	
s	Compliance ou susceptibilité élastique	m^2/N	(6×6)
c	Raideur ou constante élastique	N/m^2	
d	Coefficient piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre l'induction et la contrainte à champ électrique constant	C/N	(3×6)
e	Coefficient piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre l'induction et la déformation à champ électrique constant	C/m^2	
g	Coefficient piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre la contrainte et le champ résultant à induction constante	$V.m/N$	
h	Coefficient piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre la déformation et le champ résultant à induction constante	V/m	

Tableau II.5 Grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques

- Le coefficient piézoélectrique (d, e, g, h) est identique pour le comportement électrique et le comportement mécanique du matériau piézoélectrique. Cela signifie que la piézoélectricité requiert l'interaction entre ces deux comportements.
- Comme cas particulier, si le matériau est non piézoélectrique ($d=e=g=h=0$), le comportement électrique et le comportement mécanique sont découplés, [6], [7], [8].

II.8.1 Caractéristiques électriques et mécaniques des matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques possèdent des performances différentes d'un matériau à un autre. Pour quantifier ces performances, plusieurs coefficients sont définis. Parmi eux, nous citerons les coefficients ci-dessous.

II.8.1.1 Permittivité « ϵ_{ij} »

La permittivité « ϵ_{ij} » d'un matériau piézoélectrique détermine la charge par unité de surface due au champ électrique appliqué, [8], [9]. Elle est suivie de deux indices. Le premier indice désigne la direction du déplacement électrique ; le second celui du champ électrique.

où

ϵ_{ij}^T la permittivité à force constante caractérisant un échantillon libre ;

ϵ_{ij}^S la permittivité à déformation constante caractérisant un échantillon encastré.

II.8.1.2 Compliance élastique « S_{ij} »

La compliance élastique « S_{ij} » est définie comme le rapport de la déformation relative sur la contrainte mécanique appliquée, [8]. Elle est suivie de deux indices. Le premier indice désigne la direction de la déformation relative ; le second celui de la contrainte mécanique.

s_{ij}^E la compliance à champ électrique constant ;

s_{ij}^D la compliance à déplacement électrique constant.

II.8.1.3 Constante de charge piézoélectrique « d_{ij} »

Le coefficient de charge « d_{ij} » est la constante de proportionnalité entre le déplacement électrique et la contrainte mécanique (ou la déformation relative et le champ électrique). Il est suivi de deux indices. Le premier indice désigne la direction du déplacement électrique (ou du champ électrique) ; le second celui de la contrainte mécanique (ou déformation relative). Puisque la contrainte induite dans un matériau piézoélectrique par application d'un champ électrique est le produit de la valeur du champ électrique et de la valeur du coefficient de charge, les matériaux piézoélectriques qui se caractérisent par des coefficients de charges élevés sont plus souvent utilisés comme actionneurs que comme capteurs, [8],[9].

II.8.1.4 Constante de tension piézoélectrique « g_{ij} »

Le coefficient de tension « g_{ij} » est la constante de proportionnalité entre le champ électrique et la contrainte mécanique (ou la déformation relative et le déplacement électrique). Il est suivi de deux indices. Le premier indice désigne la direction du champ électrique (ou du déplacement électrique) ; le second celui de la contrainte mécanique (ou déformation relative). Puisque le champ électrique induit dans un matériau piézoélectrique par application d'une contrainte mécanique est le produit de

la valeur de la contrainte mécanique et de la valeur du coefficient de tension, les matériaux piézoélectriques qui se caractérisent par des coefficients de tension élevés sont plus souvent utilisés comme capteurs que comme actionneurs, [8], [9].

II.8.1.5 Coefficient de couplage électromécanique k

Tout matériau piézoélectrique possède un coefficient de couplage électromécanique qui traduit sa capacité à transformer une grandeur électrique en une grandeur mécanique et vice versa. Ce paramètre tient compte à la fois des propriétés élastiques, diélectriques et piézoélectriques du matériau. Le coefficient de couplage électromécanique défini selon les normes standards I.R.E, [8], s'écrit de la manière suivante :

$$k = \frac{U_m}{\sqrt{U_e U_d}} \quad (\text{II.3})$$

où U_m est l'énergie mutuelle d'interaction élasto-diélectrique, U_e l'énergie élastique et U_d l'énergie diélectrique. Ce coefficient de couplage dit "statique" découle de l'étude thermodynamique du système considéré comme linéaire en négligeant les effets thermiques et magnétiques.

où

$$k = \frac{\text{énergie électrique transformée en énergie mécanique}}{\text{énergie électrique fournie}}$$

où

$$k = \frac{\text{énergie mécanique transformée en énergie électrique}}{\text{énergie mécanique fournie}}$$

Le coefficient de couplage électromécanique dépend des paramètres électromécaniques du matériau et de la direction du champ électrique appliqué et de la forme de l'échantillon car les modes de vibration changent d'une configuration ou géométrie à une autre. Le tableau (II.6) présenté ci-dessous, regroupe les différents modes de vibration possibles pour un matériau piézoélectrique. Il existe ainsi plusieurs coefficients de couplage électromécanique, [6]:

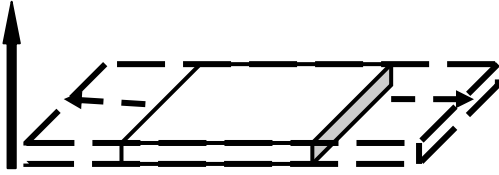
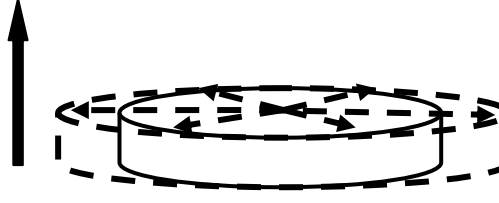
- ✓ k_{33} pour le mode longitudinal ; càd pour la vibration des pièces épaisses suivant la direction de polarisation d'un cylindre ou d'un barreau ;

- ✓ k_{31} pour le mode transversal, le matériau vibre transversalement ; c'ad perpendiculairement à la direction de la polarisation ;
- ✓ k_t pour la vibration des pièces minces suivant l'épaisseur selon la direction de polarisation ;
- ✓ k_p pour le mode radial ou vibration de disque mince suivant le rayon.

Ces coefficients dépendent de la direction du champ électrique appliqué E et de la polarisation P.

II.8.1.6 Modes de vibration

Les céramiques piézoélectriques peuvent présenter plusieurs modes de vibration (de résonance) selon leur forme géométrique, la direction de polarisation et de la direction du champ électrique appliqué. Le tableau II.6 présente selon le mode de vibration l'expression des constantes piézoélectriques, diélectriques et mécaniques pouvant être mesurées.

Modes de vibration piézoélectriques			
Modes de Vibration	Forme géométrique L : longueur, l : largeur, H : épaisseur, D : diamètre		
Mode transversal		$H, l < L/5$	$k_{31} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{11}^E \epsilon_{33}^T}}$
Mode radia		$D < 10 H$	$k_p = k_{31} \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}}}$

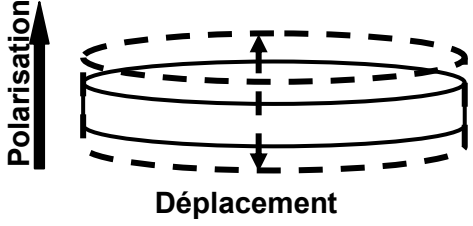
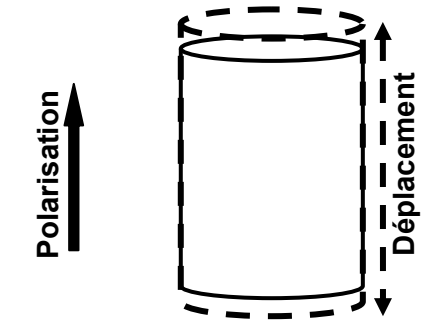
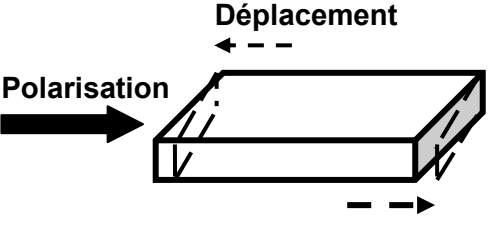
<p>Mode en épaisseur</p>		<p>$D > 10 H$</p>	$k_t = \frac{e_{33}}{\sqrt{C_{33}^D \epsilon_{33}^S}}$
<p>Mode longitudinal</p>		<p>$D < L / 2.5$</p>	$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{33}^E \epsilon_{33}^T}}$
<p>Mode en cisaillement</p>		<p>$D > 3.5H$</p>	$k_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{S_{55}^E \epsilon_{11}^T}}$

Tableau II.6 Différents modes de vibration associés à la forme géométrique

II.8.1.7 Facteur de qualité « FQ »

Pour les matériaux piézoélectriques, on définit deux facteurs de qualité qui permettent de mesurer l'influence des pertes diélectriques et mécaniques, [9]. Le facteur de qualité mécanique « FQ_m » est relié à la résistance « R_m », la capacité « C_m », l'inductance « L_m » et la pulsation « ω » tel que :

$$FQ_m = \frac{1}{R_m C_m \omega} = \frac{L_m \omega}{R_m} \quad (\text{II.4})$$

Ce paramètre est égal aussi au rapport de la fréquence centrale sur la largeur de bande :

$$FQ_m = \frac{f_c}{f_2 - f_1} \quad (\text{II.5})$$

avec :

f_c : la fréquence centrale du matériau piézoélectrique ;

f_1 et f_2 les fréquences à $-3dB$ en dessous et au-dessus de f_c .

Le facteur de qualité électrique « FQ_e » qui correspond au rapport entre la capacité du matériau piézoélectrique et la résistance R_0 symbolisant les pertes diélectriques tel que :

$$FQ_e = \frac{1}{R_0 C_0 \omega} \quad (\text{II.6})$$

Ces facteurs appelés aussi facteurs de surtension donnent le taux d'amplification de la structure à la résonance mécanique ou électrique. En effet, les matériaux piézoélectriques peuvent résonner électriquement ou mécaniquement. Ces fréquences de résonance ne sont pas forcément confondues. Un facteur de qualité élevé traduit un amortissement de la structure faible et donc une minimisation des pertes, [9].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions et les propriétés associées à la piézoélectricité. Nous avons également donné une description détaillée de ces matériaux piézoélectriques. Par la suite un rappel sur les équations régissant la piézoélectricité et leurs modes de déformation suivant le champ électrique appliqué sur leurs extrémités a été affiché, afin de pouvoir effectuer un choix adéquat du matériau utilisé dans les différentes applications.

Les matériaux piézoélectriques sont actuellement l'un des meilleurs candidats pour toutes les applications nécessitant une céramique massive comme par exemple pour les applications médicales et biomédicales ou la maîtrise de petits déplacements en mécanique pour faire mobiliser une quantité de fluide de l'entrée vers la sortie. La suite naturelle de ce genre de développement est

une réduction des dimensions et des coûts de fabrication avec un rendement acceptable. Ce domaine, nécessite des recherches approfondies sur ses matériaux et leurs applications.

Le prochain chapitre sera consacré aux modèles mathématiques des micro pompes péristaltiques à caractère piézoélectrique.

CHAPITRE III
MODÈLES MATHÉMATIQUES DE LA
MICRO POMPE

III.1 Introduction

La micro pompe piézoélectrique est l'un des éléments essentiels dans un système micro fluide, qui a émergé comme un thème de recherche très étudié avec le développement des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS). En raison de leur débit précisément contrôlé, les micro pompes piézoélectriques présentent des applications prometteuses dans la chimie et la biochimie, le traitement médical, la pharmacie, la génie biologique (comme générateur de gouttes de carburant pour les chauffages d'automobile) et les applications de contrôle structurelles. Depuis la première micro pompe piézoélectrique fabriquée pour l'injection de l'insuline, des efforts de plus en plus importants ont été faits dans ce domaine, [11].

Actuellement, la plupart des pompes piézoélectriques utilisées pour la distribution de liquide sont développées à l'aide d'actionneurs piézoélectriques à membrane nommé aussi pompe piézo-membrane telles que les micro pompes sans valves ou avec valves anti-retour, [12]. Ces pompes à piézo membrane se caractérisent par leur structure simple et leur petit volume. Néanmoins, la contre-pression relativement faible peut être considérée comme l'un des inconvénients, qui est devenu un empêchement pour que les micro pompes piézoélectriques soient largement utilisées.

A cet effet, toutes les études sont consacrées pour améliorer le débit, la pression et le rendement d'une pompe piézoélectrique en augmentant la tension d'alimentation utilisée.

La plupart des recherches actuelles se basent principalement sur les performances des actionneurs piézoélectrique collés sur la micro pompe. La forme, la nature des matériaux et des fluides, les propriétés mécaniques et les propriétés électriques des actionneurs ont une influence importante sur la déformation de la membrane.

Dans ce chapitre, on va présenter les modèles mathématiques de la micro pompe qui sont un couplage de différents phénomènes.

III.2 Description de la micro pompe sans valves

Les valves actives disposent d'un actionneur qui commande l'ouverture d'un conduit fluide sur commande. Les valves passives s'ouvrent ou ferment un conduit fluide en fonction de l'amplitude et de la direction de la différence de pression appliquée. Dans notre étude, la simulation est basée sur l'élément diffuseur. Un élément diffuseur ne ferme pas complètement un canal, mais il présente une direction de flux préférentielle par le fait que sa résistance fluide dépend de la direction. Si deux diffuseurs sont disposés à la place de valves dans une pompe à inversion, les éléments voient toujours la même différence de pression à leurs bornes mais dans des directions opposées. Lors du remplissage, le flux entrant dans la chambre par le diffuseur d'entrée est plus

grand que celui entrant à travers le diffuseur de sortie. Dans la phase d'expulsion par contre, le flux expulsé vers la sortie est supérieur à celui expulsé vers l'entrée.

Au cours d'un cycle de pompage complet, on observe alors un débit net à travers la pompe. La figure (III.1) illustre le schéma d'une pompe sans valves à diaphragme d'un mouvement péristaltique en 2D. Un élément piézoélectrique est capable de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et vice-versa. Lorsqu'une tension électrique est appliquée aux bornes d'un disque piézoélectrique, il a la capacité de se déformer dans la direction de polarisation, [13].

Comme les frontières de la membrane sont maintenues fixes, une déformation concave ou convexe se produit, ce qui donne l'effet de pompage qui génère un écoulement de fluide à travers l'élément diffuseur de l'entrée. Dans ce cas, le PZT (Titano-Zirconate de Plomb) présente un comportement analogue à un piston, [12]. En d'autres termes, lorsque le diaphragme se déplace vers le bas, ce qui réduit le volume de la chambre de la pompe, le fluide est expulsé, lorsque la membrane se déplace vers haut, ce qui augmente le volume de la chambre de la pompe, le fluide est tiré dans la chambre.

Par conséquent, la déformation de l'actionneur est essentielle pour le cycle de fonctionnement de la micro pompe à base d'un mouvement péristaltique.

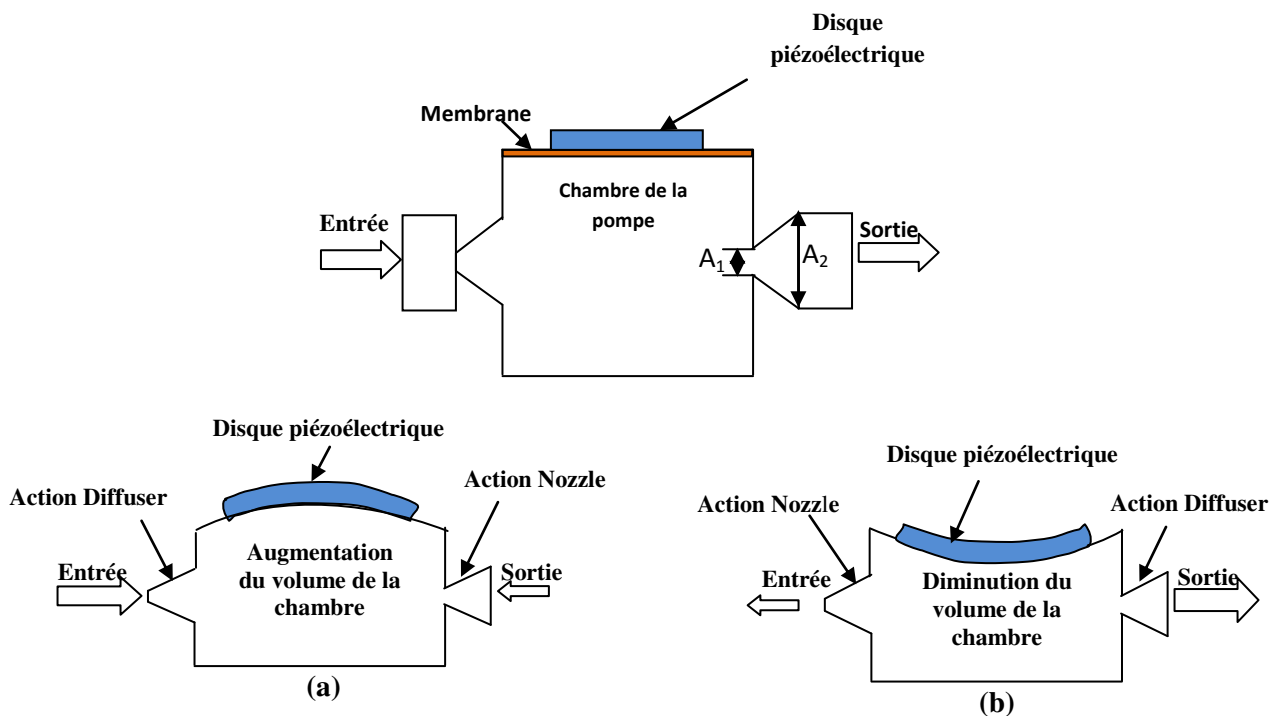


Figure III.1 Composants d'une micro pompe piézoélectrique sans valves pour les deux modes, a) remplissage b) d'expulsion.

A_1, A_2 : représentent les sections transversales.

