

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS DE LIQUIDE DANS UNE  
MICROPOMPE PIÉZOÉLECTRIQUE À DEUX CHAMBRES  
POUR UNE CONCEPTION AMÉLIORÉE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

BOUTAICHI ZAHIRA

DECEMBRE 2019



# BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue  
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

## **Mise en garde**

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## **Warning**

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Dituba Ngoma Guyh, pour son soutien, ses conseils, son encouragement, sa disponibilité et sa confiance à toutes les étapes de ce projet de maîtrise.

Je tiens à remercier M. François Godard, Hatem Mrad pour leurs commentaires, leurs disponibilités et leurs contributions à l'avancement de ma recherche. Je voudrais également remercier M. Nedil Mourad pour son soutien et son aide.

J'aimerais également remercier la direction de l'École de génie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue pour l'hospitalité, l'ouverture et la collaboration tout au long de ma recherche.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux amis et collègues du laboratoire Turbomachines : conception et modélisation en la personne de Messieurs Mbock Singock Thomas-Alphonse et Patrick Malonda qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de cette démarche scientifique.

Enfin, mes sincères remerciements à ma mère, mon père, mes frères et ma sœur, qui m'ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Merci à vous tous.

## RÉSUMÉ

Les micropompes piézoélectriques sont des actionneurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) utilisés pour véhiculer le fluide. Elles se réfèrent généralement aux pompes fabriquées à l'échelle microscopique [1]. La composition d'une micropompe piézoélectrique est une chambre de pompage reliée aux orifices d'entrée et de sortie, avec des microvalves unidirectionnelles pour réguler la direction d'écoulement du fluide. La chambre de pompage est fermée par un diaphragme et un actionneur piézoélectrique déposé sur le dessus. Lorsque la tension d'alimentation AC est appliquée, l'actionneur piézoélectrique se dilate et se rétrécit périodiquement, ce qui provoque la déflexion du diaphragme vers le haut et vers le bas. Lorsque le matériau piézoélectrique agit sur le diaphragme, la soupape de sortie s'ouvre pour permettre au fluide de sortir du système. Tandis que la vanne d'entrée est fermée, et vice-versa. Dans cette recherche, le but est de concevoir, de modéliser et de simuler une micropompe de manière plus approfondie afin de déterminer les paramètres qui peuvent influencer les performances du diaphragme, des valves et de l'écoulement de fluide dans chaque chambre. À cet effet, les équations d'écoulement de liquide, de continuité, de Navier-Stokes ont été appliquées sur la micropompe et résolues par le logiciel ANSYS-CFX. En outre, l'étude numérique de la déflexion de la membrane a nécessité un regroupement de l'ensemble des équations de piézoélectricité avec le domaine de structure statique, en résolvant celle-ci par ANSYS-ACT Piézo and MEMS, en variant l'épaisseur de membrane, le diamètre de piézo, le type de matériau, et la tension d'activation. En particulier, la forme des valves est très essentielle pour contrôler le débit afin d'augmenter la pression pour les écoulements de fluide. La validation de l'approche développée a été réalisée en comparant les résultats obtenus des simulations numériques avec ceux publiés dans la littérature.

**Mots clés :** micropompe, membrane, disque piézoélectrique, ANSYS-CFX, ANSYS-ACT Piézo and MEMS, microvalves.

## ABSTRACT

Piezoelectric micro-pumps are MEMS actuators (micro-electro-mechanical-systems) used to convey the fluid from one point to another point. Micro-pumps generally are manufactured by the micrometer scale [1]. A piezoelectric micro-pump is composed of a pump chamber connected to inlet and outlet ports fitted with one-way micro-valves for regulating the flow direction of the pumping. At the end of the pumping chamber, there is a diaphragm, as well as a piezoelectric actuator deposed on top. When AC electricity is applied, the piezoelectric actuator extends and shrinks periodically, making the diaphragm bend up and down. When the piezoelectric material acts on the diaphragm, the outlet valve opens to allow the fluid to exit the system while the inlet valve will be closed and vice versa. In this research, the goal is to design, model and simulate in greater details to Figure out the parameters that can influence the diaphragm performance of the valves and the fluid flow in each chamber. For this purpose, equations of liquid flow, continuity, Navier-Stokes have been applied to the micro-pump, which can be solved by the ANSYS-CFX software. On the other hand, the numerical study of the membrane deflection required a grouping of all the piezoelectricity equations by the static structure domain to solve it using the ANSYS ACT PIEZO and ACOUSTICS, by changing the following variables between each simulation: membrane thickness, piezo diameter, membrane material and activation voltage. In particular, the dimensions of the valves are very important to have a high flow rate and a higher pressure to convey the fluid. The approach developed was validated by comparing the results of the numerical simulations to those published in literature.

**Keywords:** micropump, membrane, piezoelectric disc, ANSYS-CFX, ANSYS-Piezo and MEMS, microvalves.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
RÉSUMÉ .....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	xii
CHAPITRE 1 .....	1
INTRODUCTION .....	1
1.1 Contexte et problématique .....	1
1.2 Objectifs.....	3
1.2.1 Objectifs généraux .....	3
1.2.2 Objectifs spécifiques .....	3
1.3 Méthodologie et approche proposée .....	4
1.3.1 Développer une approche généralisée pour la caractérisation et l'amélioration des performances des micropompes piézoélectriques.....	4
1.3.2 Simulations numériques.....	5
1.3.3 Validation du modèle numérique .....	5
CHAPITRE 2 .....	6
MICROPOMPE À MEMBRANE PZT .....	6
2.1 Composants mécaniques de la micropompe PZT.....	7

2.2	Actionneur piézoélectrique .....	10
2.2.1	Matériaux piézoélectriques .....	11
2.3	Microvalves.....	12
2.3.1	Microvalves actives avec un actionneur PZT .....	12
CHAPITRE 3 .....		14
REVUE DE LITTÉRATURE DE LA MICROPOMPE PZT.....		14
3.1	Analyse numérique des micropompes à membrane piézoélectrique .....	14
CHAPITRE 4.....		16
ÉQUATIONS DE LA MICROPOMPE À MEMBRANE PZT.....		16
4.1	Hypothèses.....	16
4.2	Équations d'écoulement des micropompes à membrane PZT.....	17
4.3	Équations de mouvement des valves .....	19
4.4	Équations de la déflexion de la membrane .....	23
4.5	Équations constitutives du disque piézoélectrique .....	24
CHAPITRE 5 .....		28
RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES DES ÉQUATIONS DE DÉPLACEMENT ET D'ÉCOULEMENT DE FLUIDE DANS LA MICROPOMPE PZT À DEUX CHAMBRES.....		28
5.1	Implantation de l'affinement du maillage.....	29
5.2	Discrétisation numérique .....	29
5.2.1	Résolution numérique de l'accouplement fluide solide (écoulement de fluide plus l'effet de déflexion de la membrane).....	29
5.2.2	Résolution numérique de l'accouplement électromécanique de disque piézoélectrique et la membrane .....	30

5.3	Résolution numérique des équations d'accouplement électromécanique (la membrane plus le disque piézoélectrique).....	32
5.4	Résolution numérique des équations accouplement fluide solide .....	34
5.5	Principal module de résolution de la micropompe PZT à une chambre sur ANSYS .....	35
5.6	Principal module de résolution de la micropompe à deux chambres sur ANSYS ..	35
5.7	Réalisation de l'étape I: modélisation de la membrane PZT .....	37
5.7.1	Géométrie de la membrane à actionneur PZT.....	37
5.7.2	Module de maillage de la membrane à actionneur piézoélectrique .....	37
5.7.3	Simulations numériques sur structure statique Piézo and MEMS de la membrane et le disque piézoélectrique.....	39
5.7.4	Module Piézo and MEMS-SOLVER de la membrane .....	40
5.8	Réalisation de l'étape II: Modélisation numérique d'une micropompe PZT à une chambre.....	41
5.8.1	Conception de la micropompe PZT à une seule chambre.....	41
5.8.2	Module de maillage de la micropompe PZT à une chambre .....	42
5.8.3	Simulations numériques sur ANSYS-CFX à une chambre.....	44
5.8.4	Module CFX-SOLVER de la micropompe à une chambre .....	44
5.9	Réalisation de l'étape III: Modélisation numérique de la micropompe à deux chambres .....	45
5.9.1	Conception de la micropompe à deux chambres.....	45
5.9.2	Maillage de la micropompe à deux chambres.....	46
5.9.3	Simulations numériques de la micropompe à deux chambres sur ANSYS-CFX .....	47



5.9.4	Module CFX-SOLVER de la micropompe à deux chambres.....	47
CHAPITRE 6	.....	48
ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DES MICROPOMPES À MEMBRANE PZT	.....	48
6.1	Conception de la membrane PZT .....	48
6.2	Étude paramétrique de la membrane PZT .....	51
6.2.1	Définition des constantes de la piézoélectricité .....	51
6.2.2	Paramètres des simulations de la membrane PZT.....	53
6.3	Conception d'une micropompe PZT pour une seule chambre à deux chambres .....	54
6.4	Étude paramétrique de la micropompe PZT à deux chambres .....	58
CHAPITRE 7	.....	61
RÉSULTATS ET DISCUSSION	.....	61
7.1	Simulations numériques de la membrane .....	63
7.2	Déflexion maximale de la membrane sous une tension appliquée variable .	63
7.2.1	Effet de la tension électrique, du rapport de rayon sur la déflexion de la membrane PZT .....	64
7.2.2	Effet de la tension électrique et du rapport de rayon sur la déflexion de la membrane.....	71
7.2.3	Effet de la tension électrique et du rapport de rayon sur la déflexion de la membrane PZT .....	78
7.3	Effet de la tension électrique avec différentes épaisseurs pour un rapport de rayon constant sur la déflexion de la membrane PZT.....	85
7.4	Effet du débit volumique et de l'angle des microvalves sur la variation de pression de la micropompe PZT .....	87

7.5	Effet du débit volumique sur la différence de pression pour une micropompe PZT à une chambre et avec deux chambres.....	90
7.6	Effet du débit volumique et de l'angle des microvalves sur la puissance de la micropompe PZT a une chambre.....	93
7.7	Effet du débit volumique à un angle de 20° des microvalves sur la puissance de la micropompe à une ou deux chambres PZT.....	94
CHAPITRE 8.....		95
VALIDATION DES RÉSULTATS.....		95
8.1	Comparaison des résultats de la déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique, des épaisseurs de la membrane et du disque piézoélectrique, et du rapport de rayon avec la référence [9].....	96
8.2	Comparaison des résultats d'écoulement de fluide d'une micropompe à une seule chambre.....	99
CHAPITRE 9.....		101
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		101
RÉFÉRENCES.....		105

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 3.1 : Différents principes de recherche de la micropompe PZT.....	15
Tableau 5.1: Variation du maillage de la membrane PZT .....	37
Tableau 5.2: Variation du maillage de la micropompe a une seule chambre .....	43
Tableau 5.3: Variation du maillage de la micropompe multichambre.....	46
Tableau 6.1 : Paramètres d’opération et de conception de la membrane PZT.....	49
Tableau 6.2 : Constantes des matériaux de la membrane PZT .....	49
Tableau 6.3 : Paramètres de la chambre de la micropompe.....	55
Tableau 6.4 : Paramètres de conception de la valve d’entrée .....	56
Tableau 6.5: Paramètres de la valve de sortie .....	57
Tableau 6.6: Paramètres de conception de la micropompe à deux chambres .....	58
Tableau 6.7: Paramètres de simulation numérique de la micropompe PZT .....	59
Tableau 6.8: Constantes de matériau de la micropompe PZT .....	59
Tableau 7. 1: Paramètres dimensionnels.....	61
Tableau 7.2 : Paramètres opérationnels .....	62
Tableau 7.3 : Constantes des matériaux.....	62
Tableau 7.4: Coefficients de détermination et droite de régression des trois Figures 7.1 à 7.3 .....	65
Tableau 7.5: Coefficients de détermination et droite de régression des trois Figures 7.7 à 7.9.....	71
Tableau 7.6: Coefficients de détermination et droite de régression des trois Figures 7.12 à 7.13.....	78

## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 2.1 : Principe du fonctionnement d'une micropompe piézoélectrique .....	7
Figure 2.2 : Différents composants de la micropompe à membrane PZT .....	8
Figure 2.3 : Schéma simplifié de la micropompe PZT .....	9
Figure 2.4 : Déflexion de la membrane.....	9
Figure 2.5 : Différents états du disque PZT .....	11
Figure 2.6 : Schéma d'une microvalve PZT .....	13
Figure 4.1 : Paramètres de la micropompe PZT [23].....	17
Figure 4.3: Actionnement d'un disque PZT [29].....	24
Figure 5.1: Diagramme de résolution numérique de l'accouplement électromécanique (membrane-disque piézoélectrique).....	33
Figure 5.2 : Diagramme de résolution numérique de l'accouplement fluide solide ...	34
Figure 5.3 : Étapes de résolution d'une micropompe à actionneur PZT à une chambre .....	35
Figure 5.4: Étapes de résolution d'une micropompe à actionneur PZT à deux chambres .....	36
Figure 5.5: Modèle d'assemblage de la membrane à actionneur PZT.....	37
Figure 5.6: Module de maillage de la membrane à actionneur PZT.....	38
Figure 5.7: Module des simulations sur le code structurel statique MEMS et Piézo de la membrane à actionneur PZT .....	40
Figure 5.8: Variation de déplacement en fonction des paramètres dimensionnels de la membrane et de la tension électrique .....	41
Figure 5.9: Module d'assemblage de la micropompe PZT.....	42
Figure 5.10: Module de maillage de la micropompe PZT à une seule chambre.....	43

Figure 5.11: Module des simulations numériques sur ANSYS-CFX .....	44
Figure 5.12: Écoulement de fluide en fonction du débit volumique.....	45
Figure 5.13 : Module d'assemblage de la micropompe PZT à deux chambres .....	45
Figure 5.14: Module de maillage de la micropompe PZT à deux chambres .....	46
Figure 5.15: Module des simulations numériques sur ANSYS-CFX .....	47
Figure 5.16: Écoulement de fluide en fonction du débit volumique.....	47

## LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

### Alphabet latin

Symboles	Grandeur physique	Unité
$L_r$	Périm ètre mouille du canal	[m]
$f$	Coefficient de frottement	[-]
$A_0$	Section transversale des canaux	[m <sup>2</sup> ]
$A_1$	Section transversale de la gorge des éléments de diffusion/buse déflexion	[m <sup>2</sup> ]
$V_m$	Volume maximal de la chambre	[m <sup>3</sup> ]
$u$	Vecteur de la vitesse	[m/s]
$p$	Pression	[Pa]
$P_I$	Pression d'entrée	[Pa]
$P_E$	Pression de sortie	[Pa]
$F$	Forces externes	[N]
$G$	Limite élastique	[Pa]
$v$	Champ potentiel	[V]
$Q$	Débit volumétrique	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{entree}$	Debit d'entrée	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{sortie}$	Débit de sortie	[m <sup>3</sup> /s]
$\Delta p$	Variation de la pression	[Pa]
$P_{micropompe}$	Puissance de fonctionnement de la micropompe	[W]
$P_{actionneur}$	Puissance de l'actionneur électrique	[W]
$C$	Conductivité électrique	[S.m <sup>-1</sup> ]

$C_{\text{cont}}$	Coefficient de conductivité électrique en contraction du diffuseur	$[\text{S.m}^{-1}]$
$C_{\text{exp}}$	Coefficient de conductivité électrique en expansion du diffuseur	$[\text{S.m}^{-1}]$
$P_{\text{entree}}$	Pression d'entrée	$[\text{Pa}]$
YI	Module de rigidité en flexion	$[\text{Pa}]$
$P_{\text{sortie}}$	Pression de sortie	$[\text{Pa}]$
V	Volume créé par le déplacement de la membrane	$[\text{m}^3]$
M	Matrice de la masse	$[\text{kg}]$
K	Matrice de rigidité mécanique	$[\text{N/m}]$
e	Matrice de couplage piézoélectrique	$[\text{m.s}^{-1}]$
U	Vecteur potentiel de champ magnétique	$[\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}]$
P	Vecteur de la pression	$[\text{Pa}]$
L	Charge électrique appliquée	$[\text{N.C}^{-1}]$
$S_1$	Déformation relative	$[\text{m}]$
D	Densité de piézo	$[\text{kg.m}^{-3}]$
E	Champ électrique	$[\text{V/m}]$
$s^E$	Conformité mécanique	$[-]$
T	Matrice de contrainte	$[\text{Pa}]$
$C^E$	Matrice de rigidité de piézo	$[\text{kg.m}^{-1}.\text{S}^{-2}]$
Rm	Rayon de la membrane	$[\text{m}]$
Rp	Rayon du disque piézo	$[\text{m}]$
Em	Épaisseur de la membrane	$[\text{m}]$
Ep	Épaisseur du disque piézo	$[\text{m}]$
Ee	Épaisseur d'époxy	$[\text{m}]$
$M_z$	Moment interne de la flexion de la membrane	$[\text{N.m}]$
$y_p$	Module d'élasticité du disque piézoélectrique	$[\text{Pa}]$
$y_s$	Module d'élasticité de matériaux	$[\text{Pa}]$

$h$	Position de la membrane par rapport à l'axe neutre	[m]
$w$	Déplacement de la membrane	[m]
$e^t$	Constante de piézoélectrique reliée à la contrainte au champ électrique	[m/V]

### Alphabet grec

<b>Symboles</b>	<b>Grandeur physique</b>	<b>Unité</b>
$\varepsilon^s$	Matrice de permittivité électrique	[kg.m/S <sup>-4</sup> ]
$\eta$	Viscosité	[Pa.s]
$\varepsilon^T$	Permittivité électrique à contrainte constante	[kg.m/S <sup>-4</sup> ]
$\beta$	Rapport de la longueur de la conduite par rapport à la jonction aux éléments diffuseur/buse	[-]
$\zeta$	Coefficient de pression suivant la direction d'écoulement	[-]
$\sigma_x$	Contrainte normale selon x	[Pa]
$\rho$	Masse volumique	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$A_{col}$	Aire de la section plus mince du diffuseur	[m <sup>2</sup> ]
$\xi_{exp}$	Rapport d'expansion	[-]
$\xi_{cont}$	Rapport de contraction	[-]



# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

Le déplacement et le contrôle de débit dans des microsystèmes sont dus au développement croissant des mécanismes microscopiques. Les micropompes piézoélectriques (PZT) font partie de ces mécanismes qui servent à transporter et contrôler avec précision le débit de liquide [1]. Le choix de matériaux et la modification des paramètres clés de la micropompe PZT notamment, les diamètres des composants, l'angle des valves, et le nombre de chambres représentent toujours un défi pour les chercheurs. Dans ce chapitre, il s'agit d'examiner les méthodes antérieures utilisées pour étudier la fiabilité de la micropompe PZT avec de nouvelles approches [2, 3].

### 1.1 Contexte et problématique

La micropompe PZT joue un rôle important dans le transport, le mélange, la séparation et l'analyse de liquides dans des microsystèmes. Un nombre croissant d'applications fait intervenir des écoulements de liquide dans des microsystèmes par des micropompes afin de contrôler avec précision le débit de liquide, en particulier dans les industries biomédicales, énergétiques et minières [4-6].

Dans les travaux de recherche antérieurs sur les micropompes PZT, une seule chambre de la micropompe PZT a été étudiée [7, 8]. Le type de matériau n'a pas été pris en compte [9, 10], et le diamètre et l'épaisseur de la membrane ainsi que l'épaisseur et le diamètre du disque piézoélectrique n'ont pas été considérés pour développer le système d'écoulement. La plupart des recherches ont été basées sur l'augmentation de la tension

électrique pour avoir un volume de la chambre plus grand. Cette méthode explique une grande consommation de l'énergie électrique pour un système microscopique. De plus, l'effet de la forme des valves sur la perte de charge n'a pas été traité [9, 11, 12].

Faire une étude en prenant en considération les éléments mentionnés précédemment peut influencer les résultats des simulations pour avoir une micropompe plus performante. Dans cette recherche, il est question de modéliser et de simuler de manière plus approfondie les composants mobiles de la micropompe, entre autres, les valves, la membrane, le disque PZT et le nombre de chambres afin de déterminer les paramètres qui peuvent améliorer les performances de l'écoulement et de contrôle du liquide. À cet effet, les équations de continuité et de Navier-Stokes ont été appliquées sur la micropompe pour analyser et étudier les écoulements de fluide et ces équations ont été résolues par le logiciel ANSYS-CFX. D'autre part, l'étude de la déflexion de la membrane nécessite un regroupement de l'ensemble des équations de piézoélectricité avec le domaine de structure statique en résolvant celle-ci par ANSYS-ACT Piézo and MEMS en variant l'épaisseur de la membrane, le diamètre de disque piézoélectrique, le type de matériau et la tension d'activation.

Pour un fonctionnement stable et fiable de la micropompe piézoélectrique, il est indispensable de connaître les tensions d'actionnement de la structure de l'élément piézoélectrique et de la membrane. Il est donc nécessaire d'examiner davantage les effets des paramètres de la micropompe tels que le nombre de chambres, les dimensions géométrique de l'actionneur piézoélectrique et de la membrane, les matériaux qui sont plus malléables lorsqu'ils sont traversés par un courant électrique, et l'effet de changement de la forme et les dimensions des microvalves sur le comportement statique des micropompes piézoélectriques avec une variation des propriétés physiques de liquide et de substrat selon la tension de fonctionnement de l'élément piézoélectrique.

## **1.2 Objectifs**

Les objectifs de cette recherche sont de deux catégories : les objectifs généraux et les objectifs spécifiques.

### **1.2.1 Objectifs généraux**

- a.** Optimiser les paramètres de conception, de fabrication de la membrane et des microvalves de la micropompe PZT;
- b.** Réduire les coûts de fabrication des micropompes piézoélectriques en utilisant des matériaux plus économiques et plus disponibles;
- c.** Améliorer la durée de vie des micropompes à membrane PZT en concevant des microvalves qui résistent à la vibration de la membrane.

### **1.2.2 Objectifs spécifiques**

- a.** Étudier la déflexion de la membrane à l'aide de la méthode par structure statique à l'aide du logiciel ANSYS extension Piézo and MEMS, en variant à chaque fois le rapport de rayon, l'épaisseur de disque piézoélectrique et le matériau de la membrane;
- b.** Concevoir un modèle numérique de la micropompe piézoélectrique d'une seule chambre en tenant compte les paramètres de la membrane PZT à la phase a;
- c.** Développer le modèle de micropompe PZT à une chambre en variant les dimensions des microvalves et les paramètres d'écoulement de fluide;
- d.** Valider les modèles obtenus dans la phase c avec ceux publiés dans la littérature;
- e.** Concevoir des micropompes avec deux chambres en prenant en considération les phases c et d;

- f. Étudie les paramètres qui influencent l'écoulement de fluide dans une micropompe PZT à une chambre et avec deux chambres.