III. 3 Aspects théoriques de la micro pompes sans valves

III.3.1 Modélisation du comportement mécanique de la membrane

Nous allons établir dans ce qui suit les équations qui régissent le comportement mécanique de la membrane de silicium en se basant sur la théorie des plaques minces. Pour cela, on considère que la membrane rectangulaire est encadrée, de côtés « a » et « b » et d'épaisseur « h », située dans le plan (Oxy) d'un repère orthonormé (Oxyz), représentée sur la figure (III.2), [14].

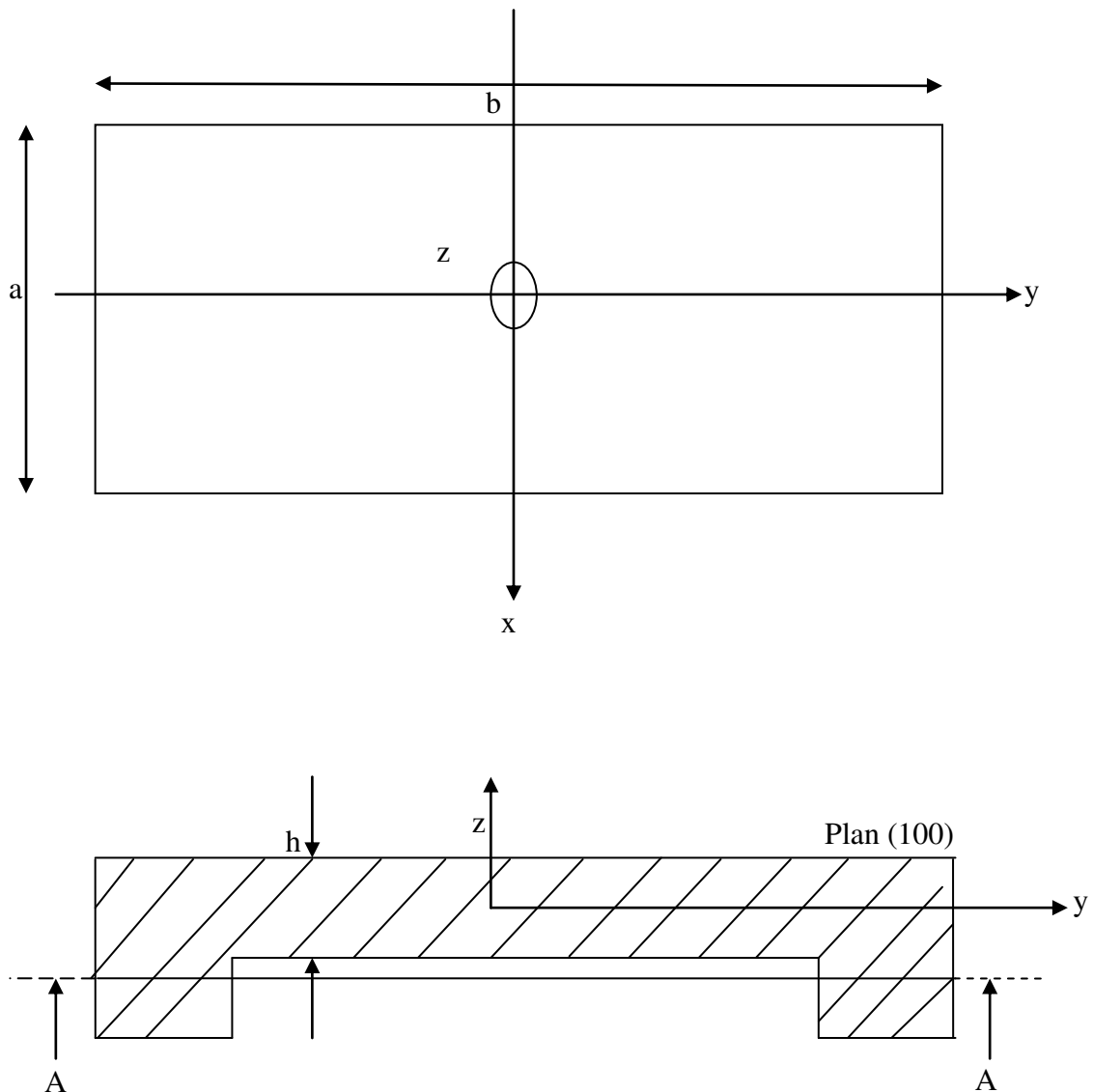


Figure III.2 Description de la membrane

III.3.2 Étude théorique de la déformation et la déflexion

Sous l'action d'une pression différentielle p uniformément répartie, la membrane se déforme. Soit $W(x, y)$ la déformation le long de Oz à un point de coordonnées (x, y) . En utilisant la théorie des plaques minces, [14], l'équilibre de la membrane soumise à une pression p est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial x^4} + 2\alpha \frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial y^2 \cdot \partial x^2} + \frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial y^4} = \frac{p}{D_r} \quad (\text{III.1})$$

Où

D_r est le coefficient de rigidité ;

α est une constante en fonction des paramètres mécaniques.

$$D_r = \frac{E_l \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{III.2})$$

$$\alpha = \nu + \frac{2G^2(1-\nu^2)}{E} \quad (\text{III.3})$$

ν est le coefficient de Poisson, E_l et G sont les coefficients respectifs d'élasticité longitudinale et transversale. L'équation différentielle (III-1) est appelée équation de LAGRANGE, [14].

La résolution de l'équation aux dérivées partielles (III-1) avec les conditions aux limites permet d'obtenir les déflexions $w(x, y)$ de la membrane.

III.3.3 Types d'éléments diffuseurs

Un élément diffuseur est un conduit fluidique convergent. Il présente une résistance fluidique faible s'il est traversé dans le sens divergent que l'on appelle le sens du diffuseur. Dans le sens opposé, appelé sens de la buse (nozzle), il présente une résistance fluidique supérieure. Il existe deux types de diffuseurs : le diffuseur conique (conical diffuser) a une géométrie de révolution tandis qu'un diffuseur à parois plates (flat-walled diffuser) présente une section carrée; deux parois sont parallèles et les deux autres divergent. Dans plusieurs travaux antérieurs des pompes à

performances comparables ont été obtenues avec les deux types de diffuseurs. Dans cette thèse, on favorise les structures planaires et on choisit les diffuseurs à parois plates, [15].

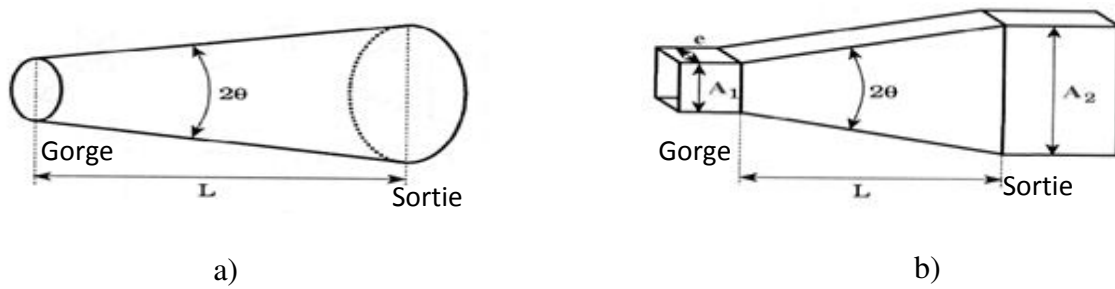


Figure III.3 Géométries d'éléments diffuseurs : a) diffuseur conique et b) diffuseur à parois plates

III.3.4 Caractéristiques d'une pompe sans valves

Une pompe sans valves peut être constituée d'une chambre de pompage, d'un élément diffuseur d'entrée reliant une chambre d'entrée à la chambre de pompe et d'un diffuseur de sortie reliant cette dernière à une chambre de sortie. On assume que les éléments diffuseurs d'entrée et de sortie sont identiques. La performance de la pompe en terme de débit dépend sensiblement de l'efficacité de l'élément diffuseur η_{nd} qui est défini comme le rapport des résistances fluidiques dans le sens direct et inverse. On peut lier par un développement théorique le volume pompé dans un cycle de pompage à l'efficacité des éléments diffuseurs η_{nd} , [15] :

$$V_0 = 2\Delta V \left[\frac{(\eta_{nd})^{\frac{1}{2}} - 1}{(\eta_{nd})^{\frac{1}{2}} + 1} \right] = 2\Delta V \cdot \varepsilon_p \quad (\text{III.4})$$

où

V_0 désigne le volume pompé dans un cycle et $2\Delta V$ est la variation totale de volume de la chambre de pompe (valeur crête à crête). Le terme ε_p est appelé efficacité de pompage et correspond au rapport entre la variation de volume de la chambre de pompe et le volume pompé dans un cycle. Ce résultat a été obtenu sous l'hypothèse de pressions d'entrée et de sortie identiques (la pression atmosphérique par exemple). On peut alors déduire le débit à vide de la pompe Q_0 :

$$Q_0 = Q(p = 0) = V_0 \cdot f = 2 \cdot f \cdot \Delta V \cdot \varepsilon_p \quad (\text{III.5})$$

Outre le débit à vide, une deuxième grandeur qui caractérise les performances d'une pompe peut être définie: la pression de sortie p_{max} est la différence de pressions entre l'entrée et la sortie de la pompe pour laquelle le débit devient nul. Ces deux grandeurs définissent deux points sur la caractéristique pression-débit (figure III.4) d'une pompe.

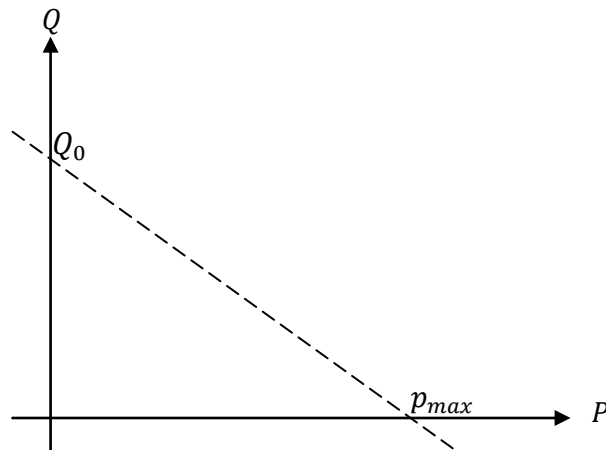


Figure III.4 Caractéristique pression débit typique pour une pompe sans valves

III.4 Analyse des microdiffuseurs

Dans ce qui suit, une analyse de la mécanique des fluides du système va permettre d'acquérir une compréhension des liens entre le dimensionnement du système et ses performances. Ceci est notamment indispensable pour bien choisir des éventuels arrondis ou dimensionner les chambres d'entrée et de sortie. Nous introduirons les lois de la mécanique des fluides pour ensuite procéder à une analyse quantitative de l'efficacité des éléments diffuseurs, l'efficacité de pompage et finalement le débit de la pompe, [15].

III.4.1 Mécanique des fluides

III.4.1.1 Régimes de flux

On distingue des flux stationnaires et des flux dynamiques :

- l'écoulement d'un fluide dans un conduit est appelé flux stationnaire si les grandeurs caractéristiques (distribution de pression et de vitesse) sont constantes dans le temps ;
- l'écoulement d'un fluide dans un conduit est appelé flux dynamique si les grandeurs caractéristiques (distribution de pression et de vitesse) varient dans le temps.

On distingue aussi les écoulements laminaires et turbulents :

- un écoulement est considéré laminaire si les forces de frottement visqueux sur un élément de fluide sont prépondérantes par rapport aux forces d'inertie sur cet élément ;
- un écoulement est considéré turbulent si les forces d'inertie sur un élément de fluide sont prépondérantes par rapport aux forces de frottement visqueux sur cet élément.

Un flux laminaire n'a pas forcément des lignes de flux très lisses; il peut d'ailleurs même être chaotique. Un flux chaotique est caractérisé par le fait que deux lignes de flux à points de départ infiniment proches peuvent s'écarter complètement l'une de l'autre sur leurs trajectoires.

III.4.1.2 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds R_e est un scalaire sans unité qui exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses dans le fluide. Il est défini d'une manière globale pour le flux dans un conduit en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement :

$$R_e = \frac{\rho \bar{u} D_h}{\mu} \quad (\text{III.6})$$

ρ et μ sont la densité et la viscosité du fluide, \bar{u} la vitesse moyenne et D_h le diamètre hydraulique du conduit. Le diamètre hydraulique dépend de la section du conduit et est proportionnel au rapport entre la surface A et le périmètre p_r de la section :

$$D_h = \frac{4A}{p_r} \quad (\text{III.7})$$

Pour une section circulaire, le diamètre hydraulique D_h correspond au diamètre d géométrique du tube ($D_h = d$). Dans le cas de deux plaques parallèles infinies, on considère le cas limite d'une section rectangulaire pour laquelle la largeur b tend vers l'infini:

$$D_h = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{4(2bh)}{4h+2b} = 4h \quad (\text{III.8})$$

Ce résultat est intéressant car il correspond au cas étudié par des simulations numériques 2D. Par le fait que le nombre de Reynolds donne le rapport des forces d'inertie et visqueuses, il permet de déterminer le régime du flux. On observe une valeur critique de R_e à partir de laquelle le flux est turbulent, [14], [17]:

$$R_{e_{critique}} = 2300 \quad (\text{III.9})$$

Cette valeur est bien vérifiée pour des flux macroscopiques. Pour des systèmes micro fluidiques des valeurs inférieures peuvent être observées, surtout dans le cas des canaux courts, [15].

III.4.1.3 Hauteur équivalente

Pour une comparaison aisée des différentes formes d'énergie dans un flux (énergie potentielle, cinétique, pertes par friction), on introduit la notion de hauteur équivalente. La hauteur équivalente à une énergie est la différence de hauteurs correspondant à une énergie potentielle équivalente. On définit ainsi la hauteur équivalente de pression h_p ou (hauteur manométrique) et la hauteur équivalente cinétique ou (hauteur capable) h_{cin} :

$$h_p = \frac{p}{\rho g} \quad (\text{III.10})$$

$$h_{cin} = \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (\text{III.11})$$

Une hauteur équivalente pour le phénomène des pertes par friction pourra également être définie.

III.5 Équations des fluides

La théorie de la mécanique des fluides nous donne un certain nombre d'équations qui décrivent les flux statiques et dynamiques d'un fluide pour une géométrie donnée. Ce paragraphe donne les équations nécessaires à la compréhension des phénomènes dans une pompe sans valves.

III.5.1 Équation de l'énergie

Le principe de base de la conservation d'énergie s'applique évidemment à la mécanique des fluides. Pour un système fluide à une entrée et une sortie, un bilan d'énergie entre les deux faces d'entrée et de sortie (indices 1 et 2) s'exprime par l'équation d'énergie selon, [15], [18], [19]:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\hat{u}_1}{g} + \frac{\bar{u}_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\hat{u}_2}{g} + \frac{\bar{u}_2^2}{2g} + z_2 - h_q + h_s + h_v \quad (\text{III.12})$$

Cette équation est générale et peut être simplifiée si certaines conditions sont vérifiées ou si des hypothèses sont prises. Notamment les termes z_1 et z_2 s'annulent pour un système planaire et les termes h_q et h_s peuvent être négligés sous l'hypothèse qu'il n'y a ni échange de chaleur avec l'extérieur ni pertes par frottement en torsion.

III.5.2 Équation de Bernoulli

L'équation de Bernoulli découle de l'équation d'énergie si les hypothèses suivantes sont vérifiées :

- flux stationnaire (le profil de vitesses et distributions de pression) ne varient pas dans le temps);
- flux incompressible. Cette hypothèse est bien vérifiée pour les liquides, en particulier l'eau et le sang;
- flux sans friction. Cette condition n'est jamais vérifiée dans un liquide réel et ne peut pas être négligée dans le cas d'un diffuseur;
- pas de transfert de chaleur;
- pas de pertes par friction en torsion.

L'équation de Bernoulli s'écrit, [15], [17], [19] :

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{u}_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{u}_2^2}{2} + gz_2 \quad (\text{III.13})$$

Cette équation néglige les pertes par friction présentes dans tout flux d'un liquide visqueux, ce qui peut être corrigé par un terme supplémentaire (eq. III.19).

III.5.3 Flux laminaire pour des géométries particulières - équation de Poiseuille

Sous l'hypothèse d'un flux stationnaire laminaire, l'équation d'énergie peut être résolue pour des géométries particulières. Un flux laminaire est caractérisé par la relation suivante qui lie la contrainte de cisaillement locale τ à la vitesse locale u par la viscosité μ :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{III.14})$$

Où y est la coordonnée perpendiculaire à la direction du flux. Pour un tube de section circulaire constante, on trouve la solution suivante pour le profil de vitesse, [15]:

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left[-\frac{d}{dx} (p + \rho gz) \right] (r_{max}^2 - r^2) \quad (\text{III.15})$$

Cette équation décrivant un profil parabolique est appelée équation de Poiseuille. La perte d'énergie par friction est exprimée par la perte de hauteur équivalente:

$$h_{v,lam} = \frac{32\mu L \bar{u}}{\rho g d^2} \quad (\text{III.16})$$

D'une manière analogue, on trouve pour le flux entre deux plaques parallèles infinies, [15]:

$$u = \frac{1}{2\mu} \left[-\frac{d}{dx} (p + \rho g z) \right] (h^2 - y^2) \quad (\text{III.17})$$

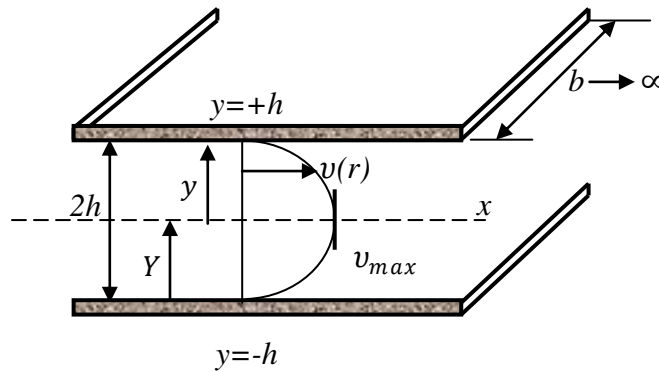


Figure III.5. Flux entre deux plaques parallèles infinies

où

h : est la demi-distance entre les deux plaques.

III.5.4 Pertes par friction

Les pertes par friction peuvent être calculées d'une manière analytique pour des géométries simples (cf. flux laminaire dans un tube cylindrique), mais il existe aussi des pertes par friction souvent assez importantes lorsque le flux traverse des géométries particulières comme des expansions et contractions continues ou discontinues. Ces pertes sont appelées pertes supplémentaires. Les pertes dans une géométrie donnée sont caractérisées par un coefficient de pertes K qui est défini par le rapport entre les hauteurs équivalentes de pertes à travers le dispositif h_m et la hauteur équivalente cinétique, [15]:

$$K = \frac{h_m}{\frac{\bar{u}^2}{2g}} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2} \quad (\text{III.24})$$

où

h_m : la hauteur équivalente à la perte supplémentaire pour une variation de section donnée ;

u : la vitesse moyenne dans la section d'entrée de la géométrie. Pour des variations de section discontinues, u est la vitesse dans la section la plus petite.

L'équation de Bernoulli ne tenant pas compte des pertes par friction, le terme des pertes supplémentaires gh_m doit être ajouté du côté des termes relatifs à la sortie du flux :

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \overline{u_1^2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \overline{u_2^2} + gz_2 + gh_m \quad (\text{III.19})$$

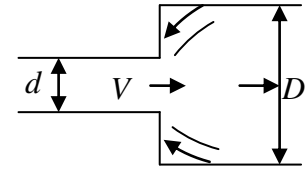
Le flux étant complexe pour ce type de géométrie, il n'existe pas d'expression analytique donnant le coefficient de pertes K . Il existe par contre des résultats empiriques bien vérifiés dans la mécanique des fluides macroscopique qui peuvent être employés en microfluidique avec certaines précautions. Ces résultats sont donnés dans la littérature sous forme de formules ou de graphes, [15], [19].

III.5.5 Résultats empiriques pour pertes par friction

Dans ce qui suit, des résultats empiriques des coefficients de pertes pour les cas des expansions et contractions discontinues et continues ainsi que pour les sorties et entrées de conduit non arrondies sont exposées dans ce graphique.

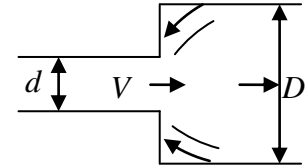
Pour une expansion discontinue, on a :

$$K_{SE} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \quad (\text{III.20})$$



Pour une contraction discontinue, le coefficient de pertes est donné par :

$$K_{SC} = 0.42 \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \quad (\text{III.21})$$



Pour une contraction continue, les pertes sont très faibles pour tous les angles d'ouverture, [15].

III.6 Flux dans un diffuseur ou une buse

III.6.1 Définition et principe de fonctionnement

Par définition, un diffuseur est un conduit de fluide divergent. Un conduit convergent est appelé buse. Un diffuseur constitue évidemment une buse lorsqu'il est traversé par le fluide dans le sens inverse. Les pertes par friction d'un élément géométrique donné ne sont pas identiques pour le sens du diffuseur et dans le sens de la buse. La chute de pression pour un débit donné est plus importante si le flux traverse l'élément dans le sens de la buse que s'il le traverse dans le sens du diffuseur. Autrement dit, lorsqu'une différence de pressions est appliquée dans le sens du diffuseur, le flux résultant est plus important que le flux dans le sens de la buse si l'on applique la différence de

pression inverse. On vérifie alors que la résistance fluide d'un élément diffuseur dépend de la direction, ce qui permet son utilisation comme élément directeur dans une pompe. Un élément diffuseur typique est illustré dans la (figure III.6). Une efficacité η_{nd} maximale est atteinte si l'entrée du diffuseur (côté étroit) est arrondie tandis que la sortie (côté large) comporte un angle vif, pour des angles d'ouverture 7° autour de 10° . Cette valeur correspond à un compromis entre un coefficient de pertes minimal qui serait obtenu pour un angle d'environ 7° et un rapport élevé entre les sections d'entrée et de sortie pour une longueur de diffuseur donnée. Ce rapport est déterminant pour la conversion d'énergie cinétique en énergie potentielle selon la loi de Bernoulli. Ces considérations empiriques au niveau du design seront vérifiées par l'investigation des coefficients de pertes globales ξ dans les deux sens de flux (paragraphe III.6.2).

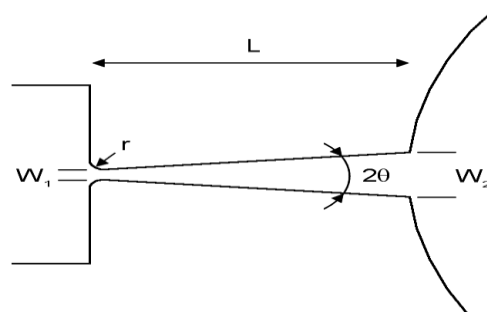


Figure III.6 Élément diffuseur typique

Différents phénomènes contribuent à l'effet de directivité d'un élément diffuseur. Ils peuvent être assimilés en étudiant le flux dans les deux sens. Des études au sujet de la théorie des diffuseurs ont été publiées dans différents articles [20], [21]. Commençons par une étude des pertes par friction pour un flux dans le sens d'une buse, de droite à gauche dans la figure III.6. Le côté droit du conduit va prendre le rôle de l'entrée. Par le fait que les angles ne sont pas arrondis, les contraintes de cisaillement dans le fluide dans cette zone vont être importantes, ce qui provoque des pertes d'énergie par friction visqueuse relativement importantes. Par la conservation de masse, le flux à l'intérieur du conduit reste constant. Ce dernier étant convergent, on observe forcément une augmentation de la vitesse moyenne u du fluide le long du conduit qui est accompagnée par une chute de pression selon la loi de Bernoulli (Eq. III.13). Il y a donc conversion d'énergie potentielle (pression) en énergie cinétique (vitesse). À la sortie du conduit, l'énergie cinétique est entièrement dissipée dans un jet. L'énergie cinétique où la hauteur équivalente cinétique est élevée, la perte correspondante est importante. On considère maintenant les pertes lorsque l'élément travaille en mode de diffuseur figure III.6: (traversé de gauche à droite). Les pertes à l'entrée sont les plus

faibles possibles par le fait qu'il s'agit d'une entrée arrondie. Le fluide est soumis à des contraintes de cisaillement moins importantes, que dans le cas d'une arrête vive ce qui signifie également une friction visqueuse réduite. Par conservation de flux, il y a une diminution de vitesse dans le conduit convergent accompagnée d'une augmentation de pression selon la loi de Bernoulli. Cet effet, que l'on appelle récupération de pression, Il n'a lieu que si l'angle de diffuseur est choisi assez petit de manière à ce que l'on observe un flux divergent et non pas une séparation de flux ce qui revient à un jet. À la sortie, il y a une autre dissipation complète de l'énergie cinétique. Dans ce cas, cette énergie est moins élevée que dans le cas de la buse, à condition qu'une récupération de pression correcte ait eu lieu. De cette manière, les pertes par friction dépendent alors de la direction du flux. On observe également dans ces éléments que l'efficacité η_{nd} dépend du nombre de Reynolds et de la vitesse du fluide, [20]. Ceci indique que des effets de turbulence ou plus généralement des phénomènes liés à l'inertie peuvent avoir une incidence sur le flux.

III.6.2 Calcul de l'efficacité

Un calcul basé sur les résultats empiriques présentés au paragraphe précédent, qui permet de calculer l'efficacité d'un diffuseur a été proposé par différents auteurs [20], [21]. On définit le coefficient des pertes globales pour la direction diffuseur ξ_D et buse ξ_n . Ces coefficients de pertes globales sont rapportés à la vitesse dans la gorge du diffuseur ; c.à.d à la section la plus petite du dispositif. Les chutes de pression à travers tout le diffuseur Δp_d ou la buse Δp_n sont liées aux vitesses moyennes dans la section de la gorge par les lois suivantes (par analogie à (Eq. III.18)) :

$$\Delta p_d = \frac{\rho \bar{u}_d^2}{2} \xi_D \quad (\text{III.22})$$

$$\Delta p_n = \frac{\rho \bar{u}_d^2}{2} \xi_n \quad (\text{III.23})$$

ξ_n et ξ_D sont appelés coefficients de pertes globales dans la direction buse ou diffuseur respectivement.

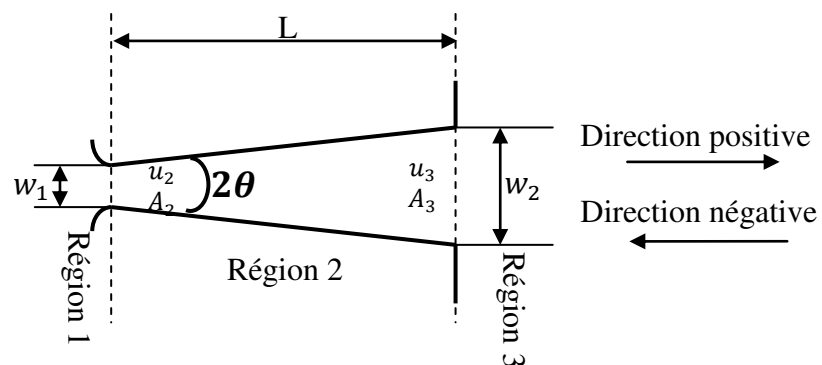


Figure III.7 Les zones dans un élément diffuseur

Les coefficients des pertes globales ξ_n et ξ_d peuvent être calculés à partir des coefficients de pertes locales K pour les trois zones suivantes : l'entrée, la zone d'expansion ou de contraction et la sortie (régions 1, 2 et 3 dans figure (III.7)). Il faut noter que contrairement aux, les K donnent les pertes dans une zone en fonction de la vitesse moyenne sur la section de cette zone et non de la vitesse dans la gorge. La chute de pression le long du dispositif complet est égale à la somme des chutes des pressions $\Delta p_{d,i}$ et $\Delta p_{n,i}$ sur les trois régions.

$$\Delta p_d = \Delta p_{d,1} + \Delta p_{d,2} + \Delta p_{d,3} \quad (\text{III.24})$$

$$\Delta p_n = \Delta p_{n,1} + \Delta p_{n,2} + \Delta p_{n,3} \quad (\text{III.25})$$

Par conservation des flux, les vitesses dans les différentes sections sont liées par les rapports des surfaces de ces dernières:

$$\bar{u}_{d,3} = \left(\frac{A_1}{A_3}\right) \bar{u}_{d,1} \quad (\text{III.26})$$

$$\bar{u}_{n,3} = \left(\frac{A_1}{A_3}\right) \bar{u}_{n,1} \quad (\text{III.27})$$

Les chutes des pressions dans chacune de ces zones étant proportionnelles au carré de la vitesse, on trouve les expressions suivantes pour les coefficients des pertes globales en fonction des coefficients de pertes pour chaque zone $K_{d,i}$ et $K_{n,i}$:

$$\xi_d = K_{d,1} + K_{d,2} + K_{d,3} \left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2 \quad (\text{III.28})$$

$$\xi_n = K_{n,1} + K_{n,2} + K_{n,3} \left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2 \quad (\text{III.29})$$

On définit l'efficacité de l'élément diffuseur comme étant le rapport des coefficients des pertes globales dans les directions diffuseur et buse.

$$\eta_{nd} = \frac{\xi_n}{\xi_d} \quad (\text{III.30})$$

Ce résultat permet de calculer l'efficacité de pompage ε_p et le débit selon (eq. III.4) et (eq. III.5).

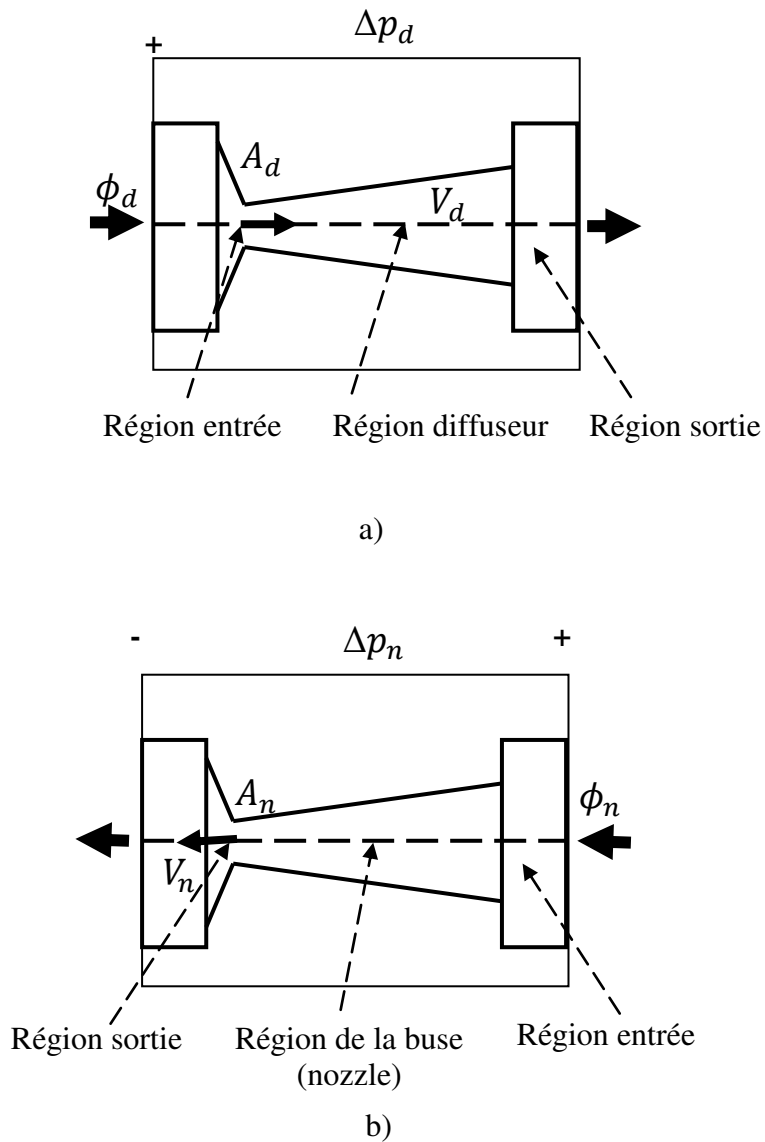


Figure III.8 Principe de conception de l'élément diffuseur/buse avec trois zones d'écoulement

a) la direction du diffuseur et b) la direction de la buse

Donc, les débits dans un diffuseur et dans une buse sont.

$$\phi_d = A_d v_d \tag{III.31}$$

et

$$\phi_n = A_n v_n \tag{III.32}$$

v_d et v_n sont les vitesses d'écoulement des fluides dans les parties les plus étroites d'un diffuseur/buse ;

$$\phi_d = A_d \left(\frac{2}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta P_d}{\xi_d}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III.33})$$

$$\phi_n = A_n \left(\frac{2}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta P_n}{\xi_n}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III.34})$$

La variation du volume dans la chambre est donné par :

$$V_c = V_0 \sin(\omega t) \quad (\text{III.35})$$

où :

$$\omega = 2\pi f ;$$

$$V_0 = K_v x_0 ;$$

V_0 : l'amplitude de la variation du volume ;

K_v : constante ;

x_0 : l'amplitude de la flèche au centre du diaphragme ;

f : la fréquence de la pompe ;

t : le temps.

Si on suppose que le flux est incompressible, l'équation simplifiée d'une micropompe sans valve peut être exprimée comme suit, [22]:

$$\frac{\partial V_c}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\partial V_c}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (\text{III.36})$$

III.7 Couplage fluide-structure

III.7.1 Formulation eulérienne

La description eulérienne étudie le passage d'une certaine quantité de matière à travers une région donnée de l'espace. Le système de référence associé est fixe et est appelé Système de Référence Spatial (SRS). Dans cette description, l'observateur se place en un point fixe et étudie comment

varient les caractéristiques de la particule passant par ce point à l'instant considéré. Cette formulation est généralement celle qui est adoptée en mécanique des fluides.

Dans le cadre de la méthode des éléments finis, la formulation eulérienne impose un maillage fixe dans l'espace. Ce maillage définit un volume de contrôle invariable au cours du temps et une particule matérielle donnée peut migrer d'un élément fini vers un autre. Certaines particules matérielles peuvent même quitter le domaine défini initialement et, dans ce cas, toute information ultérieure relative à ces particules est perdue.

L'utilisation de formulations eulériennes fait apparaître des difficultés lors de l'étude de problèmes à frontières variables. Les frontières du corps étudié ne coïncident généralement ni partout ni à chaque instant avec le bord d'un élément. Il en résulte de grandes difficultés pour prendre en compte les conditions aux limites matérielles ainsi qu'une définition peu précise des frontières matérielles lorsque celles-ci évoluent au cours du temps.

En revanche, les formulations eulériennes autorisent d'importantes distorsions de la matière. Ceci explique pourquoi elles sont largement utilisées en mécanique des fluides ou dans le cas de la mise en forme des matériaux pour l'étude des processus stationnaires.

III.7.2 Formulation lagrangienne

La description lagrangienne étudie le mouvement du corps considéré comme une certaine quantité de matière se déplaçant dans l'espace à partir d'une référence connue. Le système de référence, appelé Système de Référence Matériel (SRM), est donc attaché à la matière. Dans ce cas, l'observateur peut être considéré comme attaché à une particule matérielle donnée et il étudie l'évolution temporelle des propriétés de cette particule au cours de son mouvement. Cette formulation est classiquement adoptée en mécanique des solides.

Dans le cadre de la méthode des éléments finis, la formulation lagrangienne impose à chaque nœud de rester en coïncidence avec la même particule matérielle tout au long du processus de déformation. Cette propriété est intéressante d'un point de vue numérique puisque, lors de l'intégration des lois de comportement, les termes convectifs n'apparaissent pas dans les équations. D'autre part, un élément donné contient toujours le même ensemble de particules matérielles et est donc entraîné (convecté) par la déformation. En particulier, un nœud situé à la frontière du corps reste sur cette frontière au cours de la simulation et, dans ce cas, le suivi d'une frontière mobile ne présente pas de difficultés.

En revanche, en présence de grandes déformations, le maillage peut être fortement distordu et peut entraîner une imprécision des résultats voire l'impossibilité de conduire la simulation à terme. Des opérations de réactualisation de maillage (remaillage) sont alors indispensables, opérations coûteuses en temps homme et machine.