### **1.3 Méthodologie et approche proposée**

Pour atteindre les objectifs énoncés, les moyens à mettre en œuvre ont été basés sur des approches mathématiques et numériques, et ont été centrés sur les trois activités de recherche suivantes :

#### **1.3.1 Développer une approche généralisée pour la caractérisation et l'amélioration des performances des micropompes piézoélectriques**

Un modèle mathématique 3D d'écoulement laminaire de liquide newtonien incompressible dans une micropompe piézoélectrique à chambres multiples a été mis au point. Ce modèle est composé de valves, d'un actionneur piézoélectrique, de chambres de pompage et d'une membrane. Ces composants ont été modélisés mathématiquement puis assemblés pour obtenir une approche globale aux micropompes. Les équations de continuité, de Navier-Stokes, et de déflexion de la membrane (constante de Poisson, module d'élasticité, etc.) ont été appliquées. Le silicium, le titane et l'aluminium ont été considérés comme substrats. Les conditions et les paramètres suivants ont été pris en compte dans la modélisation : la vitesse au niveau des parois, la pression, la déflexion de la membrane et les propriétés physiques des liquides à 25 °C.

Des simulations numériques ont été réalisées avec le modèle réalisé à l'aide du logiciel ANSYS. En outre, une étude comparative et paramétrique approfondie a été effectuée en considérant les paramètres suivants : les dimensions de micropompe, le diamètre et l'épaisseur de l'élément PZT, les dimensions de la membrane, le nombre de chambres

de la micropompe, les caractéristiques de la membrane, la tension de fonctionnement et les matériaux des substrats silicium, titane et aluminium [9, 11-13].

### **1.3.2 Simulations numériques**

Des simulations numériques ont été réalisées à l'aide du modèle numérique d'une micropompe PZT à une chambre et à deux chambres par le logiciel ANSYS extension Piézo, MEMS et CFX pour étudier les paramètres influençant les performances et la fiabilité de la micropompe PZT.

### **1.3.3 Validation du modèle numérique**

Une validation a été accomplie en ramenant le modèle numérique développé aux conditions d'une micropompe PZT simple, puis dans les conditions d'une micropompe à chambres multiples. Les résultats des simulations numériques ont été comparés avec ceux publiés dans la littérature.

## CHAPITRE 2

### MICROPOMPE À MEMBRANE PZT

Le principe de fonctionnement de la micropompe est montré schématiquement à la Figure 2.1. Le système comprend des parties électriques et mécaniques. Les parties électriques fournissent la tension électrique et sont munies d'un détecteur de signal électrique et d'un contrôleur électronique. Les parties mécaniques comprennent la chambre de pompage, la membrane, l'actionneur piézoélectrique et les valves d'entrée et de sortie.

La chambre de pompage est fermée par les deux valves. L'ouverture et la fermeture des valves sont réalisées par le contrôleur électronique. Au-dessus de la chambre se situe une membrane à actionneur piézoélectrique. L'actionneur PZT est utilisé pour pousser et tirer le diaphragme. Lorsque l'actionneur PZT est sollicité en appliquant la tension de commande électrique à ses extrémités, il convertit l'énergie électrique en travail mécanique pour augmenter ou diminuer le volume de la chambre. Cela provoque la variation de pression dans la chambre pour le refoulement du liquide [14].

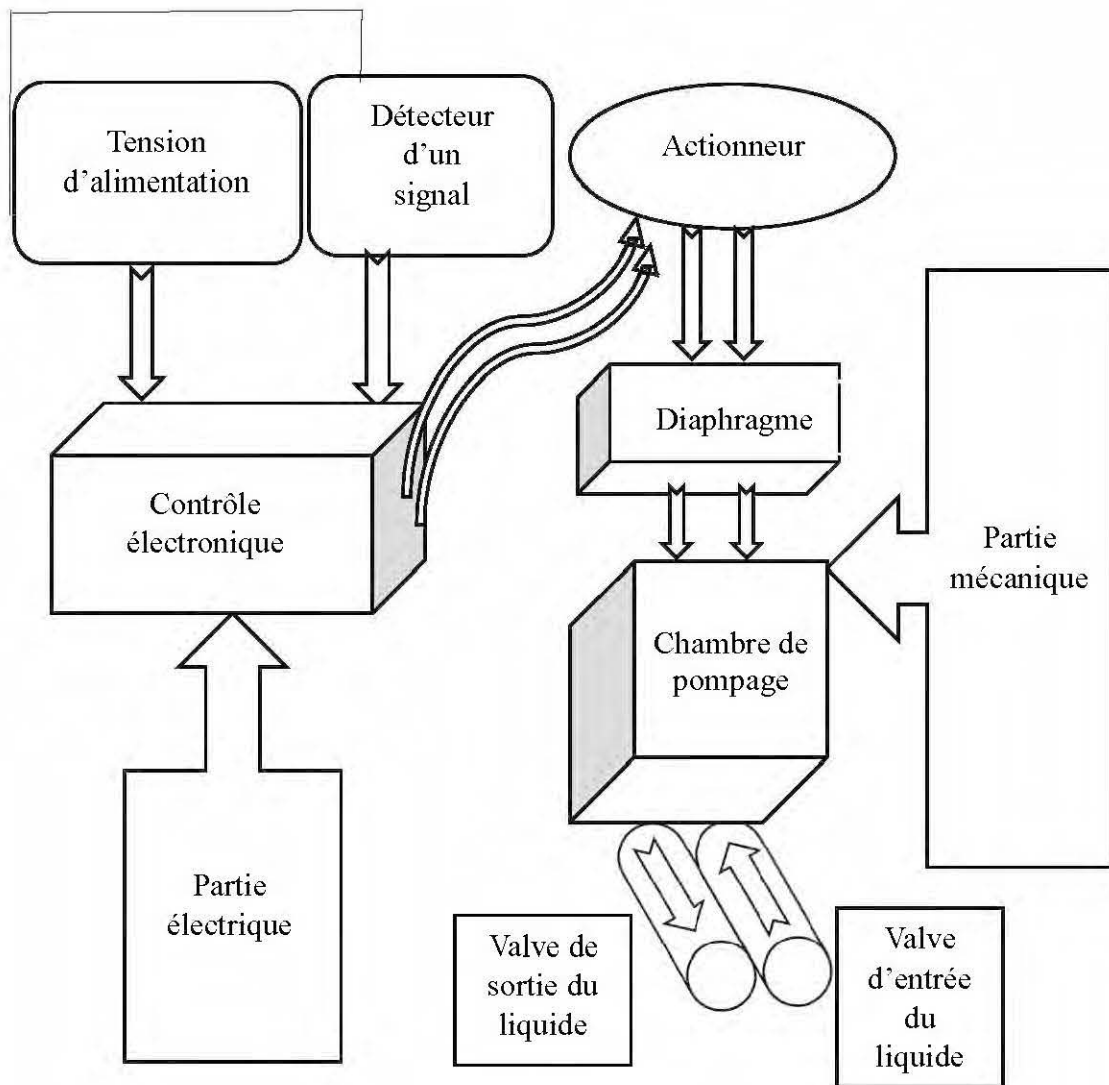


Figure 2.1 : Principe du fonctionnement d'une micropompe piézoélectrique [11]

## 2.1 Composants mécaniques de la micropompe PZT

La micropompe PZT est composée d'une chambre de pompage reliée aux orifices d'entrée et de sortie avec des microvalves unidirectionnelles afin de réguler la direction d'écoulement du pompage.

La chambre de pompage est scellée par un diaphragme et un actionneur piézoélectrique déposé par-dessus. Ce dernier, se dilate et se rétrécit périodiquement au moment où la tension d'alimentation AC est appliquée. La déflexion du diaphragme vers le haut et vers le bas est alors provoquée et la valve de sortie s'ouvre pour permettre au fluide de sortir du système tandis que la valve d'entrée sera fermée et vice-versa (Figure 2.2). [15].

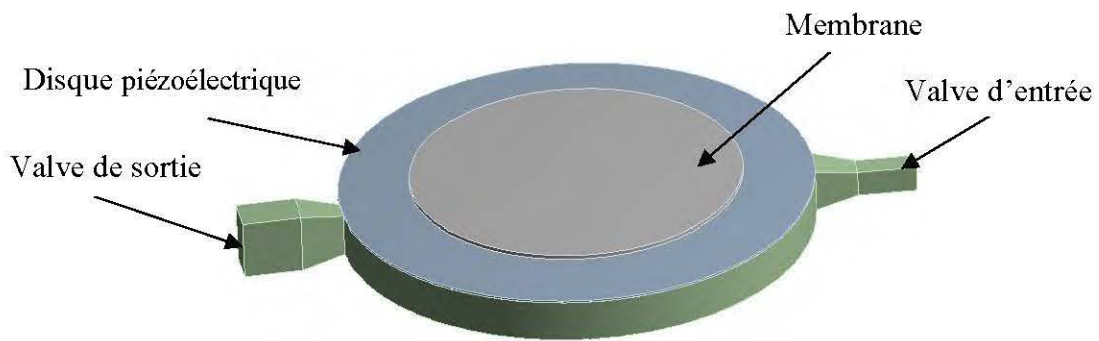


Figure 2.2 : Différents composants de la micropompe à membrane PZT

Les micropompes piézoélectriques sont du type dit « alternatif », elles utilisent le mouvement oscillatoire d'une membrane pour déplacer le fluide. Le diaphragme piézoélectrique réagit d'une façon de va-et-vient, comme un ressort de rappel. La membrane peut-être en verre de borosilicate, en silicium ou en aluminium, et actionnée extérieurement par un élément piézoélectrique. Ce dernier fonctionne avec un effet de piézoélectricité.

Les éléments diffuseurs sont des canaux fluidiques avec des constriction qui modifient la dynamique des fluides de telle sorte que la résistance fluidique est plus élevée dans un sens que dans l'autre, faisant en sorte que le débit est différent dans les deux directions pour la même pression appliquée (Figure 2.3).



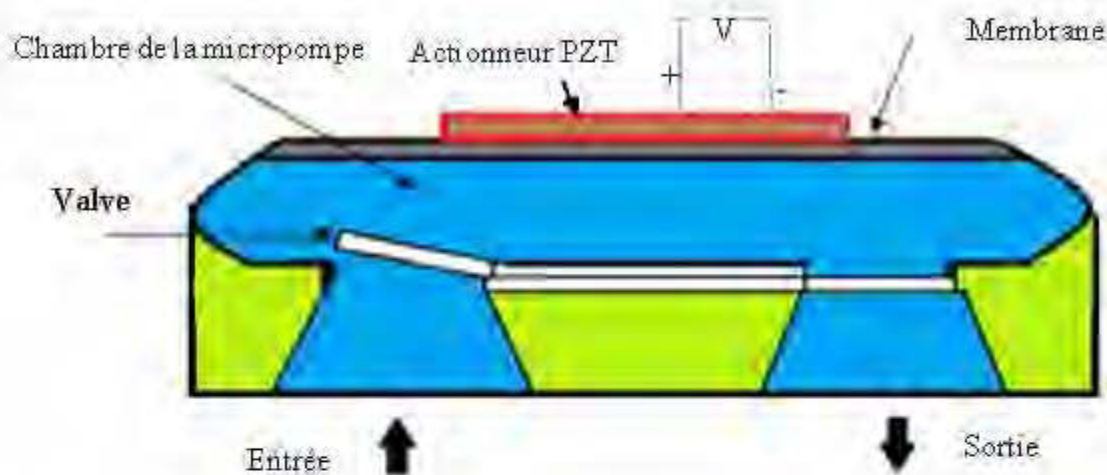


Figure 2.3: Schéma simplifié de la micropompe PZT [16]

Dans les autres micropompes à mouvement alternatif, un élément de buse/diffuseur se comporte pendant la moitié du cycle de la déflexion de la membrane comme un diffuseur, et pendant l'autre moitié comme une buse. Dans le concept de la micropompe à base de diffuseur, cet effet directionnel est à l'origine du pompage net dans un cycle oscillant parce que les orientations des deux éléments buse/diffuseur sont inversées par rapport à la chambre de pompage (Figure 2.4) [17, 18].