III.7.3 Formulation ALE

La formulation ALE est particulièrement bien adaptée à l'étude des problèmes présentant de grandes déformations et plus généralement à l'étude des problèmes couplés, [23].

Elle permet de combiner les avantages de la représentation lagrangienne (bonne définition des frontières variables, facilité d'imposer des conditions aux limites matérielles) et ceux de la formulation eulérienne (possibilité de prise en compte de grandes distorsions). Le principe de cette formulation mixte est le développement de maillages se déplaçant à taux indépendant (bien que non nul) de celui de la matière. En conséquence, la matière se déplace par rapport au maillage, comme dans une formulation eulérienne pure, mais la forme extérieure des éléments est contrôlée par les conditions aux limites du problème, comme dans une formulation lagrangienne.

On obtient donc l'écriture des équations de Navier-stokes dans la description ALE incompressible de la manière suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + ((u - w) \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \mu \Delta u + F \quad (\text{III.37})$$

où

u : la vitesse matérielle ;

w : la vitesse arbitraire.

III.7.4 Equations de Navier-Stokes

Les équations de Navier Stokes décrivent l'écoulement dans les fluides visqueux avec des balances de moment pour chaque composant du vecteur de mouvement dans toutes les dimensions spatiales. Ils supposent également que la densité et la viscosité du fluide modélisé sont constantes, ce qui donne lieu à une condition de continuité. Le mode d'application de Navier Stokes dans le logiciel Comsol Multiphasiques est un peu général et peut tenir compte des variations arbitraires de viscosité et de petite variation de densité, [23].

Les équations de Navier-stokes avec la formation de tenseur de contrainte totale sont:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \mathbf{F}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{III.38})$$

Où

ρ : la densité du flux (kg/m^3);

\mathbf{u} : le vecteur de vitesse (m/s);

p : la pression (Pa);

μ : la viscosité dynamique ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);

\mathbf{F} : terme de force du corps (N/m^3);

\mathbf{I} : la matrice d'identité.

III.8 Conditions aux limites (voir annexe)

Pour définir complètement le problème d'écoulement, on doit définir les conditions aux limites pour le fluide.

III.8.1 Conditions aux limites aux murs

La condition aux limites sur les parois de la chambre de la micro pompe est sans glissement c'est-à-dire la vitesse du fluide est égale à zéro.

$$u_{\text{fluide}} = 0 \quad (\text{III.39})$$

III.8.2 Conditions aux limites à l'entrée/sortie

Pour la simulation du fluide, la condition limite à l'entrée et à la sortie; on suppose que le total des efforts est nul, c'est-à-dire l'effort est normal:

$$\mathbf{n} \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] = 0 \quad (\text{III.40})$$

III.8.3 Limite d'interface fluide-solide

À la limite fluide-solide, la vitesse structurelle est transmise au fluide. En retour, les contraintes dans l'écoulement du fluide agissent comme une charge sur la limite intérieure de paroi du diaphragme. Donc, pour la limite d'interface fluide-solide:

$$u_{\text{fluide}} = u_w \quad (\text{III.41})$$

III.8.4 Conditions aux limites du solide

On suppose que la chambre de la micro pompe est encastrée et le déplacement est égal à zéro. Pour la membrane, le déplacement du maillage est suivant les trois axes X, Y, Z.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la micro pompe péristaltique et les équations généralisées qui la gouvernent. Aussi, deux types de diffuseurs ont été abordés et où les flux d'entrée et de sortie sont exprimés.

Par contre, le système d'équations de la pompe est complexe car ce dernier est constitué d'un couplage entre un solide et un fluide en mouvement avec un transfert d'énergie entre eux à travers une membrane vibrante.

CHAPITRE IV
SIMULATION ET INTERPRÉTATIONS
DES PERFORMANCES DE LA MICRO
POMPE PÉRISTALTIQUE

IV.1 Introduction

L'étude de la micro pompe piézoélectrique sans valves résulte d'un système d'équations différentielles complexe reliant les domaines entre eux (domaines électrique, mécanique, écoulement du fluide). La résolution de ce système est très difficile analytiquement. Cette complexité est due aux conditions aux limites des domaines étudiés, [23].

Dans ce chapitre, on présente la géométrie de la micro pompe et les résultats de simulation obtenus. Les simulations ont été effectuées avec le logiciel Comsol 3.5 afin de montrer le changement qui apparaît sur la valeur de déflexion de la membrane. Les paramètres électriques comme la tension d'alimentation et la fréquence, et les paramètres géométriques comme le matériau d'actionnement et le dimensionnement de la chambre membraneuse varient les performances de la pompe.

IV.2 Présentation de l'actionneur piézoélectrique

L'actionneur piézoélectrique est la partie fondamentale du comportement d'une micro pompe piézoélectrique à base d'un mouvement péristaltique, car celle-ci est l'élément essentiel de la micro pompe. Les types d'actionneurs piézoélectriques pris en charge ont un impact important sur la déflexion maximale de la membrane piézoélectrique à base d'un mouvement péristaltique et la fréquence de résonance. Les deux positions de l'actionneur sont exposées sur la figure (IV.1).

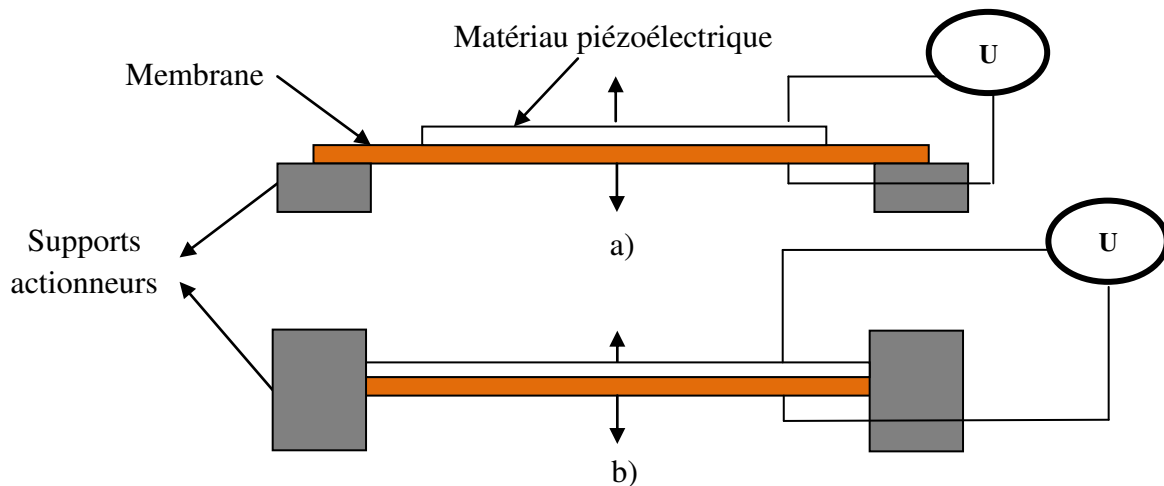


Figure IV.1 Supports de la membrane a) support avec configuration latérale b) support avec configuration axiale

IV.3 Schéma et maillage

Le modèle de la micro pompe est une combinaison de 3 éléments physiques; mécanique des structures (solide), dispositif piézoélectrique PZT (Titano-Zirconate de Plomb) à base de l'effet inverse du phénomène piézoélectricité, complètement couplé avec un module de structure fluide

d'interaction (FSI). Une équation laminaire de Navier-Stokes est utilisée pour simuler ce problème. Les figures (IV.2), et (IV.3.a) montrent un schéma du modèle 2D de cette micro pompe. La simulation peut conduire également à des problèmes de convergence dus au système complexe couplé et à la géométrie de la micro pompe, ainsi qu'au matériel informatique de simulation. Le choix d'un maillage plus grossier permet d'éviter ce genre de problèmes. Il convient alors de définir un maillage adapté à la géométrie comme illustré sur la figure (IV.3.b).



Figure IV.2 Modèle de la forme rectangulaire d'une micro pompe

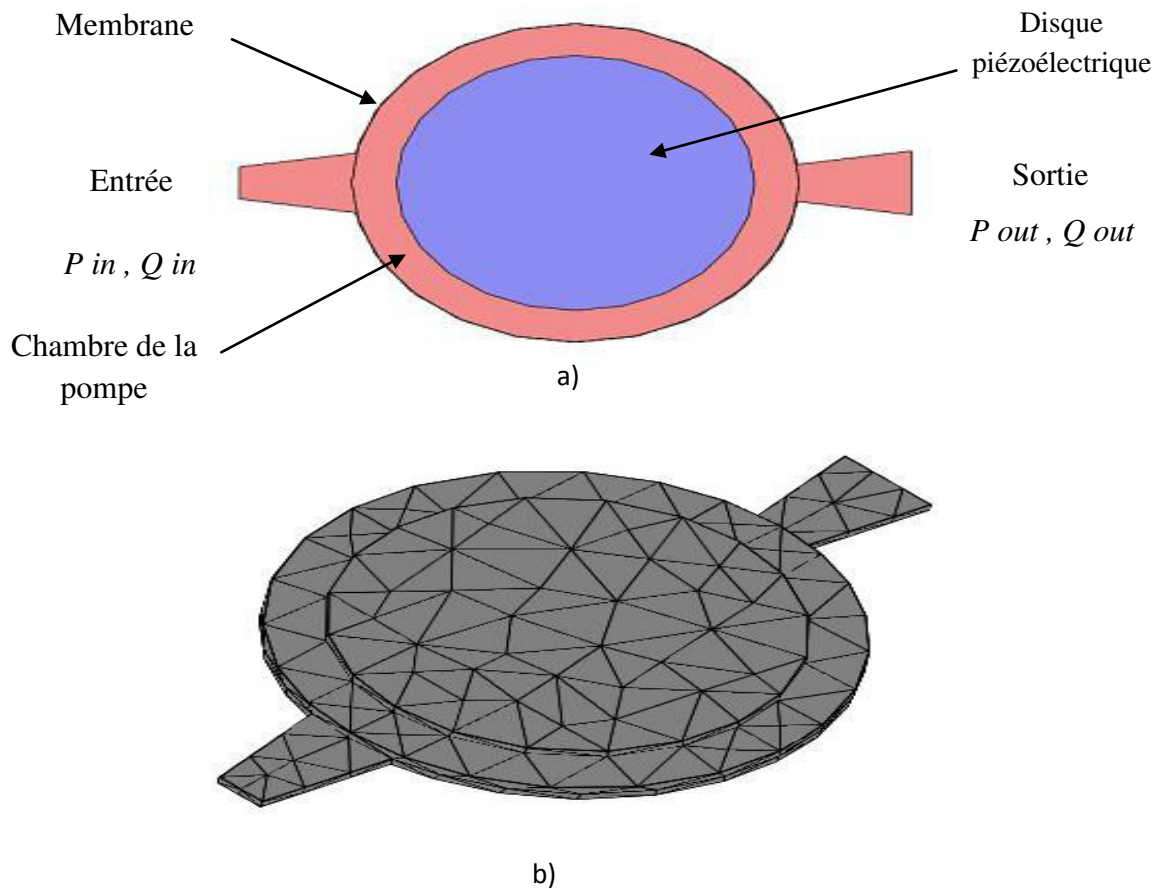


Figure IV.3 a) Modèle 2D de la forme circulaire d'une micro pompe b) Maillage de la micro pompe

Les différentes valeurs et les propriétés des matériaux utilisés de l'actionneur étudié sont données par le tableau (IV.1).

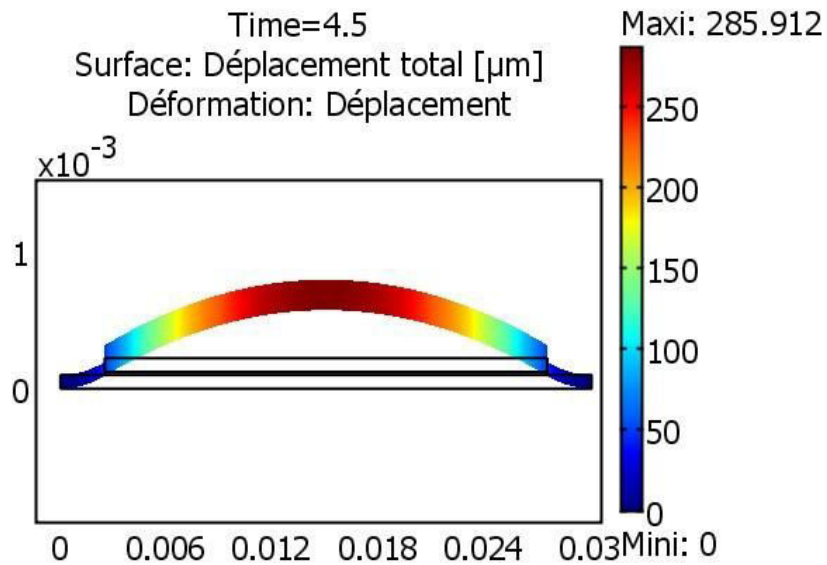
Matériaux	Propriétés	Valeurs
Pzt-5A	Permittivité relative	$\begin{bmatrix} 919.1 & 0 & 0 \\ 0 & 919.1 & 0 \\ 0 & 0 & 826.6 \end{bmatrix}$
	Matrice piézoélectricité (C/m ²)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.2947 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.2947 & 0 & 0 \\ -5.35116 & -5.35116 & 15.7835 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
	Matrice d'élasticité (N/m ²)	$\begin{bmatrix} 1.20346 & 0.751791 & 0.751791 & 0 & 0 & 0 \\ 0.751791 & 1.20346 & 0.751791 & 0 & 0 & 0 \\ 0.751791 & 0.751791 & 1.10867 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.210526 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.210526 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.22534 \end{bmatrix} \times 10^1$
	Module de Young	$\epsilon=70 \times 10^9$ [Pa]
	Coefficient de Poisson	$\nu=0.17$
	Densité	7750 [Kg/m ³]
	Cu Membrane	Module de Young
Coefficient de Poisson		$\nu=0.34$
Densité		8960 [Kg/m ³]

Tableau IV.1 Les propriétés des différents matériaux de l'actionneur piézoélectrique, [24]

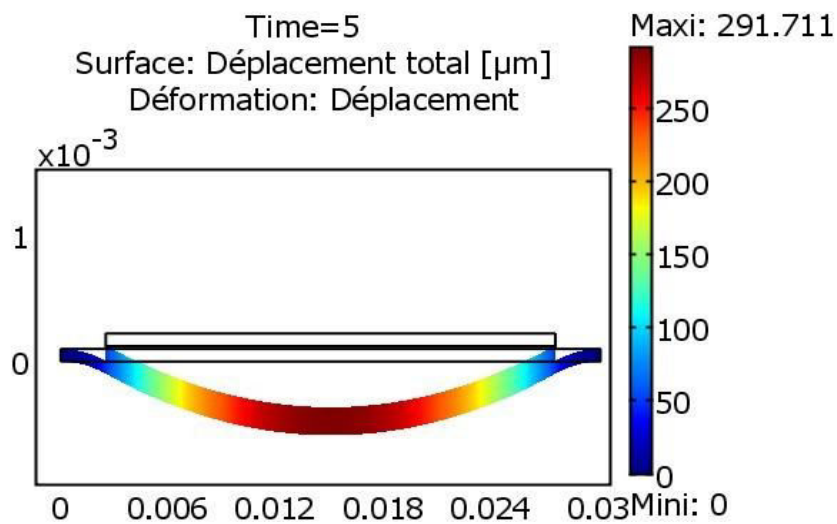
IV.4 Simulation de la micro pompe

IV.4.1 Simulation de l'actionneur en 2D

Dans cette partie, on s'intéresse à la simulation de l'actionneur piézoélectrique qui est constitué d'une plaque ou diaphragme (céramique, colle fixation et membrane). La figure IV.4 (a,b) montre qu'en présence d'un champ électrique (alimentation électrique), le diaphragme se déforme vers le haut et vers le bas selon le sens de la tension appliquée.



a)



b)

Figure IV.4 Déformation de l'actionneur piézoélectrique, a) tension positive, b) tension négative

IV.4.2 Simulation en 2D de la micro pompe

Comme l'alimentation est alternative et le cycle de la micro pompe est commencé le diaphragme se déforme vers le haut, il y a augmentation du volume dans la chambre de la micro pompe ce qui entraîne l'augmentation de la pression au niveau de l'entrée/sortie de la micro pompe comme le montre de la figure (IV.5).

Dans le cas contraire où le diaphragme se déforme vers le bas. Ceci réduit le volume de la chambre de la micro pompe ce qui explique l'augmentation de la pression au milieu de la chambre comme la montre de figure (IV.6).

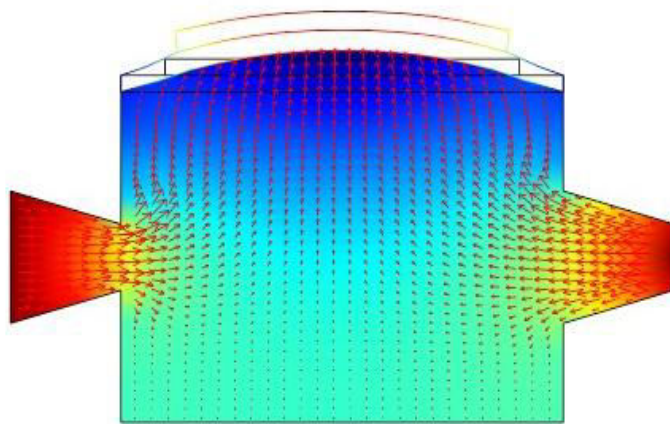


Figure IV.5 Profil de vitesse et contour de pression dans la chambre de la micro pompe à $t = 3.5s$, pour le mode d'alimentation

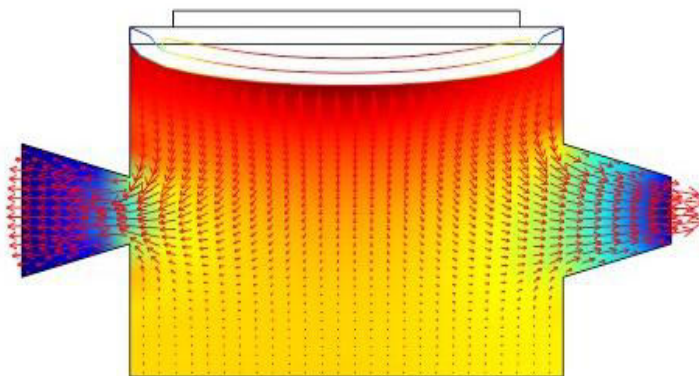


Figure IV.6 Profil de vitesse et contour de pression dans la chambre de la micro pompe à $t = 4s$, pour le mode de pompage

IV.4.3 Simulation en 3D de la micro pompe

La conception de la micro pompe est de manière significative un problème multi physique dans lequel le changement volumétrique de la chambre de la pompe et la quantité de fluide pompé sont directement couplés. Nous avons utilisé Comsol 3.5 Multiphysics pour étudier les performances d'une micro pompe avec un actionneur piézoélectrique pompant un fluide. Le modèle capture le flux de sortie accumulé, le flux net ou les fluctuations de flux en fonction de la déviation de l'actionneur piézoélectrique qui se déplace avec le disque de diaphragme (membrane) dans des directions positive / négative afin d'induire des pressions de décharge au niveau de la sortie, en fonction de différentes tensions d'entrée et avec des fréquences d'excitation, [19].

Le modèle de la micro pompe à déplacement est une combinaison de 3 éléments physiques; mécanique structurelle (solide), dispositif piézoélectrique (PZT), entièrement couplé à un module d'interaction fluide-structure (FSI). L'équation laminaire de Navier-Stokes est utilisée pour simuler ce problème. La (figure IV.7) montre le schéma du modèle 3D de cette micro pompe.

Un signal d'onde à une fréquence spécifique excite le disque piézoélectrique. Le diaphragme et l'actionneur piézoélectrique se déplacent ensemble et le maillage en mouvement de la méthode (FSI) transfère la contrainte/déformation au domaine de fluide. Le mouvement des mailles de fluide suit une déformation solide. La méthode FSI est gérée automatiquement par les modèles non linéaires. Le fluide s'écoule de l'entrée à la sortie. Le flux de ce fluide est décrit par les équations de Navier-Stokes avec un flux newtonien incompressible laminaire et des limites libres à l'entrée et à la sortie. Le logiciel Comsol gère l'interaction fluide-structure à l'aide d'une formulation Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE). Cela implique une adaptation du lagrangien pour le solide et de l'eulérien pour le fluide.

La deuxième partie de ce travail est une simulation 3D de la micro pompe qui est entreprise et où les paramètres de cette dernière sont donnés dans le tableau IV.2.

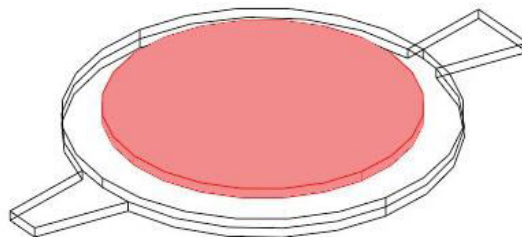


Figure IV.7 Modèle 3D de la micro pompe.

Matériaux	Propriétés	Valeurs
Pzt-5H	Permittivité relative	$\begin{bmatrix} 1704.04 & 0 & 0 \\ 0 & 1704.04 & 0 \\ 0 & 0 & 1433.6 \end{bmatrix}$
	Matrice piézoélectricité (C/m ²)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17.0345 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.0345 & 0 & 0 \\ -6.612281 & -6.612281 & 23.2403 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
	Matrice d'élasticité (N/m ²)	$\begin{bmatrix} 1.272 & 0.802 & 0.8467 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8021 & 1.272 & 0.8467 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8467 & 0.8467 & 1.174 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2298 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2298 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2347 \end{bmatrix} \times 10^{11}$
	Module de Young	$\epsilon = 2.0 \times 10^{11}$ [Pa]
	Coefficient de Poisson	$\nu = 0.33$
	Densité	7500 [Kg/m ³]
	SiO ₂ Membrane	Module de Young
Coefficient de Poisson		$\nu = 0.17$
Densité		2200 [Kg/m ³]
Fluide 1 Eau	Densité	1000 (kg/ m ³)
	Viscosité dynamique	0.001 (kg/m)
Fluide 2 Sang artificiel	Densité	1050 (kg/ m ³)
	Viscosité dynamique	0.004 (kg/m)

Tableau IV.2 Les propriétés des différents matériaux de la micro pompe

L'élément piézoélectrique utilisé montre que le déplacement prend une forme sinusoïdale sous une tension d'excitation appliquée aux bornes de cet élément. Le déplacement (déflexion) au centre de la membrane en fonction du temps est montré dans la (figure IV.8).

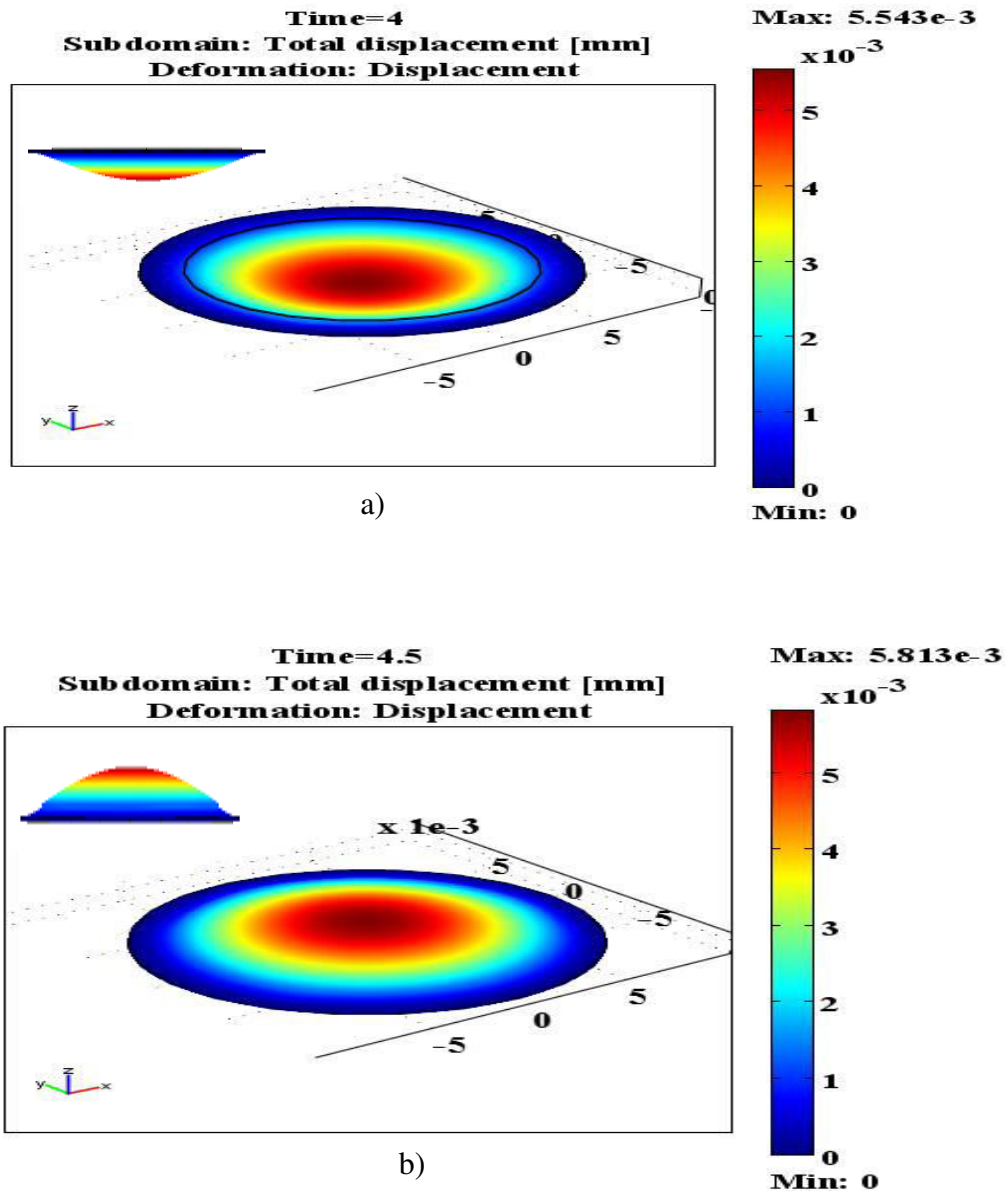


Figure IV.8 Résultats de la simulation du déplacement de l'actionneur piézoélectrique.
a) disque concave, b) disque convexe.

Le cycle de pompage de la micro pompe est lié à la déformation de la membrane. Cette membrane est attachée à un élément piézoélectrique. Ce dernier se déforme vers le haut entre $t = 0$ s et 0.13 s, passe de $t = 0.13$ s à 0.36 s, vers le bas et remonte de $t = 0.36$ s et 0.5 s pour terminer un cycle de pompage figure IV.9.

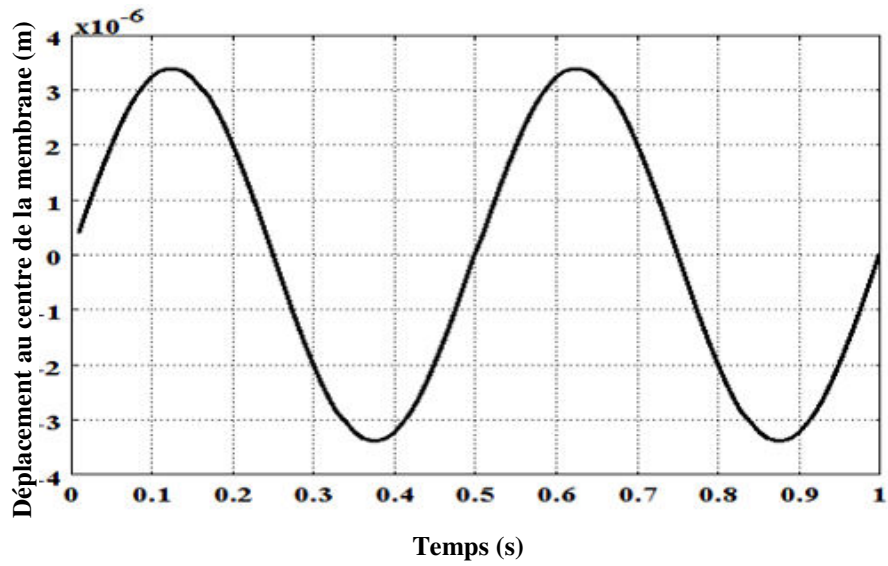


Figure IV.9 Déflexion au centre de la membrane en fonction du temps.

La déformation maximale se produit toujours au milieu de la céramique piézoélectrique, figure (IV.10) si la membrane et le disque de la céramique sont centrés. Dans le cas inverse, la valeur de la déformation maximale est modifiée.

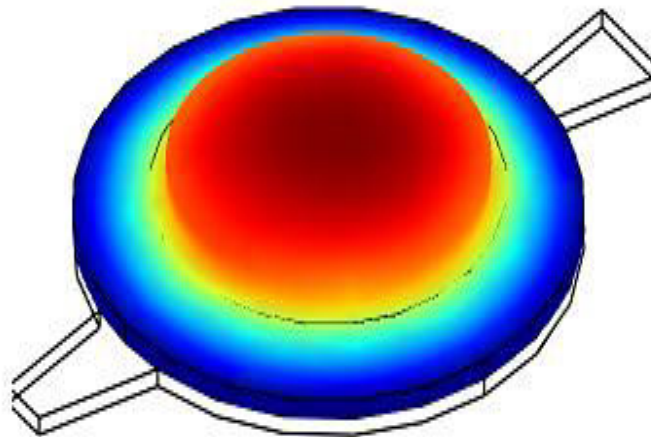


Figure IV.10 Déplacement total du diaphragme

La source d'alimentation électrique est alternative avec une fréquence (100V/5Hz). Dans le demi-cycle de la pompe, une fois le diaphragme se déplace vers le bas ce qui réduit le volume de la

chambre de la micro pompe et explique l'augmentation de la pression au centre de la micro pompe comme le montre de la figure (IV.11). Par contre, quand le diaphragme se déplace vers le haut, il entraîne l'augmentation du volume de la chambre de la micro pompe et ce qui explique l'augmentation de la pression au niveau de l'entrée/sortie de la micro pompe, figure (IV.12).

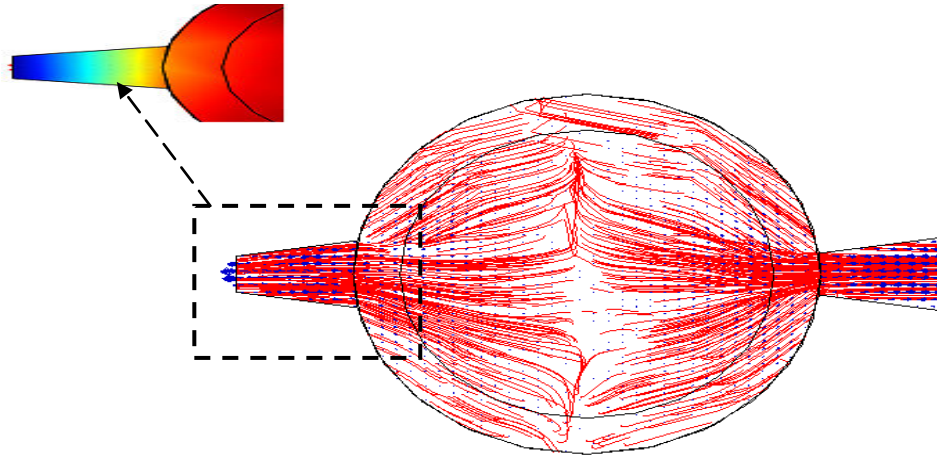


Figure IV.11 Flèche : champ de vitesse, streamlines: champ de vitesse, sous domaine: pression à l'intérieur de la chambre de la micro pompe : phase de décharge

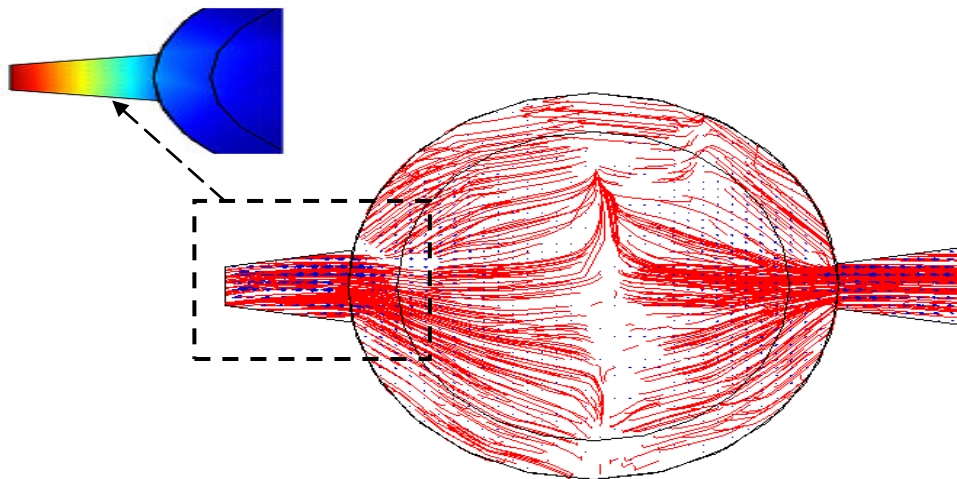
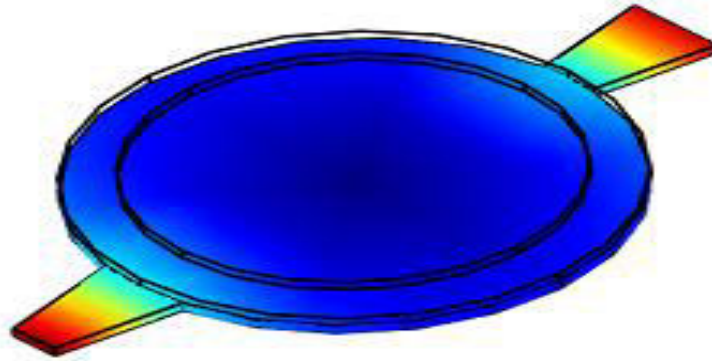


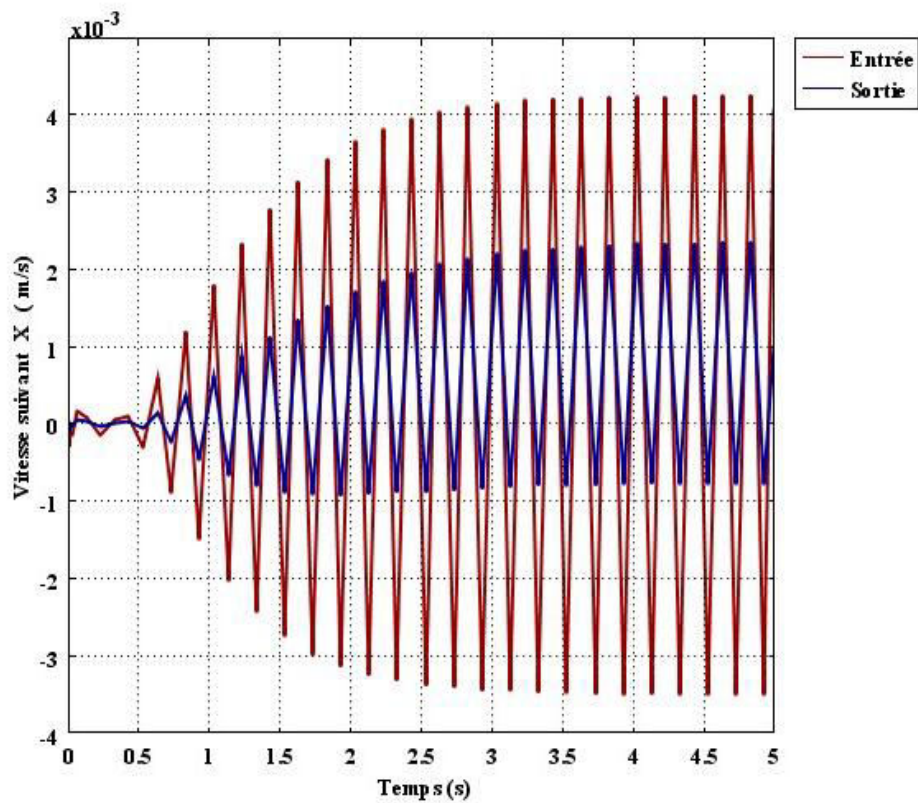
Figure IV.12 Flèche : champ de vitesse, streamlines: champ de vitesse, sous domaine: pression à l'intérieur de la chambre de la micro pompe : phase d'alimentation

La figure (IV.13 (a)) illustre la pression à l'intérieur de la chambre en mode d'alimentation avec un signal d'excitation égal à 100 V et une fréquence de 5 Hz. La vitesse d'écoulement pour l'eau

comme liquide est illustrée dans la figure (IV.13 (b)) qui montre le fluide s'écoulant dans la chambre à la fois entrée (à gauche) et sortie (à droite). Les vitesses d'écoulement maximales atteignent respectivement $4.20 \cdot 10^{-3}$ m/s et $2.26 \cdot 10^{-3}$ m/s entrée /sortie.



a)



b)

Figure IV.13 a) Contours de pression et b) Vitesse d'écoulement entrée /sortie pour l'eau

Les simulations du débit d'eau entrée/sortie pendant un cycle de pompage de la micropompe sont illustrées sur la figure (IV.14). L'angle de l'ouverture (θ) du diffuseur / buse est de 11.30° . La différence entre le débit d'entrée et le débit de sortie correspond au débit net de la micropompe.