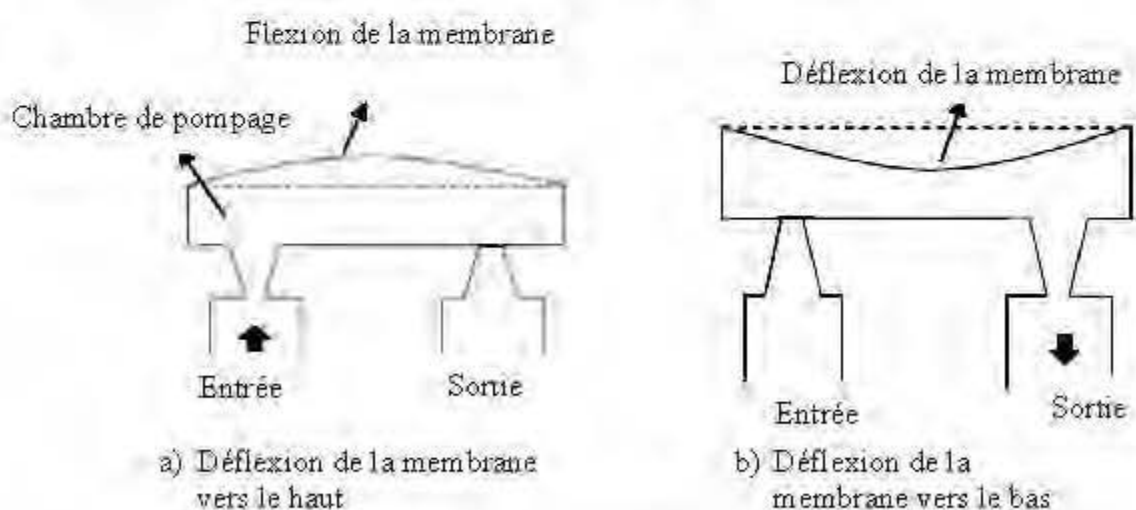


Figure 2.4 : Déflexion de la membrane [18]

## 2.2 Actionneur piézoélectrique

L'effet piézoélectrique a été adapté à une gamme impressionnante d'applications. Il est utilisé dans les applications de détection telles que les capteurs de force ou de déplacement. L'effet piézoélectrique inverse est utilisé dans les applications d'actionnement, comme dans les moteurs et les dispositifs qui contrôlent précisément le positionnement et la génération de signaux sonores et ultrasonores. L'actionneur piézoélectrique de céramiques à base d'oxydes métalliques et d'autres matériaux synthétiques ont permis aux concepteurs d'utiliser l'effet piézoélectrique et l'effet piézoélectrique inverse dans de nombreuses nouvelles applications. Ces matériaux sont généralement solides physiquement et chimiquement inertes, et ils sont relativement peu coûteux à fabriquer. La composition, la forme et les dimensions d'un élément en céramique piézoélectrique peuvent être adaptées pour répondre aux exigences d'un objectif spécifique. Les actionneurs de céramiques fabriquées à partir de formulations de zircone de plomb et de titanate de plomb présentent une plus grande sensibilité et des températures de fonctionnement plus élevées par rapport aux céramiques d'autres compositions [19].

La Figure 2.5 montre les différentes positions du disque piézoélectrique : a) état initial du disque PZT; b) état de l'aspiration de fluide lorsqu'on applique une tension électrique sur le disque PZT, ce qui provoque une déflexion de diaphragme vers le haut pour laisser le fluide passer; c) et d) sont des états de pompage lors de l'élimination de la tension [20].

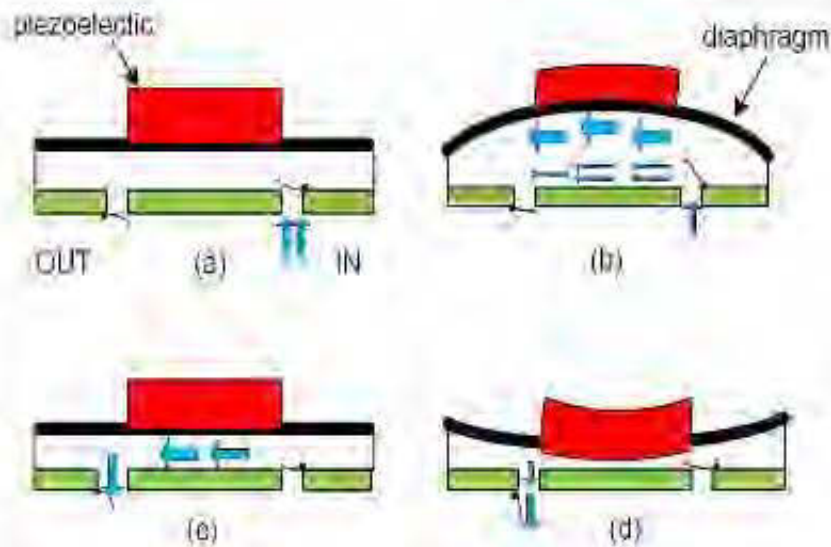


Figure 2.5 : Différents états du disque PZT [11]

### 2.2.1 Matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques permettent la transduction électromécanique. Ils génèrent des signaux électriques en réponse à un stress mécanique appliqué. À l'inverse, les piézoélectriques répondent également à l'application d'un potentiel électrique en changeant de forme. Par exemple, les transducteurs piézoélectriques sont utilisés pour générer des ondes acoustiques de hautes fréquences. Les matériaux piézoélectriques en vrac sont largement utilisés pour une gamme variée d'applications. Les dernières années ont connu une explosion dans le développement de nouveaux monocristaux piézoélectriques et piézoélectriques sans plomb, ce qui entraîne de grandes améliorations aux propriétés du matériau et de nouveaux domaines d'application. Les films minces et hétérostructures multicouches en piézoélectrique ont un grand potentiel pour les appareils à l'échelle micro et nanométrique en raison de la fonctionnalité supplémentaire fournie par l'électromécanique de la transduction associée à la capacité des micromachines en utilisant des outils de traitement standard.

Les progrès dans les matériaux piézoélectriques en vrac ont été rapidement incorporés dans les films minces à travers le développement de techniques de croissance améliorées. De plus, la technologie a connu une croissance significative de la capacité des dispositifs fonctionnels à la conception et à la micromécanique. En même temps, les fonderies commencent à fournir des services pour piézoélectriques [21].

### **2.3 Microvalves**

Les micropompes PZT doivent incorporer des microvalves pour contrôler le débit. Elles doivent être performantes, faciles à fabriquer, fiables et robustes. Les micropompes à membrane PZT dépendent fortement du mécanisme de microvalve sélectionné. Les valeurs de mérite pour une microvalve incluent la diodicité, qui peut être définie comme le rapport entre les pertes de charge directes et inverses. Les micropompes PZT actuelles utilisent différentes conceptions de microvalves de type actif pour le contrôle des fluides, qui sont commandées par un signal d'entrée électrique externe.

#### **2.3.1 Microvalves actives avec un actionneur PZT**

Dans une microvalve actives avec un actionneur PZT, l'élément mobile est actionné par une force externe et non par la différence de pression du fluide. Grâce à une meilleure contrôlabilité, les microvalves actives offrent des performances améliorées au détriment de la simplicité de fabrication. Les microvalves avec des actionneurs piézoélectriques, comme celle illustrée à la Figure 2.6, sont un exemple de microvalves actives. Les microvalves actives sont facilement contrôlables, de sorte qu'elles ont une meilleure réponse dynamique et une meilleure étanchéité. Ainsi, des caractéristiques d'écoulements améliorés peuvent être obtenues [22].

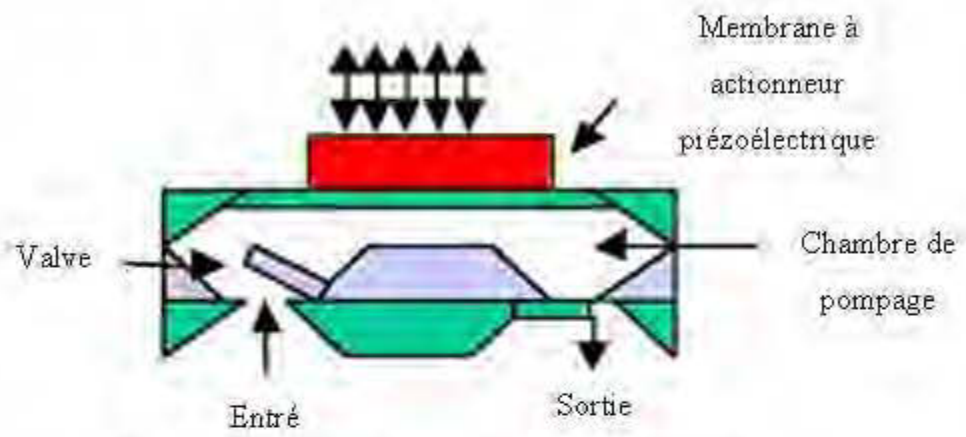


Figure 2.6 : Schéma d'une microvalve PZT [2]

## CHAPITRE 3

### REVUE DE LITTÉRATURE DE LA MICROPOMPE PZT

Dans cette recherche, il est question de présenter les principaux sujets de recherche et les diverses classifications de la micropompe à membrane PZT : l'étude de la déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique, l'analyse de débit volumique en fonction de la forme des microvalves, la pression de sortie en fonction du débit.

#### **3.1 Analyse numérique des micropompes à membrane piézoélectrique**

Comme tous les systèmes complexes, diverses classifications sont utilisées pour étudier et concevoir des micropompes PZT plus performantes en se basant sur les recherches antérieures. Les micropompes PZT sont classées en fonction de la manière dont le flux et la mise sous pression des fluides sont générés. Quelques exemples de différentes conceptions de la micropompe à membrane piézoélectrique ont été présentés dans cette section. La plupart des travaux de recherche ont indiqué que la capacité d'une micropompe PZT change avec l'augmentation de la tension électrique ou de la fréquence électrique [8, 19]. Cette conclusion peut suggérer qu'il n'existe aucune influence de la partie mécanique sur son la déflexion et la pression de sortie, peu importe le matériau utilisé, le volume de la chambre, les paramètres de la membrane et du disque piézoélectrique. Si l'actionnement du disque piézoélectrique a une tension supérieure au point de fonctionnement du système, le disque piézoélectrique peut sortir de son état de déformation élastique en déformation plastique [13, 23-25]. La forme des valves examinées dans la plupart des travaux de recherche était de forme

rectangulaire pour faciliter la conception [10], pour simplifier l'ouverture et la fermeture des valves et pour laisser passer un grand débit. Cette étude s'est concentrée sur une vision extérieure de la pièce, sans prendre en considération l'étude de la perte de charge à l'intérieur, la fatigue des valves ou les dimensions des valves [24-26]. D'autres auteurs ont étudié théoriquement la structure de la micropompe et le nombre de pièces de la micropompe sans faire des simulations numériques pour confirmer les résultats des équations [17, 20, 24-26]. Le Tableau 3.1 résume les différents principes de recherche sur la micropompe PZT [12].

Tableau 3.1 : Différents principes de recherche de la micropompe PZT

<b>Caractéristiques des micropompes pour chaque pays</b>	<b>HOLLANDE</b>	<b>ÉTATS-UNIS</b>	<b>GRANDE-BRETAGNE</b>
Débit maximal [ $\mu\text{l}/\text{min}$ ]	400	1800	1500
Pression maximale kPa	12,5	1	1
Dimension de la membrane [mm]	12×12×3	7×7	12×12×0,85

## CHAPITRE 4

### ÉQUATIONS DE LA MICROPOMPE À MEMBRANE PZT

Pour commencer, dans ce chapitre, il est important de définir les équations mathématiques et les applications pour résoudre le système d'écoulement de fluide, et aussi de connaître les paramètres qui influencent la performance de la micropompe PZT, ainsi que les contraintes et les hypothèses de chaque composant de cette pompe qui ont servi à leur solution [24].

#### 4.1 Hypothèses

- Le fluide est newtonien, incompressible.
- L'écoulement est laminaire.
- La température constante de 25 °C.
- La vitesse est considérée comme nulle au niveau des parois.
- La pression dans les chambres de pompage a été supposée variable en fonction de la position et de la vitesse des membranes.
- La membrane est en régime transitoire.
- La déformation de la membrane est produite uniquement dans la direction radiale.
- L'équation de la conservation d'énergie n'est pas prise en compte : la viscosité est indépendante de la température.



## 4.2 Équations d'écoulement des micropompes à membrane PZT

L'analyse commence par un modèle unidimensionnel pour chaque micropompe en appliquant les équations de continuité et de Navier-Stokes pour des écoulements incompressibles. Les canaux ont des sections transversales uniformes  $A_0$  et  $A_1$ , comme l'indique la Figure 4.1.

Pour simplifier le calcul, il est supposé que les deux chambres sont des cavités cylindriques de rayon  $R$  identiques. Les surfaces sont forcées verticalement avec une amplitude  $X_d$  et la fréquence angulaire  $\omega$ . La zone de la gorge des éléments diffuseur/buse est  $A_1$  et  $A_0$  respectivement. La pompe surmonte une pression de sortie de  $P_E$  et une pression d'entrée de  $P_1$  (Figure 4.1) [23].

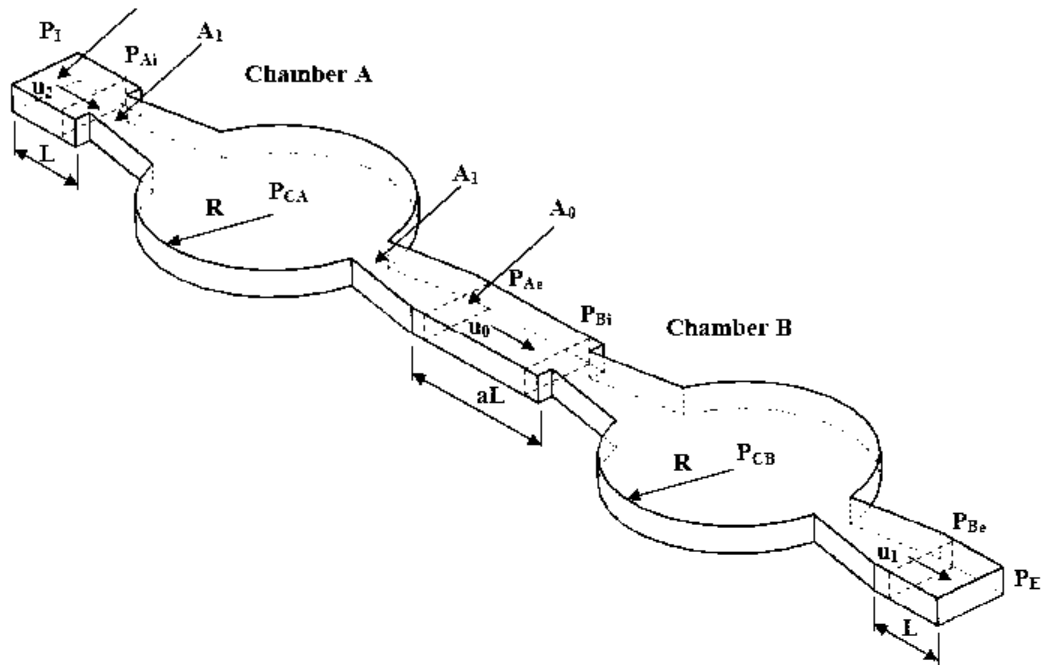


Figure 4.1 : Paramètres de la micropompe PZT [23]

Les équations de l'écoulement de fluide dans les deux chambres en série sont déterminées comme suit [23] :

$$\rho \frac{du_{Ai}}{dt} = -\frac{(p_{Ai}-p_s)}{\beta L} - \frac{1}{2} \rho f u_{Ai} |u_{Ai}| \frac{L_r}{A_0} \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{du_{Ae}}{dt} = -\frac{(p_f-p_{Ae})}{\beta L} - \frac{1}{2} \rho f u_{Ae} |u_{Ae}| \frac{L_r}{A_0} \quad (4.2)$$

où  $A_0$  est la section transversale des canaux,  $A_1$  est la section transversale de la gorge du diffuseur,  $\beta$  est le rapport de la longueur de la conduite par rapport à la jonction aux éléments diffuseur/buse et  $L_r$  est le périmètre mouillé du canal. Les contraintes visqueuses sur les parois des canaux sont paramétrées  $f \rho u^2 / 2$  [8], où  $f$  est le coefficient de frottement qui est supposé constant.

À partir des équations 4.1 et 4.2, les différences de pressions dans les chambres A et B sont déterminées comme suit [23] :

$$p_{CA} - p_{Ae} = \frac{1}{2} \zeta (u_{Ae}) \rho u_{Ae} |u_{Ae}| \left[ \frac{A_0}{A_1} \right]^2 \quad (4.3)$$

$$p_{ci} - p_{CA} = \frac{1}{2} \zeta (u_{Ai}) \rho u_{Ai} |u_{Ai}| \left[ \frac{A_0}{A_1} \right]^2 \quad (4.4)$$

où  $p_{CA}$  est la pression dans la chambre A,  $p_{Ae}$  est la pression d'entrée à la chambre A,  $\zeta$  est le coefficient de pression suivant la direction de l'écoulement à travers les éléments diffuseur/buse,  $p_{ci}$  est la pression dans la chambre B et  $u$  est la vitesse d'écoulement.

En se basant sur les équations de 4.1 à 4.4, l'écoulement du fluide et la vitesse d'écoulement dans les deux chambres assemblées en série (Figure 4.1) deviennent [23] :

$$\rho \frac{d(u_{Ae} - u_{Ai})}{dt} = -\frac{(P_f - P_s)}{\beta L} - \frac{\rho \zeta (u_{Ae}) u_{Ae} |u_{Ae}| \left[ \frac{A_0}{A_1} \right]^2}{2\beta L} \quad (4.5)$$

$$-\frac{1}{2} \rho f \frac{L}{A_0} (u_{Ae} |u_{Ae}| + u_{Ai} |u_{Ai}|) - \frac{\rho \zeta (u_{Ai}) u_{Ai} |u_{Ai}| \left[ \frac{A_0}{A_1} \right]^2}{2\beta L}$$

D'après l'équation de conservation de la masse pour les écoulements incompressibles, la différence de la vitesse dans la chambre A de la micropompe doit être égale au taux de diminution de volume de la chambre lors de l'actionnement. Alors, le volume est égal à :

$$A_0 (u_{Ae} - u_{Ai}) = -\frac{dV_c}{Dt} = V_m \omega \cos \omega t \quad (4.6)$$

où  $V_m$  est l'amplitude de l'oscillation du volume.

À partir des équations de l'écoulement de fluide (4.1 à 4.3), la puissance de la micropompe PZT devient [11]:

$$P = Q \times \Delta p \quad (4.7)$$

où  $Q$  est le débit volumique et  $\Delta p$  est la variation de la pression.

### 4.3 Équations de mouvement des valves

Le débit de la micropompe se définit comme suit [27]:

$$Q = C \sqrt{\Delta p} \quad (4.8)$$

où  $C$  est la conductivité électrique et  $\Delta p$  est la variation de la pression.

Pour calculer le débit, il faut définir les coefficients de conductivité exprimés par :

$$C_{\text{exp}} = \frac{A_{\text{col}}}{\sqrt{\frac{1}{2} \xi_{\text{exp}} \rho}} \quad (4.9)$$

$$C_{\text{cont}} = \frac{A_{\text{col}}}{\sqrt{\frac{1}{2} \xi_{\text{cont}} \rho}} \quad (4.10)$$

où  $A_{\text{col}}$  est l'aire de la section plus mince du diffuseur,  $C_{\text{exp}}$  est le coefficient de conductivité en expansion du diffuseur,  $C_{\text{cont}}$  est le coefficient de conductivité en contraction du diffuseur,  $\xi_{\text{cont}} = \frac{\nabla V}{V_m}$  est le rapport de contraction et  $\xi_{\text{exp}}$  le rapport d'expansion.

Les équations des pressions à l'entrée et à la sortie [15] sont formulées en se basant sur les équations 4.1 à 4.3 :

$$\left( -\frac{Q_{\text{entree}}}{C_{\text{cont}}} \right)^2 = p - p_i \quad \text{si} \quad p_i - p < 0 \quad (4.11)$$

$$\left( \frac{Q_{\text{entree}}}{C_{\text{exp}}} \right)^2 = p_i - p \quad \text{si} \quad p_i - p > 0 \quad (4.12)$$

$$\left( \frac{Q_{\text{sortie}}}{C_{\text{exp}}} \right)^2 = p_i - p_E \quad \text{si} \quad p_i - p_E > 0 \quad (4.13)$$

$$\left( -\frac{Q_{\text{sortie}}}{C_{\text{cont}}} \right)^2 = p_E - p_i \quad \text{si} \quad p_i - p_E < 0 \quad (4.14)$$

où  $Q_{entree}$  est le débit d'entrée,  $Q_{sortie}$  est le débit de sortie,  $p_I$  est la pression d'entrée,  $P_E$  est la pression de sortie,  $P$  référant aux pressions à l'intérieur des chambres de la micropompe PZT.

Le volume déplacé par période de temps peut se déduire avec la différence du débit d'entrée et de sortie. Alors, dans le modèle Ullman [15], il est considéré comme hypothèse que le déplacement de la membrane est sinusoïdal avec une amplitude maximale  $V_m$ . Le volume est donc représenté par l'équation suivante [23]:

$$V = V_m \left[ 1 - \cos(\omega t) \right] \quad (4.15)$$

où  $V$  est le volume créé par le déplacement de la membrane sans considérer le volume initial.