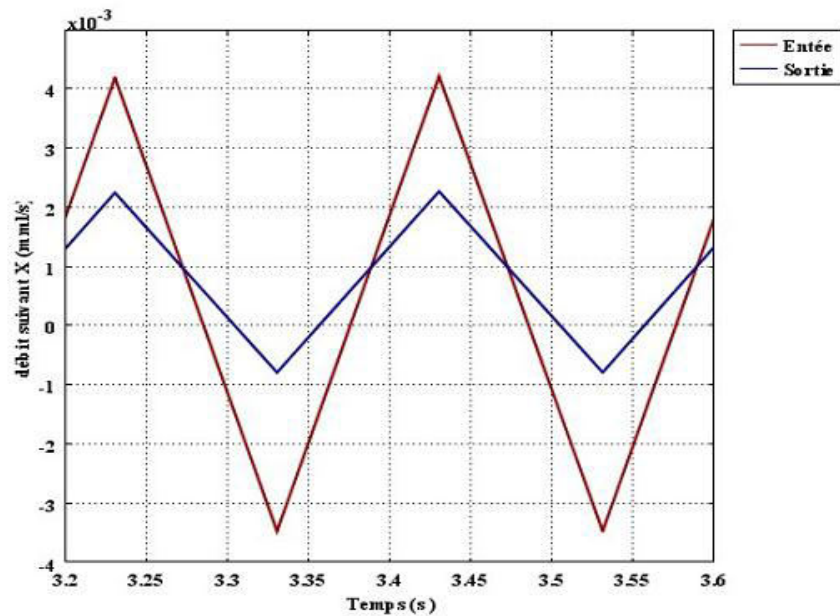


Figure IV.14 Débit d'eau à l'entrée et à la sortie de la micro pompe.

IV.5 Etude des performances de la micro pompe

L'optimisation de l'actionneur piézoélectrique et de la géométrie de la micro pompe est une étape fondamentale pour parfaire les performances et maximiser le rendement pour des applications bien définies.

IV.5.1 Variation de la tension de commande

Pour exploiter la relation entre la déformation de la membrane et la tension de commande, différentes tensions sont appliquées sur la plaque de céramique PZT (Titano-Zirconate de Plomb), et où les déplacements correspondants de la membrane ont été mesurés. On remarque que le déplacement augmente avec l'augmentation de la tension de commande. La relation de la tension de commande et le déplacement de la membrane au niveau de la zone centrale ont été illustrés sur les figures (IV.15 et IV. 4).

La figure (IV.15) montre que pour obtenir des déplacements plus importants au centre de la membrane, il faut appliquer des tensions de plus en plus élevées.

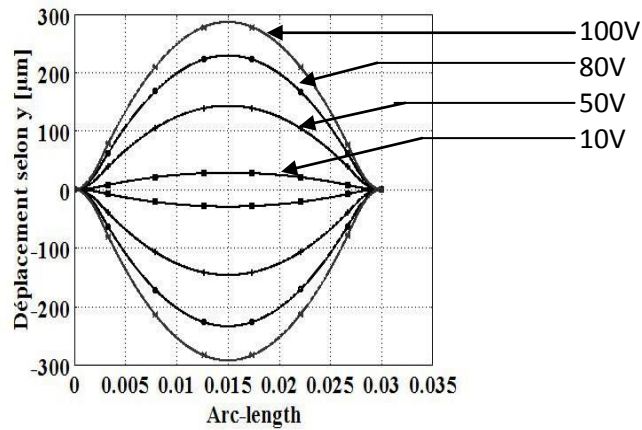


Figure IV.15 Variation du déplacement pour différentes tensions de commande.

IV.5.2 Influence de la distance entre les deux centres (membrane – matériau piézoélectrique)

La figure (IV.16) montre que la déformation maximale se produit toujours au centre du matériau piézoélectrique. Si le centre de la membrane n'est pas confondu sur le centre du matériau piézoélectrique, la valeur maximale de la déformation est minimale au milieu tend vers zéro. On suppose que d_0 est la distance entre le centre de la membrane et le centre du matériau piézoélectrique.

Si $d_0 = 0$, la déformation dans ce cas est maximale et les deux centres sont confondus.

Si $d_0 \neq 0$, la valeur de la déformation est nulle ou proche du zéro; c'est pour cela, qu'un contrôle visuel sur les deux centres est nécessaire.

Afin d'obtenir la déformation maximale, il est impératif de faire confondre les deux centres.

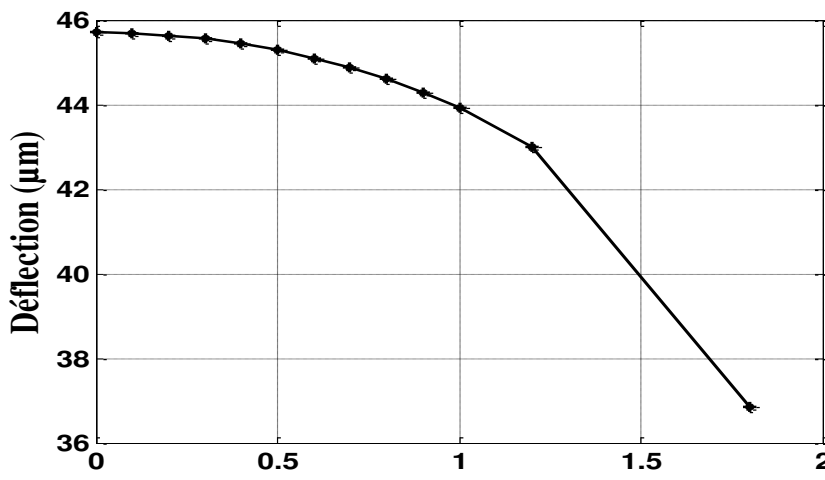


Figure IV.16 Influence de la distance entre le centre de la membrane et celui du piézoélectrique sur la déflexion.

IV.5.3 Influence de l'épaisseur de la colle de fixation sur la déformation maximale.

La fixation entre le piézoélectrique et la membrane se fait à travers une colle de fixation. L'épaisseur de cette dernière a une influence directe sur la déformation maximale du système (membrane, piézoélectrique et colle de fixation).

La figure (IV.17) montre l'influence de la colle sur la déformation maximale. Pour obtenir une déformation maximale, il faut utiliser une couche de colle très mince.

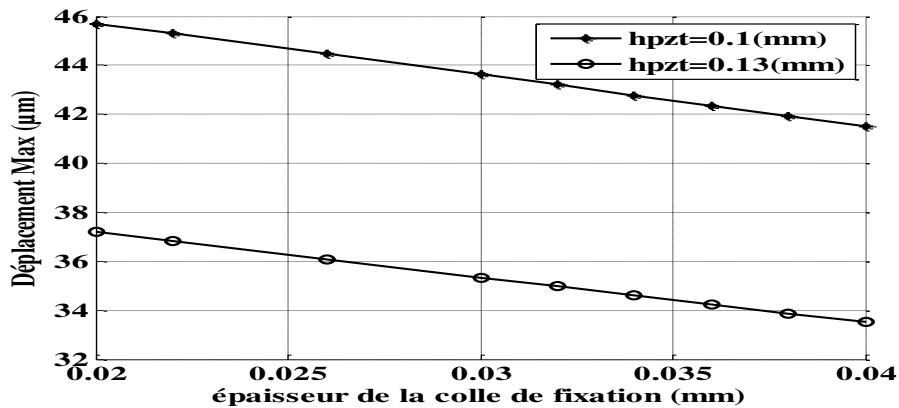


Figure IV.17 Influence de l'épaisseur de la colle de fixation sur la déformation maximale.

IV.5.4 Influence de l'épaisseur de la membrane sur la déformation maximale.

La figure (IV.18) montre la relation entre la déformation maximale et l'épaisseur de la membrane pour deux épaisseurs du matériau piézoélectrique simulé. On remarque que la déformation maximale diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la membrane.

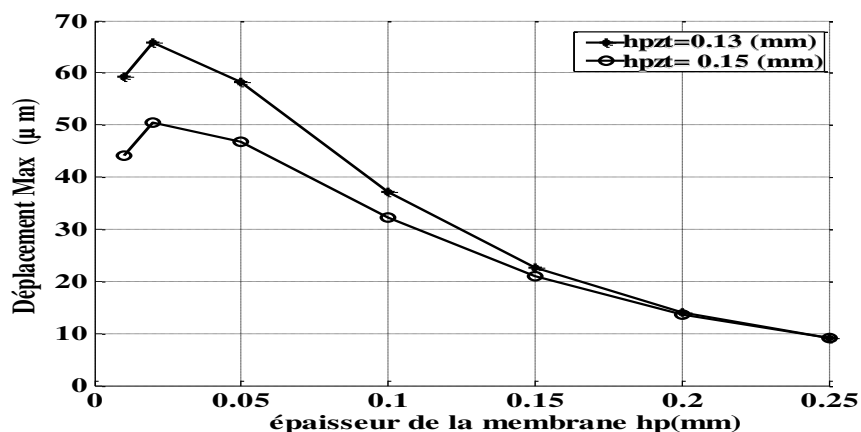


Figure IV.18 Influence de l'épaisseur de la membrane sur la déformation maximale

La figure (IV.19) montre la relation entre la déformation maximale et les différents matériaux piézoélectriques. La nature de l'élément piézoélectrique joue un grand rôle dans la conception des

micro pompes. Le matériau piézoélectrique (PZT 5H) assure une meilleure déformation ; par contre le matériau piézoélectrique (PZT 5A) réalise la plus faible déformation. Le choix des matériaux est un facteur important car le matériau piézoélectrique réalisant une plus grande déformation, assurera un plus grand débit.

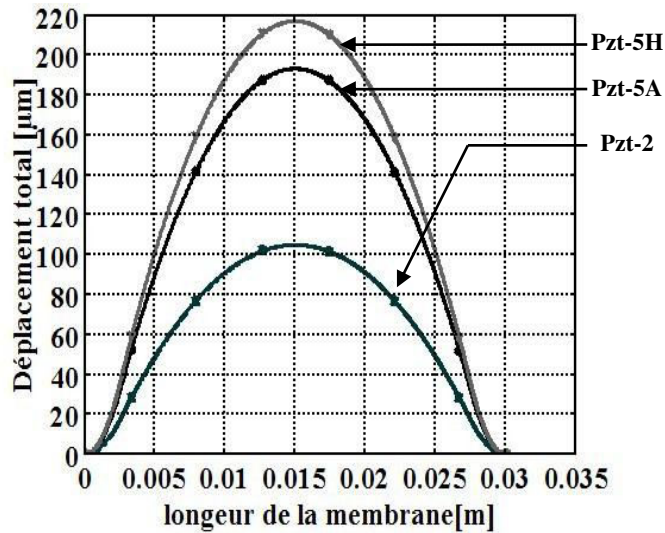


Figure IV.19 Déplacement en fonction de la nature des matériaux piézoélectrique. (Pzt-5H), (Pzt-5A),(Pzt-2).

Le déplacement de la membrane due à la tension de commande a une relation avec la vitesse instantanée pour chaque position de diaphragme. A un point donné, la vitesse maximale se trouve au milieu de la membrane. Cette vitesse est proche du zéro lorsque la position est à la limite du diaphragme.

La figure (IV.20) montre la vitesse en fonction de la longueur de la membrane, où la vitesse max de 1.65mm/s est atteinte au centre de la membrane pour une tension de 220V.

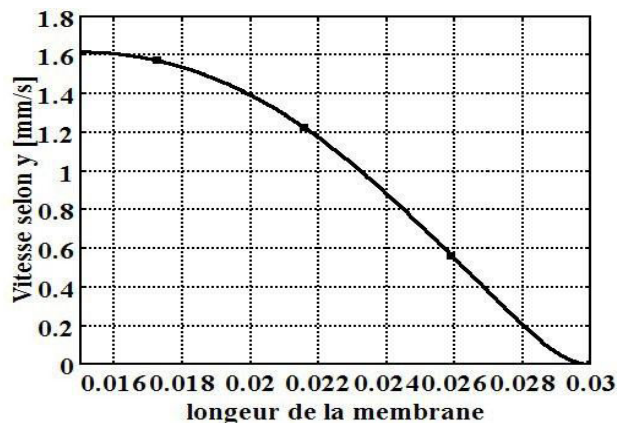


Figure IV.20 Profil de la vitesse en fonction de la longueur de la membrane.

IV.5.5 Influence de la viscosité dynamique du liquide sur le débit de la micro pompe

La viscosité dynamique du liquide est un facteur important par rapport au rendement de la micro pompe car elle peut réduire ou augmenter l'efficacité du pompage comme le montre de la figure (IV.21).

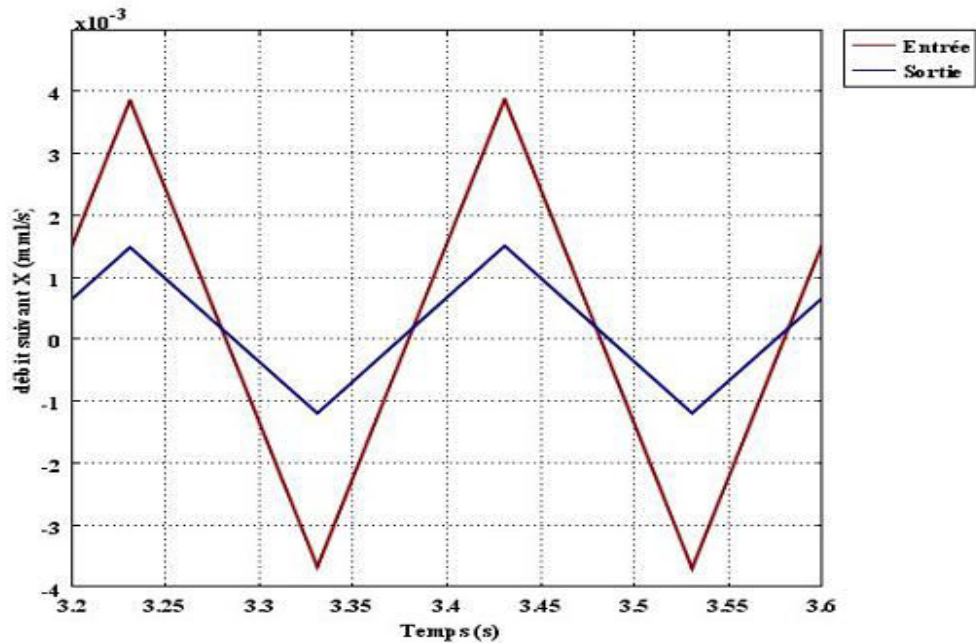


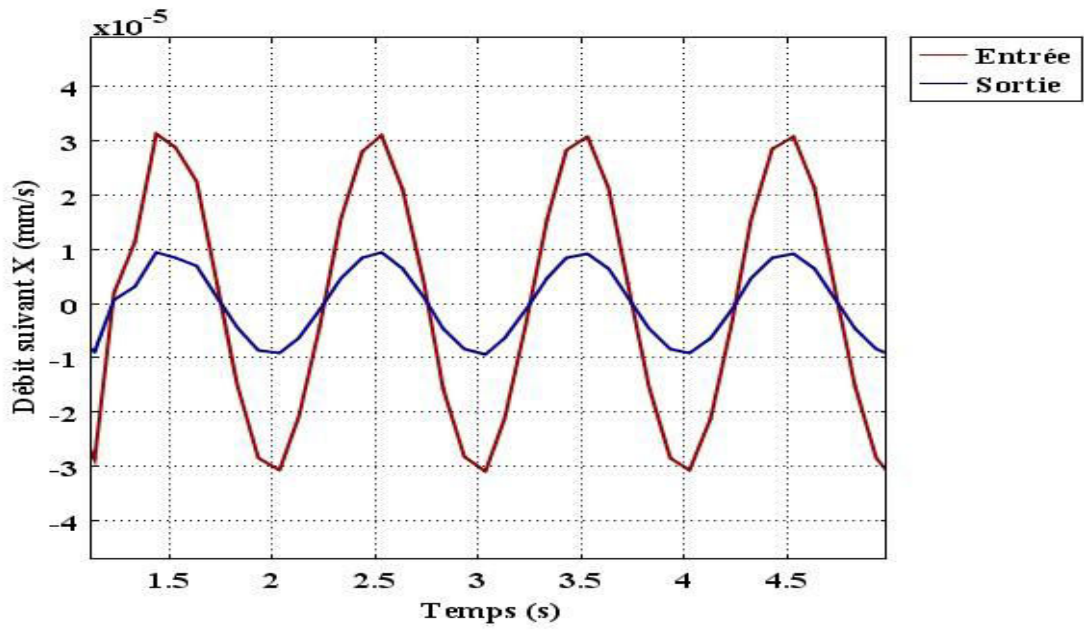
Figure IV.21 Débit du sang artificiel à l'entrée et à la sortie de la micro pompe.