Le débit final de la micropompe PZT en fonction du temps peut s'exprimer de cette manière :

$$\frac{dV}{dt} = V_m \omega \sin(\omega t) \quad (4.16)$$

Donc, comme mentionné au paragraphe précédent, la variation du volume avec le temps correspond à la différence du débit d'entrée et de sortie :

$$\frac{dV}{dt} = Q_{sortie} - Q_{entree} = V_m \omega \sin(\omega t) \quad (4.17)$$

D'après les équations 4.4 et 4.9, les équations pour chaque phase d'une période de pulsation sont déterminées comme suit :

PHASE 1 : Pour  $p > p_E > p_I$

$$Q_{sortie} = \frac{\left(\frac{C_{ext}}{C_{cont}}\right)^2 V_m w \sin(wt) - C_{exp} \sqrt{\left[\left(\frac{C_{ext}}{C_{cont}}\right) - 1\right] \Delta P + \left(\frac{V_m w \sin(wt)}{C_{cont}}\right)^2}}{\left[\left(\frac{C_{ext}}{C_{cont}}\right) - 1\right]} \quad (4.18)$$

PHASE 2 : Pour  $p < p_I < p_E$

$$Q_{sortie} = \frac{-V_m w \sin(wt) - C_{exp} \sqrt{\left[\left(\frac{C_{ext}}{C_{cont}}\right) - 1\right] \Delta P + \left(\frac{V_m w \sin(wt)}{C_{cont}}\right)^2}}{\left[\left(\frac{C_{ext}}{C_{cont}}\right) - 1\right]} \quad (4.19)$$

PHASE 3 : Pour  $p_I < p < p_E$

$$Q_{sortie} = \frac{1}{2} V_m w \sin(wt) - \sqrt{\frac{1}{2} C_{cont}^2 \Delta P - \frac{1}{4} (V_m w \sin(wt))^2} \quad (4.20)$$

Ensuite, le débit moyen est déduit d'après les trois phases de mouvement des valves en intégrant la période de temps :

$$t_1 = \frac{1}{w} \sin^{-1} \left( \frac{C_{cont} \sqrt{\Delta P}}{V_0 w} \right) \quad (4.21)$$

$$t_2 = \frac{1}{w} \left[ \pi - \sin^{-1} \left( \frac{C_{cont} \sqrt{\Delta P}}{V_0 w} \right) \right] \quad (4.22)$$

$$t_3 = \frac{1}{w} \left[ \pi + \sin^{-1} \left( \frac{C_{cont} \sqrt{\Delta P}}{V_0 w} \right) \right] \quad (4.23)$$

$$t_4 = \frac{1}{w} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{C_{cont} \sqrt{\Delta P}}{V_0 w} \right) \right] \quad (4.24)$$

Le débit moyen est donc :

$$\bar{Q}_{sortie} = \frac{1}{\tau} \left[ \int_{t_1}^{t_2} Q_{sortie} dt + \int_{t_2}^{t_3} Q_{sortie} dt + \int_{t_3}^{t_4} Q_{sortie} dt + \int_{t_4}^{t_1} Q_{sortie} dt \right] \quad (4.25)$$

#### 4.4 Équations de la déflexion de la membrane

La déflexion de la membrane en fonction de la contrainte  $\sigma_x(x,y,t)$  est exprimée par [12, 22] :

$$\sigma_x(x,y,t) = \begin{cases} -y_s \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} y \\ -y_p \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} y - y_p d_{31} E(x,y,t) [U(x-x_1) - U(x-x_2)] \end{cases} \text{ si } \begin{cases} h_a \leq y \leq h_b \\ h_b \leq y \leq h \end{cases} \quad (4.26)$$

où  $w(x,t)$  est le déplacement transversal de la membrane,  $[U(x-x_1) - U(x-x_2)]$  est la fonction échelon qui délimite la surface de l'électrode,  $E_y$  est le champ électrique,  $R_r$  est le rapport du rayon,  $h_b$  est la position de l'interface piézo/substrat de la membrane par rapport à l'axe neutre,  $h_a$  est la position de la surface inférieure de la membrane par rapport à l'axe neutre,  $d_{31}$  est la constante piézoélectrique,  $y_s$  est le module d'élasticité du substrat et  $y_p$  est le module d'élasticité du matériau piézoélectrique.

Le moment interne de la déflexion de la membrane en fonction de la contrainte est donné par:

$$\begin{aligned} M_z(x,t) &= -R_r \int_{h_a}^{h_c} \sigma_x(x,y,t) y dy \\ &= YI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + r Y_p d_{31} [U(x-x_1) - U(x-x_2)] \int_{h_b}^{h_c} E(x,y,t) y dy \end{aligned} \quad (4.27)$$

où  $YI$  est le module de rigidité en flexion. Il s'exprime comme suit :

$$YI = \frac{r}{3} [Y_s (h_b^3 - h_a^3) + Y_p (h_c^3 - h_b^3)] \quad (4.28)$$

où  $h_c$  est la position de la surface supérieure de la membrane par rapport à l'axe neutre.

#### 4.5 Équations constitutives du disque piézoélectrique

Il est à considérer que les transducteurs piézoélectriques sont exploités à un faible niveau de champ électrique et sous de faibles contraintes mécaniques. Quand une céramique piézoélectrique est polarisée mécaniquement, elle produit une charge électrique sur la surface du matériau. Cette propriété est appelée « effet piézoélectrique direct » et est quantifiée par [12, 19, 25, 28] :

$$S = s^E T + d^T E \quad (4.29)$$

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (4.30)$$

où  $S$  est la déformation relative,  $\epsilon^T$  est la permittivité électrique à contrainte constante,  $D$  est la densité de la charge,  $E$  est le champ électrique,  $s^E$  est la conformité mécanique,  $T$  est la contrainte mécanique,  $d^T$  est la constante piézoélectrique reliée à la déformation relative au champ électrique et  $d^t$  est la constante piézoélectrique reliée à la déformation relative au champ électrique transposé (Figure 4.2)



Figure 4.2: Actionnement d'un disque PZT [29]



Les équations 4.31 et 4.32 montrent la relation entre les propriétés mécaniques et électriques de ces matériaux. La première équation indique qu'une partie d'un champ électrique appliqué au matériau est convertie en contrainte mécanique. De même, la deuxième équation décrit la partie d'une contrainte mécanique appliquée à la matière qui est convertie en champ électrique. Il est à souligner qu'en l'absence de champ électrique  $E$ , la deuxième équation devient  $S = s^E \overset{\perp}{T}$ . De même, en l'absence de contrainte mécanique, la première équation  $D = \varepsilon^T \overset{\perp}{E}$  représente la loi de Hooke, elle décrit le comportement électrique du matériau. De plus, pour la plupart des matériaux,  $d_1$  et  $d_2$  sont presque égaux, l'équation 4.22 devient [12] :

$$S = s^E (1 - K^2) \overset{\perp}{T} + \frac{d}{\varepsilon^T} \overset{\perp}{D} \quad (4.31)$$

$K$  est déterminé par :

$$K^2 = \frac{d^2}{s^E \varepsilon^T} \quad (4.32)$$

où  $K$  est le coefficient de couplage électromécanique. Il détermine aussi un indicateur de l'efficacité avec laquelle un matériau piézoélectrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, ou l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans le cas où le déplacement électrique est égal à zéro, l'équation devient :

$$\overset{\perp}{S} = s^E (1 - K^2) \overset{\perp}{T} \quad (4.33)$$

La contrainte est toujours proportionnelle au coefficient de couplage. Lorsque  $K$  est égal à zéro, l'équation correspond tout simplement à la loi de Hooke. Cela signifie que toute l'énergie du matériau est de l'énergie de déformation élastique.

Cette expression de  $K$  a été obtenue en considérant que le système n'est pas connecté à un circuit.

Les équations 4.29 et 4.30 sont des équations des propriétés des céramiques piézoélectriques. Elles contiennent trois paramètres de piézoélectricité sous forme de tenseurs : le tenseur de déformation, le tenseur de piézoélectricité lié aux déformations du champ électrique et le tenseur de la permittivité électrique à contrainte constante. Les trois tenseurs sont représentés par des matrices :

$$S^E = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{13} \\ 0 & 0 & d_{13} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$[\varepsilon^T] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

La constante de déformation piézoélectrique  $d$  est définie comme le rapport entre l'effort libre et le champ électrique appliqué. Les indices  $i$  et  $j$  impliquent que le champ appliqué à la charge est collecté dans la direction  $i$  pour un déplacement dans la direction  $j$ .

## CHAPITRE 5

### RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES DES ÉQUATIONS DE DÉPLACEMENT ET D'ÉCOULEMENT DE FLUIDE DANS LA MICROPOMPE PZT À DEUX CHAMBRES

Ce chapitre précise les deux accouplements principaux dans les résolutions numériques des équations du chapitre 4 de la micropompe PZT [13] : il existe un accouplement électromécanique entre l'actionneur piézoélectrique et la membrane, et un accouplement fluide solide entre le fluide et l'ensemble de l'actionneur piézoélectrique. Deux méthodes sont requises pour résoudre ces équations. La première est une méthode permettant de résoudre les équations d'écoulements de fluide avec des volumes finis qui sont discrétisés pour obtenir la pression et la puissance dans chaque nœud. La deuxième est une méthode combinant la statique des structures et les fonctions d'analyse électrique du module Piézo and MEMS. Ce type de méthode permet de résoudre les équations de l'accouplement électromécanique pour définir la déflexion de la membrane à chaque valeur de la tension pour chaque changement des paramètres. Quand une alternance de la tension est imposée sur le disque piézoélectrique, la déformation de la structure est générée en raison de la conversion électromécanique (effet piézoélectrique inverse). Dans ce travail, un modèle de simulation complet de la micropompe est construit, comprenant les éléments diffuseur/buse et l'actionneur piézoélectrique [14]. On suppose que la contrainte résiduelle introduite par le processus de fabrication est zéro, que la tension d'actionnement est sinusoïdale de 20 V à 100 V, que les flancs du disque piézoélectrique sont serrés et que les parois latérales sont libérées.

## 5.1 Implantation de l'affinement du maillage

La défaillance du maillage est due à la très petite géométrie des composants de la micropompe PZT. Dans ces situations, la taille du maillage ne peut tout simplement pas contenir un élément dans cet espace, donc le maillage échoue. L'astuce consiste à déterminer où se trouve cette géométrie gênante dans la micropompe PZT, à l'aide de logiciels ANSYS CFX et Piezo and MEMS. Une fois que le système localise les zones de problèmes potentiels, la combinaison de l'ajustement de la taille du maillage et du nettoyage de la géométrie résolvent les problèmes de maillage pour une seule chambre et deux chambres.

## 5.2 Discrétisation numérique

### 5.2.1 Résolution numérique de l'accouplement fluide solide (écoulement de fluide plus l'effet de déflexion de la membrane)

La membrane est mobile. Elle exerce donc une pression sur le fluide. De même, le fluide exerce une force sur la structure de la membrane, ce qui affecte le fonctionnement général de la micropompe PZT. Il faut alors établir une équation globale pour cette interaction afin de faciliter la simulation numérique. Elle se présente comme suit [3, 18] :

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & k \\ [K]^T & e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ L \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$

où  $C$  est la conductivité électrique [28],  $P$  est le vecteur de la pression, est une matrice de couplage qui représente la direction normale,  $[M]$  est la masse,  $[K]$  est la rigidité structurelle,  $F$  représente les forces externes,  $L$  indique les charges électriques appliquées. En outre,  $e$  est la permittivité électrique et  $U$  est le vecteur de potentiel DE champ magnétique.

### 5.2.2 Résolution numérique de l'accouplement électromécanique de disque piézoélectrique et la membrane

Les équations mentionnées au chapitre 4 sont des équations de la propriété de la géométrie en tout point de la section transversale de l'élément. Cependant, la résolution numérique de ces équations en utilisant le logiciel de simulation ANSYS en extension limitée pour avoir une étude plus approfondie des comportements piézoélectriques de la micropompe a été obtenue après la paramétrisation des données de piézoélectrique en parlant de la piézoélectricité et de la relation entre couple de flexion et la tension électrique qui nous permettent d'avoir un grand déplacement de la membrane comme suit [12] :

$$T = c^E S - e E \quad (5.2)$$

$$S = s^E T + d^t E \quad (5.3)$$

$$D = e^t S + \varepsilon^S E \quad (5.4)$$

où  $S$  est la déformation relative,  $T$  est la contrainte mécanique,  $D$  est la densité de la charge,  $E$  est le champ électrique,  $c^E$  matrice de rigidité à champ constant,  $\varepsilon^S$  est la permittivité électrique à déformation relative constante,  $e$  matrice de couplage piézoélectrique, et  $e^t$  est la constante piézoélectrique reliant la contrainte au champ électrique transposé.

Pendant la simulation, la constante piézoélectrique reliant la contrainte au champ électrique n'a pas été donnée directement. Il est donc nécessaire de faire une petite simplification de la matrice de déformation  $S$  suivant les axes de l'actionnement de disque piézoélectrique avant de commencer la résolution. A cette fin, l'équation d'élasticité des matériaux et la méthode de symétrie de la structure tétragonale seront utilisées pour simplifier la matrice  $S$ . L'équation  $S$  devient [11, 30] :

$$[s] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-V_{xy}}{E_y} & \frac{-V_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{E_y} & \frac{-V_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\text{Avec } E_x = E_y = \frac{1}{s_{11}^E} \quad (5.6)$$

$$E_z = \frac{1}{s_{33}^E} \quad (5.7)$$

$$G_{xz} = G_{yz} = \frac{1}{s_{44}^E} \quad (5.8)$$

$$G_{xy} = \frac{1}{s_{66}^E} = \frac{1}{2} (s_{11}^E - s_{12}^E) \quad (5.9)$$

$$V_{xy} = \frac{-s_{12}^E}{s_{11}^E} \quad (5.10)$$

$$v_{yz} = v_{xz} = \frac{-s_{13}^E}{s_{33}^E} \quad (5.11)$$

où E est le champ électrique dans l'axe ij, G est la limite élastique de la membrane dans l'axe ij, v est le champ potentiel dans la couche piézoélectrique.

Les équations 5.5 à 5.11 permettent de définir la matrice de rigidité de la membrane avec le logiciel de simulation ANSYS, et de calculer ensuite la matrice inverse [11]:

$$[C^E] = [S^E]^{-1}$$

de cette manière :

$$[\varepsilon^s] = [\varepsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1} [d] \quad (5.12)$$

En transformant l'équation 5.12, l'équation de la constante piézoélectrique accouplée avec la contrainte du champ électrique aux déformations de la membrane [11] est la suivante :

$$[e] = [s^E]^{-1} [d] = [d]^t [s^E]^{-1} \quad (5.13)$$

### **5.3 Résolution numérique des équations d'accouplement électromécanique (la membrane plus le disque piézoélectrique)**

La Figure 5.1 montre les étapes de simulations du système d'équations de la membrane PZT à l'aide d'ANSYS avec l'option de structure statique MEMS and Piézo. Les simulations sont effectuées à plusieurs étapes en fournissant le nombre de cas, les valeurs d'entrée à chaque rangement, les paramètres de variation et les conditions limites de chaque lancement de la simulation [13].



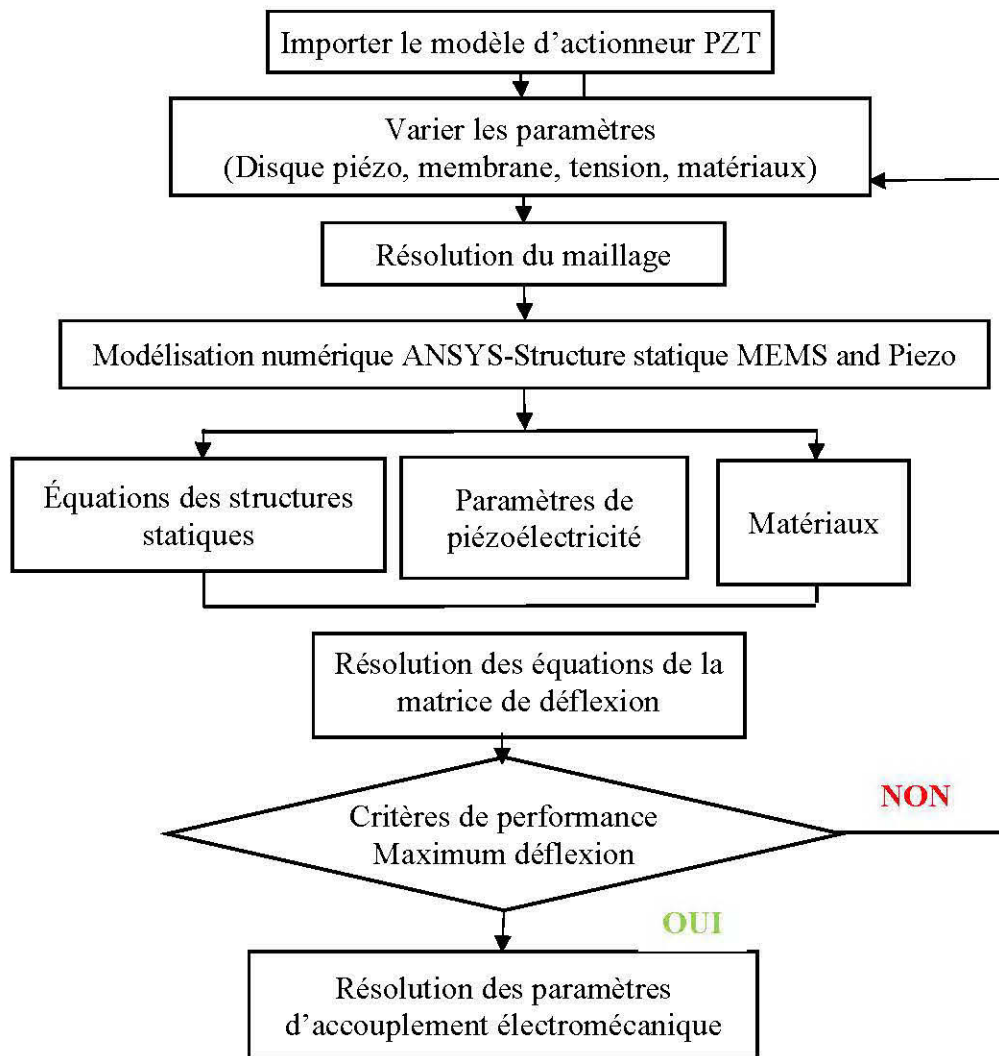


Figure 5.1: Diagramme de résolution numérique de l'accouplement électromécanique (membrane-disque piézoélectrique)

#### 5.4 Résolution numérique des équations accouplement fluide solide

La Figure 5.2 se concentre sur la méthode de résolution de notre système d'équations sur CFX. En se basant sur les résultats rapportés à la Figure 5.2, un modèle complet peut être dessiné, étant plus performant et répondant à notre critère.

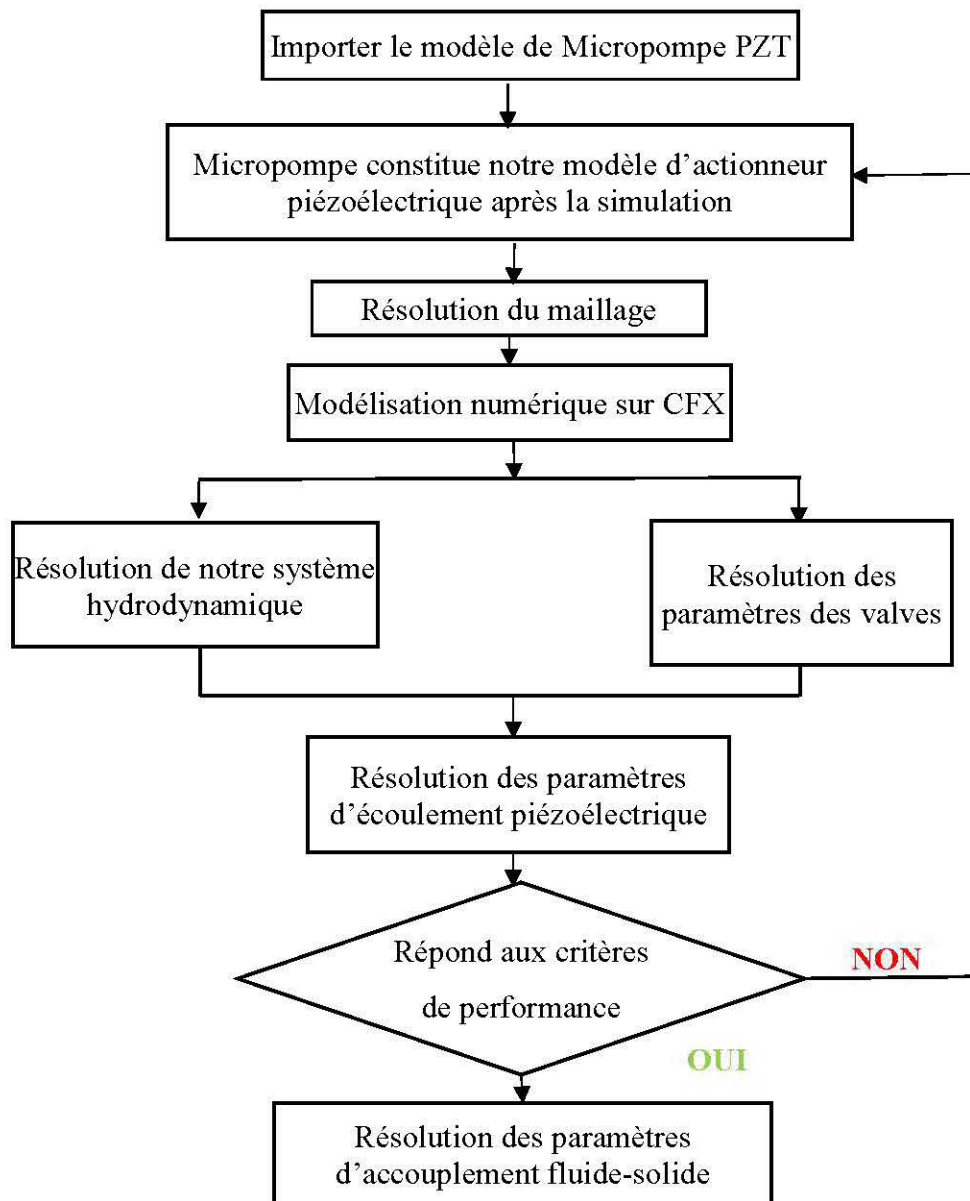


Figure 5.2 : Diagramme de résolution numérique de l'accouplement fluide solide

## 5.5 Principal module de résolution de la micropompe PZT à une chambre sur ANSYS

La résolution numérique des équations de la micropompe pour une seule chambre sur logiciel de simulation peut se faire en suivant les étapes présentées dans la Figure 5.3.