Les caractéristiques obtenues sont comparées avec celles présentées par [15], [21], [23], [24], pour confirmation et validation des résultats obtenus. On remarque, que par leurs allures, ces dernières sont similaires à celles obtenues que ce soit théoriquement ou expérimentalement.

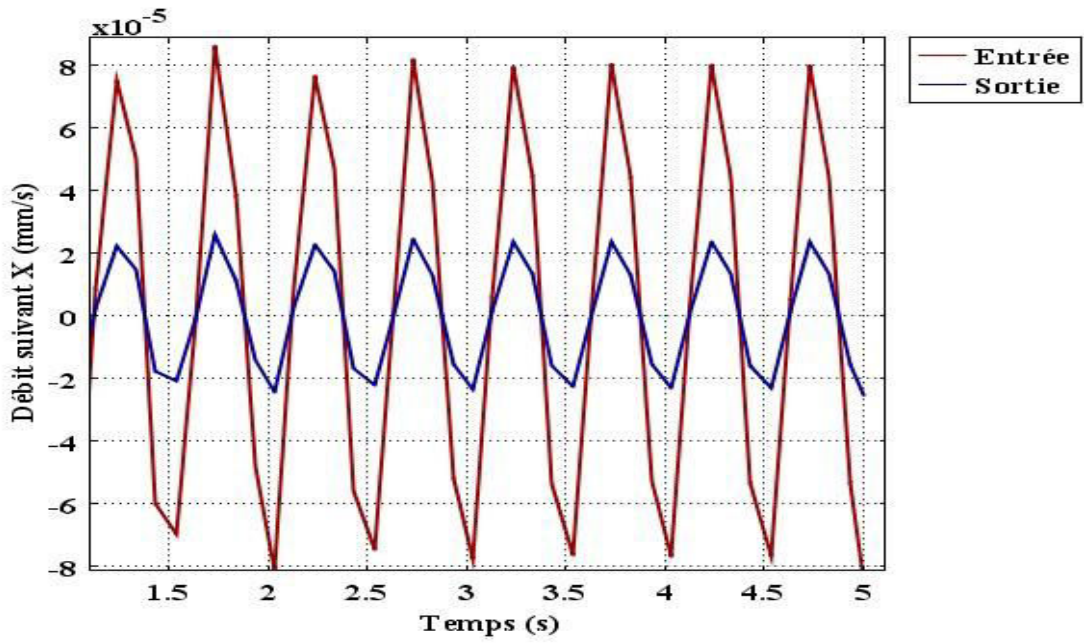
IV.5.6 Influence de la fréquence d'actionnement sur le débit de la micro pompe

La figure IV.22 illustre les débits de la micro pompe pour une tension appliquée de 100 Volt et trois fréquences de 1, 2 et 5 Hz.

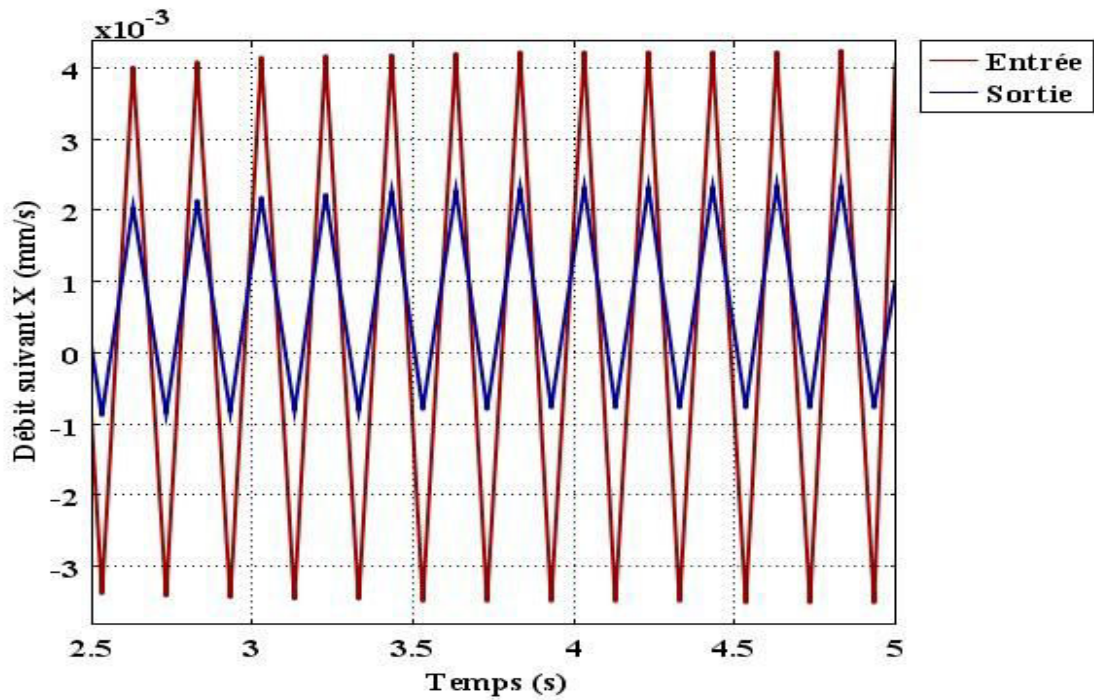
Les résultats de simulation indiquent clairement que les vitesses de pompage et les débits entrée/sortie de la micro pompe augmentent en fonction l'élévation de la fréquence d'actionnement comme le montre de la figure IV.22.



b) 1 Hz



b) 2 Hz



c) 5 Hz

Figure IV.22 Débit de la micro pompe pour trois fréquences: a) 1Hz , b) 2Hz ,c) 5Hz

IV.7 Conclusion

La modélisation numérique de la micro pompe élaborée sous Comsol 3.5 a montré que l'amplitude du déplacement ou la déflexion de la membrane dépend essentiellement de la tension appliquée, des épaisseurs de l'actionneur disque PZT (Titano-Zirconate de Plomb), du disque de la membrane et celle de la colle.

L'étude du débit de la micro pompe dans le cas de deux fluides (eau et sang artificiel) montre que le débit est en relation direct avec la viscosité dynamique du fluide.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans cette thèse concerne l'étude, la simulation et le contrôle de l'écoulement des liquides dans une micro pompe péristaltique à base d'un actionneur piézoélectrique. Cette étude est basée sur la modélisation et la simulation de la micro pompe péristaltique faite par le logiciel Comsol 3.5 Multiphysics. Dans ce contexte, le modèle d'interaction fluide-structure utilisé fait appel à des méthodes développées à partir des éléments finis. La méthode arbitraire lagrangienne-eulérienne (ALE), les équations de Navier-Stokes, ainsi que et la dynamique d'un solide élastique sont utilisés dans cette simulation.

Les différentes caractéristiques telles que la déflexion pour les différentes tensions d'alimentation, le débit du fluide, le profil de vitesse et le contour de pression dans la chambre de la micro pompe dans les deux modes, d'alimentation et de pompage, sont présentées.

L'actionneur piézoélectrique utilisé montre que le déplacement maximal à une forme sinusoïdale sous une tension d'excitation appliquée aux bornes de cet élément se produit toujours au milieu de la membrane si le centre de cette dernière est confondu avec celui du disque piézoélectrique. Et par conséquent, on obtient une déflexion maximale assurant ainsi un bon rendement de la micro pompe.

Le diaphragme se déplaçant vers le bas entraîne une augmentation de la pression au milieu de la micro pompe. Cela est dû à la force de déformation du solide (actionneur) conduit par la membrane au fluide. Par contre, le déplacement du diaphragme vers le haut implique une augmentation de la pression au niveau d'entrée/sortie de la micro pompe.

La déformation sinusoïdale de l'actionneur permet l'écoulement du fluide avec des vitesses différentes, dans les deux sens à travers les éléments diffuseurs à parois plates (θ) de l'ordre de 11.30° .

Les résultats de simulation ont été vérifiés pour deux types de fluides (eau et sang artificiel) à travers les caractéristiques du débit et ont montré que la viscosité est un facteur dominant pour assurer une efficacité et un bon rendement de la micro pompe.

L'étude de l'actionneur et la déflexion de la membrane offrent des possibilités d'amélioration des performances de la micro pompe ; plus précisément, l'augmentation du débit de pompage avec des paramètres optimaux de la pompe ; c'est-à-dire l'obtention de grandes déflexions avec de faibles tensions.

La simulation a également démontré dans ce travail, que la commande et l'amélioration du débit de la micro pompe est possible soit par l'augmentation de la tension d'excitation, soit par la fréquence, soit en rajoutant une ou plusieurs micro pompes en parallèle ou en série.

Afin d'apporter des améliorations futures, on suggère :

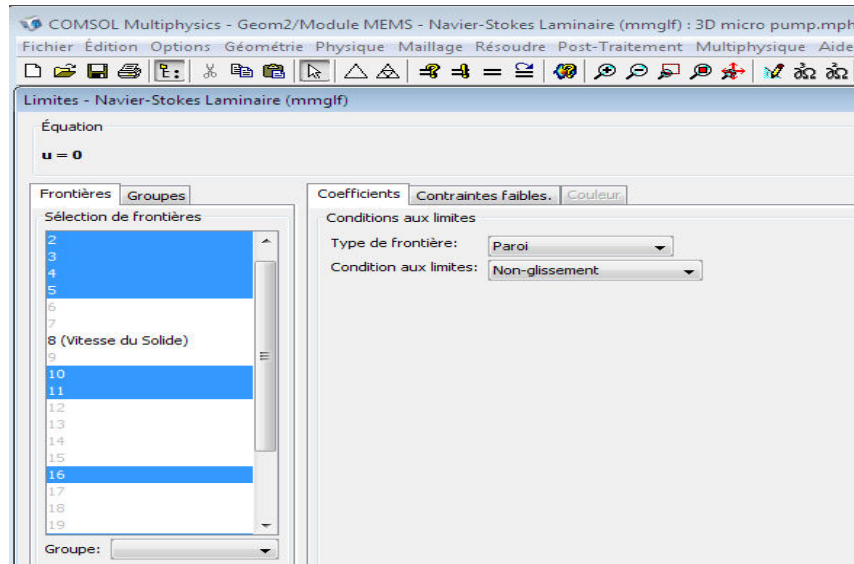
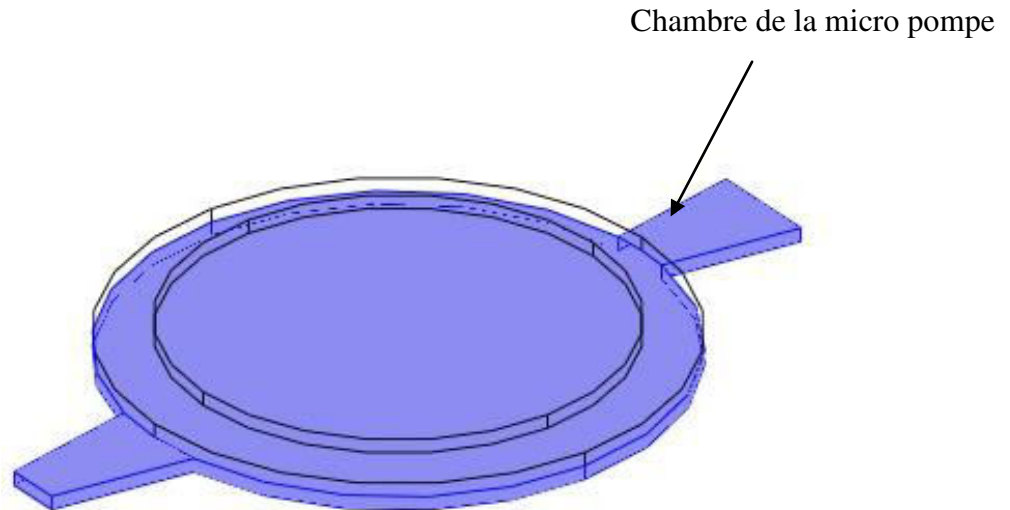
- la modification de la masse et de la raideur de la membrane ;
- l'ajout des valves actives à l'entrée/sortie pour conserver le volume dans la chambre au cours du cycle du pompage ;
- la réalisation d'un prototype.

ANNEXE

A.1 Conditions aux limites

Pour définir complètement le problème d'écoulement, on doit définir les conditions aux limites pour le fluide.

A.1.1 Conditions aux limites aux murs



$$\mathbf{u}_{\text{fluide}} = 0$$

Les conditions aux limites sur les parois de la chambre de la micro pompe sont sans glissement c'est-à-dire la vitesse du fluide est égale à zéro.

A.1.2 Conditions aux limites à l'entrée/sortie

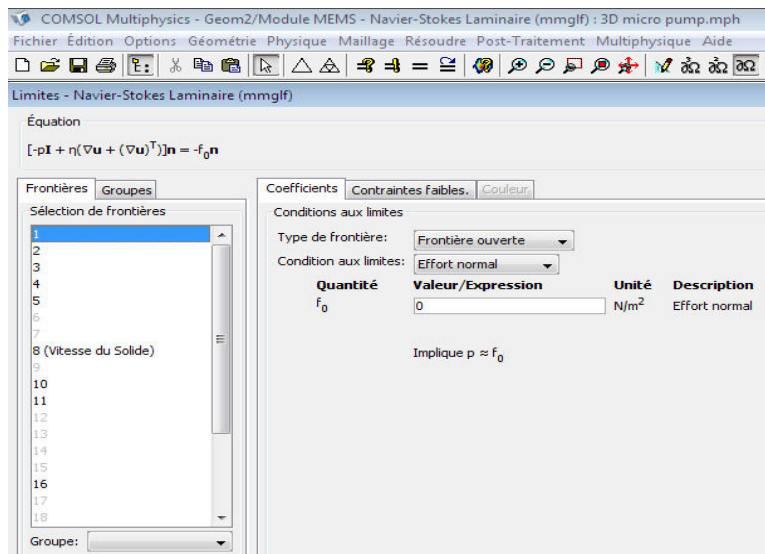
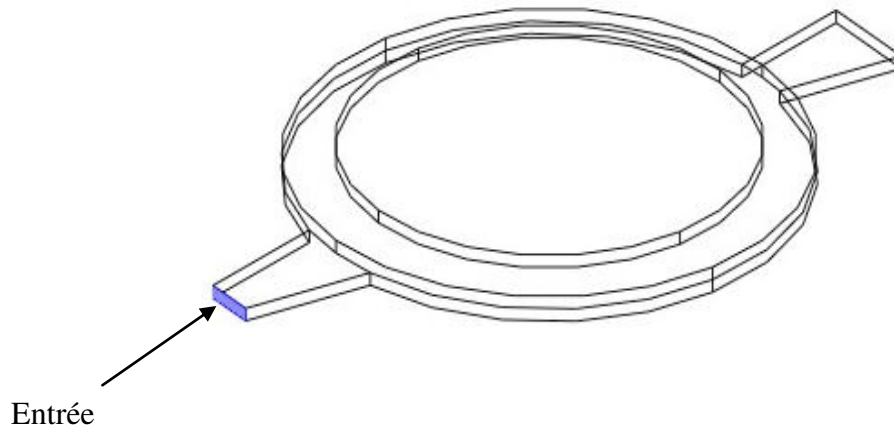
Pour la simulation du fluide, la condition aux limites à l'entrée et à la sortie est telle qu'on suppose que le total des efforts est nul, c'est-à-dire l'effort est normal:

$$[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)]\mathbf{n} = -\mathbf{F}_0 \mathbf{n}$$

Conditions aux limites à l'entrée Implique que

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{0}$$

$$\left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u}_{fluid} + (\nabla\mathbf{u}_{fluid})^T)\right]\mathbf{n} = \mathbf{0}$$



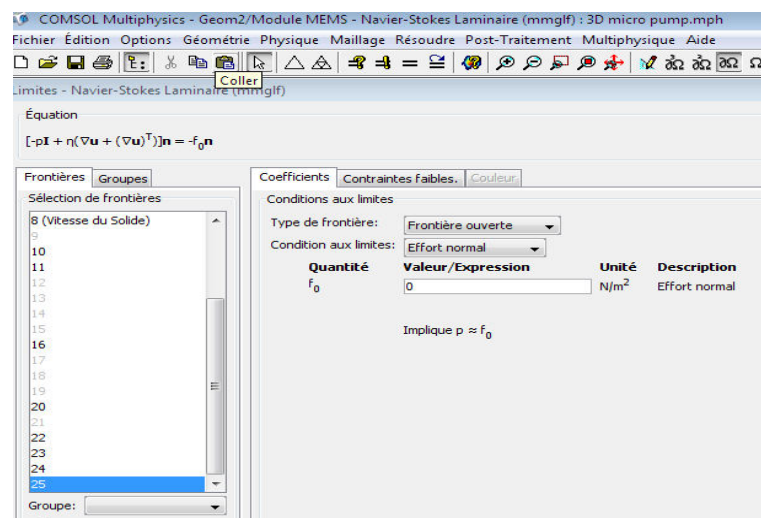
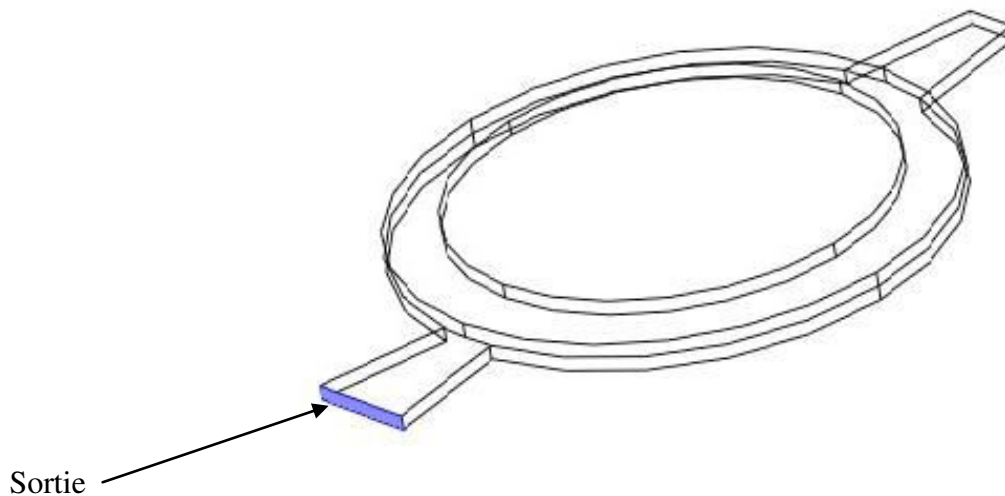
Conditions aux limites à la sortie:

$$[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)]\mathbf{n} = -\mathbf{F}_0 \mathbf{n}$$

Implique que :

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{0}$$

$$\left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u}_{fluid} + (\nabla\mathbf{u}_{fluid})^T)\right]\mathbf{n} = \mathbf{0}$$



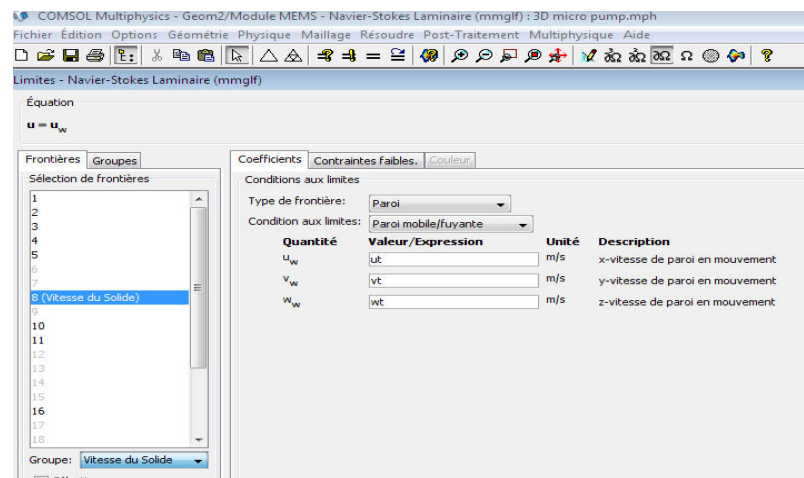
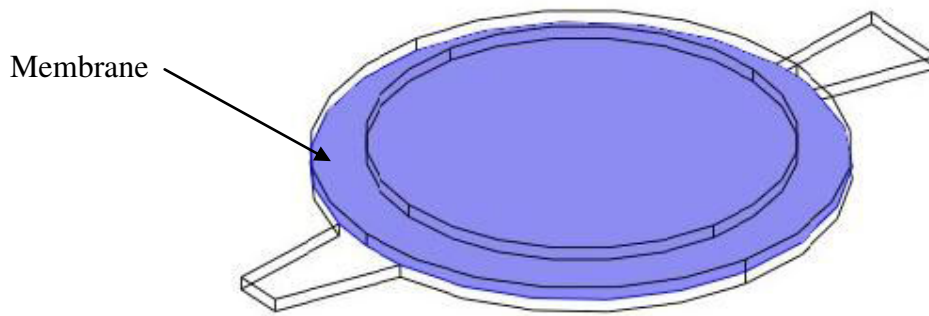
A.1.3 Limite d'interface fluide-solide

À la limite fluide-solide, la vitesse structurelle est transmise au fluide. En retour, les contraintes dans l'écoulement du fluide agissent comme une charge sur la limite intérieure de la paroi du diaphragme. Donc, pour la limite d'interface fluide-solide:

$$\mathbf{u}_{fluide} = \mathbf{u}_w$$

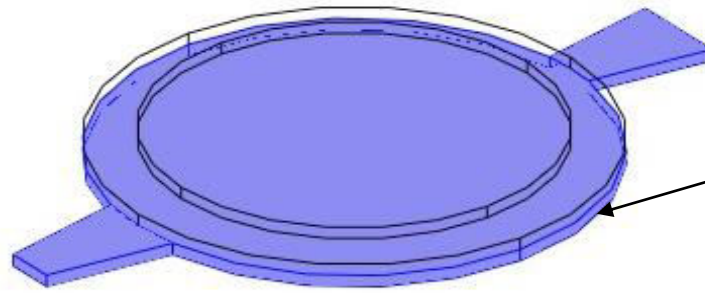
Où \mathbf{u}_w la vitesse de la membrane définie par :

$$\mathbf{u}_w = \frac{\partial(\text{déplacement})}{\partial t}$$

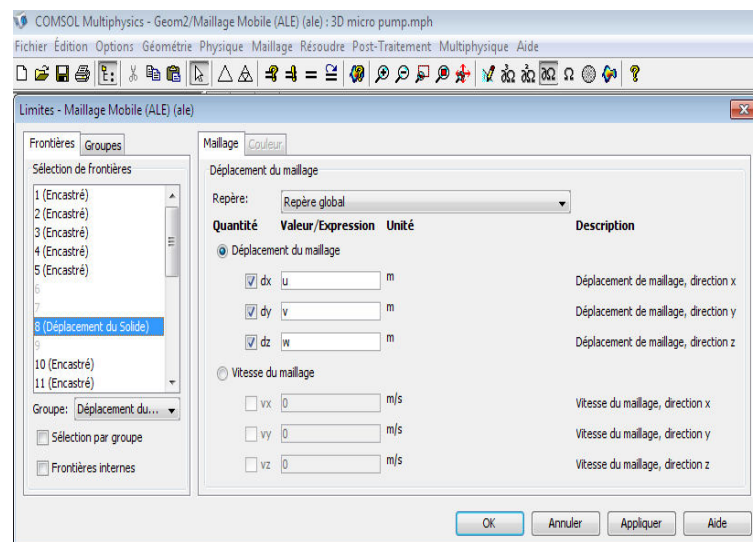
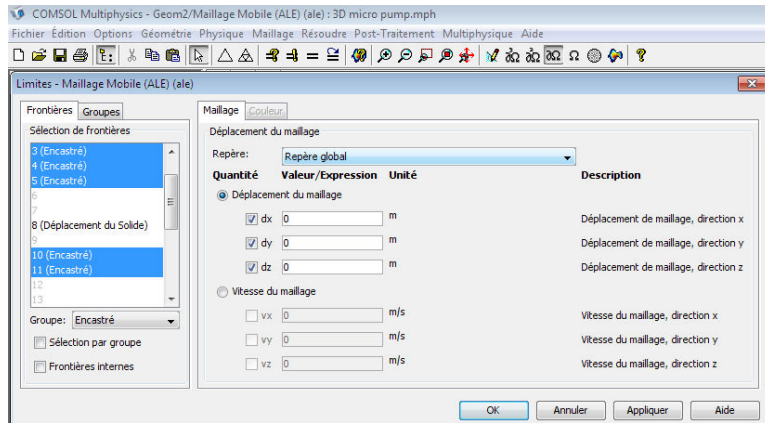


A.1.4 Conditions aux limites de la chambre de la micro pompe suivant l'adaptation ALE

On suppose que la chambre de la micro pompe est encastrée et son déplacement est égal à zéro. Pour la membrane, le déplacement du maillage est suivant les trois axes.

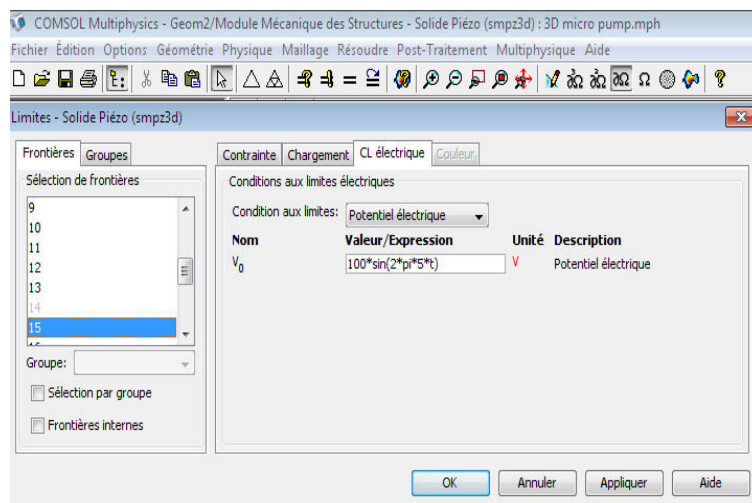
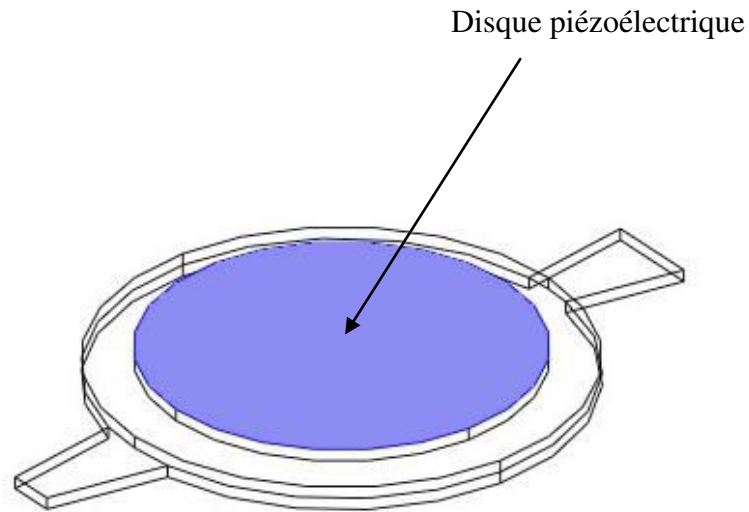


Chambre de la micro pompe



A.1.5 Alimentation du disque piézoélectrique

Pour l'alimentation du disque piézoélectrique, on choisit une alimentation sinusoïdale de fréquence 5Hz avec une amplitude de 100 volts.



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Christophe Castille.** " Etude de MEMS piézoélectriques libérés et microstructurés par sérigraphie. Application à la détection en milieu gazeux et en milieu liquide". Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2010.
- [2] **A. Hamie.** " Prototype d'une micropompe dédiée à l'injection des médicaments anti - épileptiques ". Institut de Génie Biomédical, École Polytechnique de Montréal, 2013
- [3] **O. Smal.** " Etude de clapets passifs et de leur intégration dans une micro-pompe". Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Louvain Belgique, 2010.
- [4] **C. Yamahata.** " Magnetically actuated micropumps ". Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne , 2005.
- [5] **C. Magnet.** " Traitement non-linéaire de la tension de sortie d'éléments piézoélectriques :Application aux transformateurs piézoélectriques et au contrôle de vibration de cartes électroniques". Thèse de doctorat , Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006.
- [6] **M. Bah.** " Synthèse et propriétés fonctionnelles de céramiques et monocristaux piézoélectriques sans plomb (K,Na)NbO₃ ". Thèse de doctorat , Université François – Rabelais de Tours, 2014.
- [7] **Z. Sadoune.** " Modélisation et simulation des matériaux composites Piézoélectriques Cas du SiO₂ ". Thèse de doctorat, Université Mohammed V Faculté des Sciences Rabat, 2013.
- [8] **A.Parent.** "Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des microgyromètres vibrants ". Thèse de doctorat, Faculté des Sciences d'Orsay – Université de Paris-Sud, 2008.
- [9] **J. F. Lopez,** " Modeling and optimization of ultrasonic linear motors ", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- [10] **R. Lefevre** " Conception et réalisation d'une micropompe intelligente : applications dans le domaine biomédical ". Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.

- [11] **Y.H.Mu, N.P. Hung, K.A.Ngoi** . " Optimisation design of a piezoelectric micropump", *Int.Adv. Manuf. Technol* , vol 15 , pp. 573–576, 1999.
- [12] **D.J. Laser, J.G. Santiago, J. Micromech** . " A review of pumps " , *Journal Of Micromechanics and Microengineering* , Stanford University USA, vol 14, pp 35-64, 2004.
- [13] **L. Guol , W. Yan¹, Y. Xu¹,Y. Chen¹**. " Valveless Piezoelectric Micropump of Parallel Double Chambers", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol 13*, pp. 771-776, 2012.
- [14] **A. Bedrane**. " Etude De L'actionnement Électrostatique D'une Membrane En Silicium-Contrôle Du Volume Injecté Par Une Micro Pompe ", *Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaïd - Tlemcen*, 2013.
- [15] **C. Lotto, M. Gijs, C. Yamahata**. " Conception D'une Micropompe Utilisant Le Principe Des Valves Dynamiques Et Réalisation D'un Prototypé Bon Marché Adapté Aux Applications Biochimiques De Types « Lab-On-A-Chip » ", *Laboratoire de Microsystèmes (EPLF.LMIS2), Lausanne*, 2003.
- [16] **K. Podder, P. Samajdar , D. Mallick , A. Bhattacharyya**. " Design, Simulation and Study of Micro-pump, Micro-valve and Micro-needle for Biomedical Applications ", *Proceedings of The COMSOL Conference In Bangalore*, 2012.
- [17] **G.Yan-fang, L. Chun-bo**. " Structural Parameter Analysis And Experimental Study Of Micropumps With Saw-Tooth Microchannel ", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol 234, pp.195-205,2015.
- [18] **SC. Xingyuan Chen**. " Numerical Modeling of Fluid-Structure Interaction with Rheologically Complex Fluids ", *Thèse de doctorat, Université Technique de Darmstadt, Allemagne* , 2014.
- [19] **F. Meshkinfam**. " Design and Simulation of MEMS-Based Insulin MicroPump with Integrated Micro-Needle Array ". *Mémoire Master, Institut de Technologie, Université d'Ontario*,2015.
- [20] **E. Stemme, G. Stemme** . " , A Valveless Diffuser/Nozzle-Based Fluid Pump ", *Sensors and Actuators*, vol 39 , pp.159-167, 1993.
- [21] **T. Gerlach**. " Microdiffusers As Dynamic Passive Valves For Micropump Applications", *Sensors and Actuators*,vol 69, pp.181-191, 1998.

- [22] **L. Nayana, P. Manohar, S. Babu.** " Design And Simulation Of Valveless Piezoelectric Micropump ". Proceedings of The COMSOL Conference In Bangalore, 2012.
- [23] **L. Ait Moudid.** " Couplage Fluide Structure Pour La Simulation Numérique Des Écoulements Fluides Dans Une Conduite À Parois Rigides Ou Élastiques, En Présence D'obstacles Ou Non", Thèse de doctorat. Université d'Artois Faculté des Sciences Jean Perrin, 2007.
- [24] **T. Barkat, F. Z. Kadid, M. S. Aggoune and R. Abdessemed** " Modeling and Simulation of a Circular Valveless Micropump", Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics, Vol 12, No 2, pp. 95-105, 2018.
- [25] **B. Iverson, S. Garimella.** " Recent Advances In Microscale Pumping Technologies: A Review And Evaluation ", Microfluidics and Nanofluidics, Springer, pp.145-174 ,2008.
- [26] **B. Neto, A.M.N.Lima, F. Tejo, C. Preckerand , C. Moreira.** " Piezoelectric Buzzer Optimization for Micropumps ". Proceedings of The COMSOL Conference In Boston, 2012.
- [27] **C. Nyung Kim.** "Internal Pressure Characteristics And Performance Features Of The Piezoelectric Micropumps With The Diffuser/Nozzle And Electromagnetic Resistance ", Computers & Fluids An International Journal, Elsevier, Science Direct, vol 104, pp. 31-39, 2014.
- [28] **S. Singh, N. Kumar, D. George, A.K. Sen.** "Analytical Modeling, Simulations And Experimental Studies Of A Pzt Actuated Planar Valveless Pdms Micropump", Sensors and Actuators A: Physical Elsevier, Science Direct , vol 225, pp. 81-94,2015.
- [29] **F. Amirouche, Y. Zhou , T. Johnson.** " Current Micro Pump Technologies And Their Biomedical Applications ". Springer-Verlag, vol 5, pp.647-666, 2009.
- [30] **E. Boucher.** " Elaboration Et Caractérisation Des Céramiques Pzt Bi-Substituées Et Modélisation Non-Linéaire De Leur Comportement En Contrainte Et En Champ Électrique ". Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [31] **M. Esashi, S. Shoji, Nakano.** " A Normally close microvalve and micropump fabricated on a siliconwafer ". Journal IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Proceedings, an Investigation of Micro Structures, Sensors And Actuators, Machines and Robots, vol 20, pp.163-169, 1989.
- [32] **J. Abergel.** " Matériaux Piézoélectriques A Forte Déformation Pour L'actionnement Micro Systèmes ", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2006.

- [33] **P. Maréchal.** " Transducteur Mono-Éléments Pour L'imagerie Ultrasonore Haute Résolution Modélisation, Réalisation Et Caractérisation ", Thèse de doctorat. Université François Rabelais de Tours, 2004.
- [34] **A. Benayad.** " Matériaux Monocristallins A Forte Activité Piézoélectrique : Élaboration, Caractérisation Et Application ", Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [35] **M. Malhis.** " Contrôle Actif Modal Flou Des Rotors Flexibles Par Plan D'action Piezoelectrique ", Thèse de doctorat. Ecole Doctorale des Sciences pour L'ingénieur de Lyon , MEGA, 2002.
- [36] **N.T. Nguyen , S.T. Wereley.** " Fundamentals and Applications of Microfluidics", Artech House, 2006.
- [37] **Z. Sbiaa.** " Etude Et Réalisation D'une Micropompe Et De Microvalves Intégrées Tout Silicium ", Thèse de doctorat. Université de paul sabatier de Toulouse, 1997.
- [38] **R. Roopa, P. Navin Karanth, S. M. Kulkarni.** " Modeling of compliant flexure diaphragm for micropump", International Conference On Robotics And Smart Manufacturing , Elsevier, Science Direct, pp.1035-1039,2018.
- [39] **VanditaKhare, A. Singh.** " Study Of Mems Based Piezoelectricvalveless Micropumpfor Drug Delivery Applications, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering (IJARCSEE), Vol 3, pp 173-177, 2014.
- [40] **Frank M. White.** " Fluid Mechanics ". University of Rhode Island, 1999.
- [41] **S. Sutradhar.** " Optimization of Geomerty of Microfabricated Piezoelectric Actuator " ,International Journal of Engineering Trends and Technology (I.JETT),vol 4, pp. 580-585, 2013.