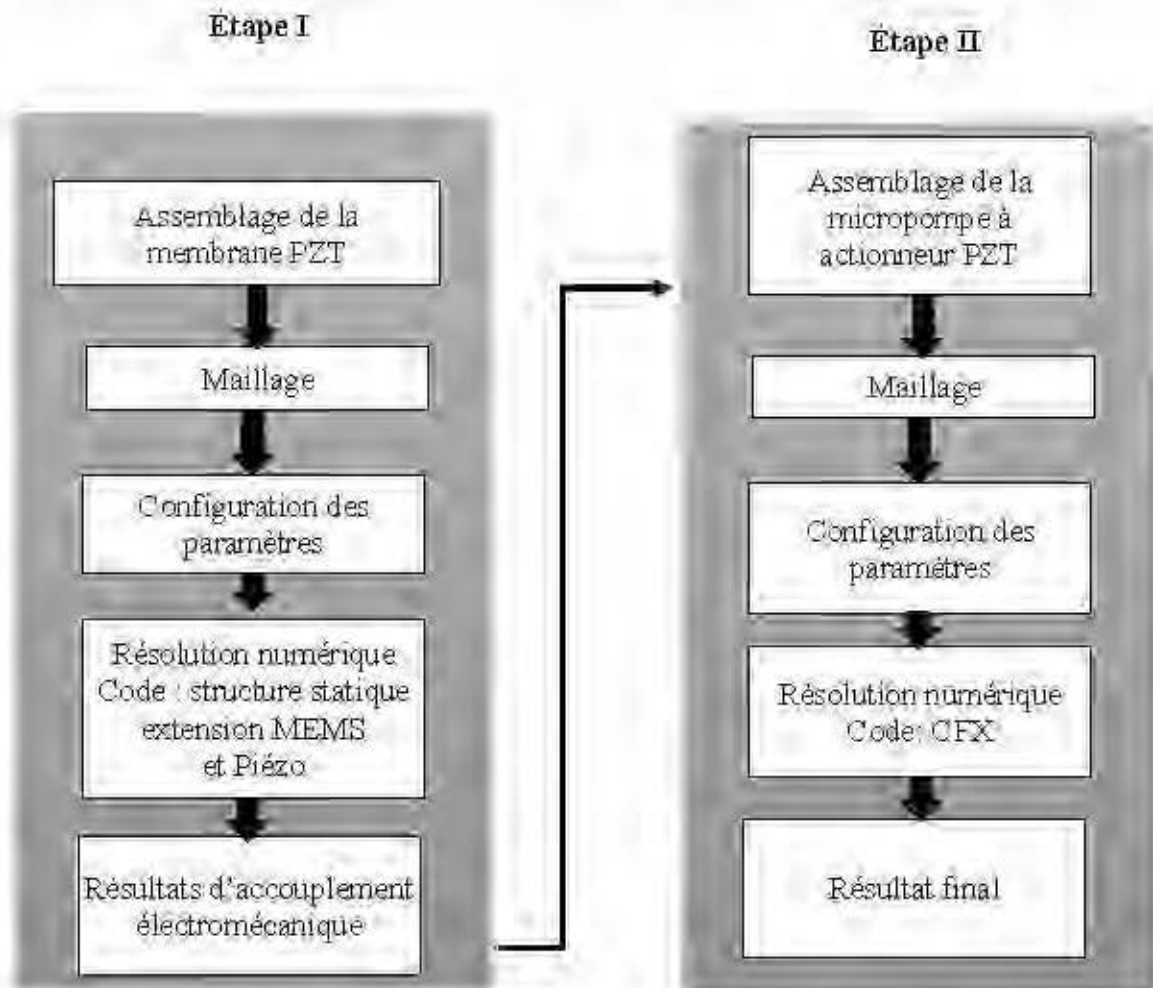


Figure 5.3 : Étapes de résolution d'une micropompe à actionneur PZT à une chambre

## 5.6 Principal module de résolution de la micropompe à deux chambres sur ANSYS

La résolution du système d'équations de la micropompe à deux chambres se fait avec la même configuration des paramètres de la micropompe à une chambre, mais en

ajoutant une modification sur la conception de la surface de contact entre la chambre de pompage de la première micropompe et la deuxième (Figure 5.4).

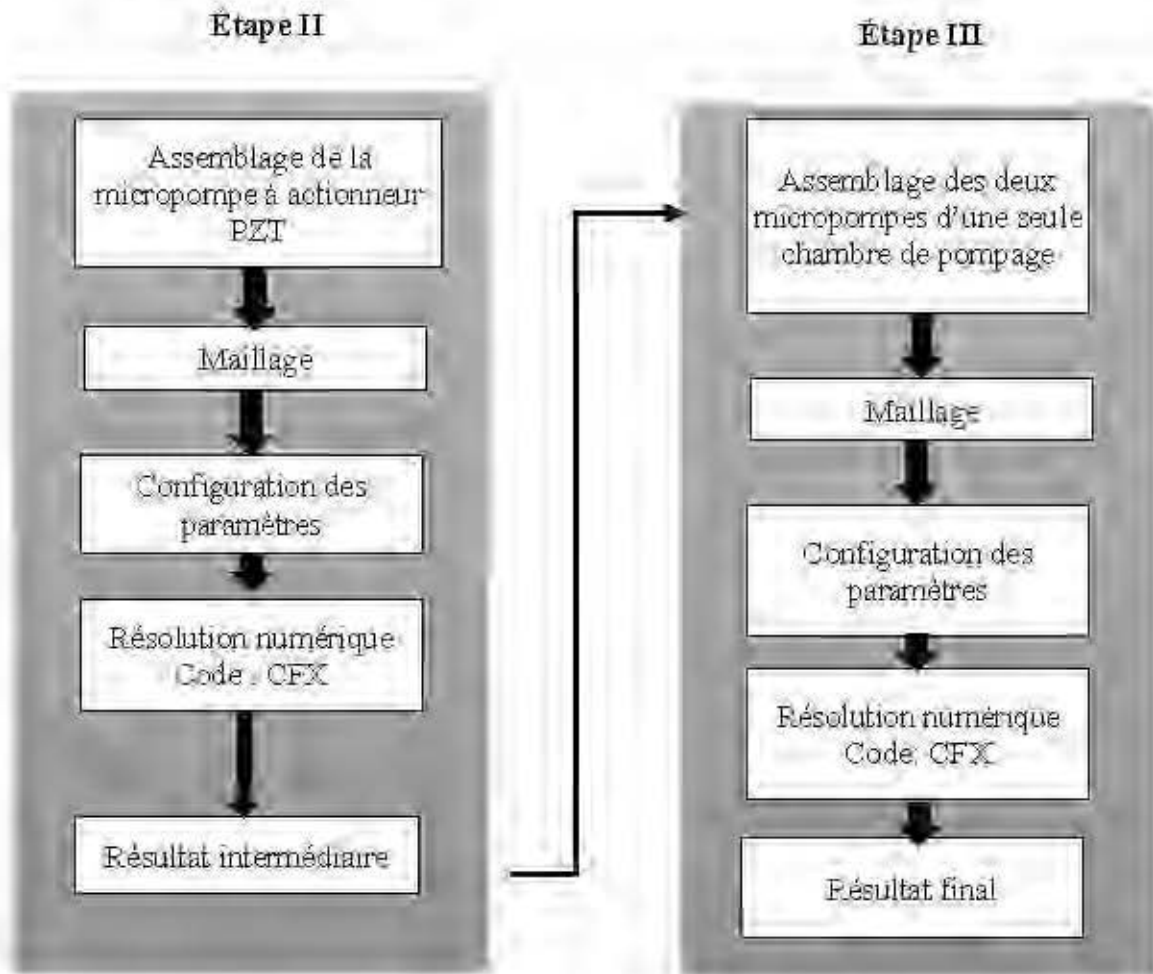


Figure 5.4. Étapes de résolution d'une micropompe à actionneur PZT à deux chambres

## 5.7 Réalisation de l'étape I: modélisation de la membrane PZT

### 5.7.1 Géométrie de la membrane à actionneur PZT

La conception de la membrane PZT est composée de trois parties, la moitié supérieure est un disque piézoélectrique, la moitié inférieure est la membrane, et la troisième partie est un joint avec époxy. Cet assemblage est illustré à la Figure 5.5.



Figure 5.5: Modèle d'assemblage de la membrane à actionneur PZT

### 5.7.2 Module de maillage de la membrane à actionneur piézoélectrique

Les analyses de la membrane PZT nécessitent une discrétisation dans le domaine Piezo and MEMS. D'ailleurs, les contrôles de maillage ont été effectués avec différents types et avec différents nombres d'éléments et de nœuds, jusqu'à ce que la génération du maillage ait produit une marge d'écart inférieure à 1 % dans les résultats [31]. À tel point que les résultats deviennent indépendants du maillage. Dans le Tableau 5.1, l'écart relative entre les résultats des variations du maillage de la première simulation

du silicium à un rapport de rayon de 0,7 est de 0,22 %, cette valeur est inférieure à 1 %, ce qui donne lieu à une adaptation du nombre de nœuds associés au maillage et à l'indépendance des résultats. Il faut aussi noter que plus le maillage est affiné, plus la marge d'écart entre les résultats est faible. La Figure 5.6 présente par ailleurs, un exemple de maillage.

Tableau 5.1: Variation du maillage de la membrane PZT

Type de maillage	Nombre nœuds	Nombre d'éléments	La déflexion de membrane en $\mu\text{m}$
	55366	21191	65,032
<b>Tétraédrique</b>	54856	20846	64,940
	54837	20831	64,889

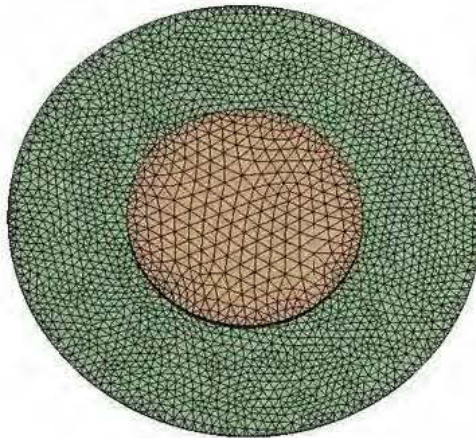


Figure 5.6: Module de maillage de la membrane à actionneur PZT

### **5.7.3 Simulations numériques sur structure statique Piézo and MEMS de la membrane et le disque piézoélectrique.**

Sur le logiciel de résolution numérique, il faut bien préciser les paramètres et les conditions de simulation afin d'obtenir les résultats attendus. Notre simulation a donc été centrée sur les critères suivants:

- Identification du corps piézoélectrique (Figure 5.7.a).
- Tension d'actionnement de 20 V à 100 V (Figure 5.7.b).
- Tension appliquée sur la surface de contact entre la membrane et le disque piézoélectrique est égale à 0 (Figure 5.7.c).
- Choix de différents matériaux à chaque simulation (silicium, aluminium, verre de borosilicate).
- Identification des paramètres de la piézoélectricité (matrice de rigidité, permittivité électrique, matrice de l'accouplement électrique).

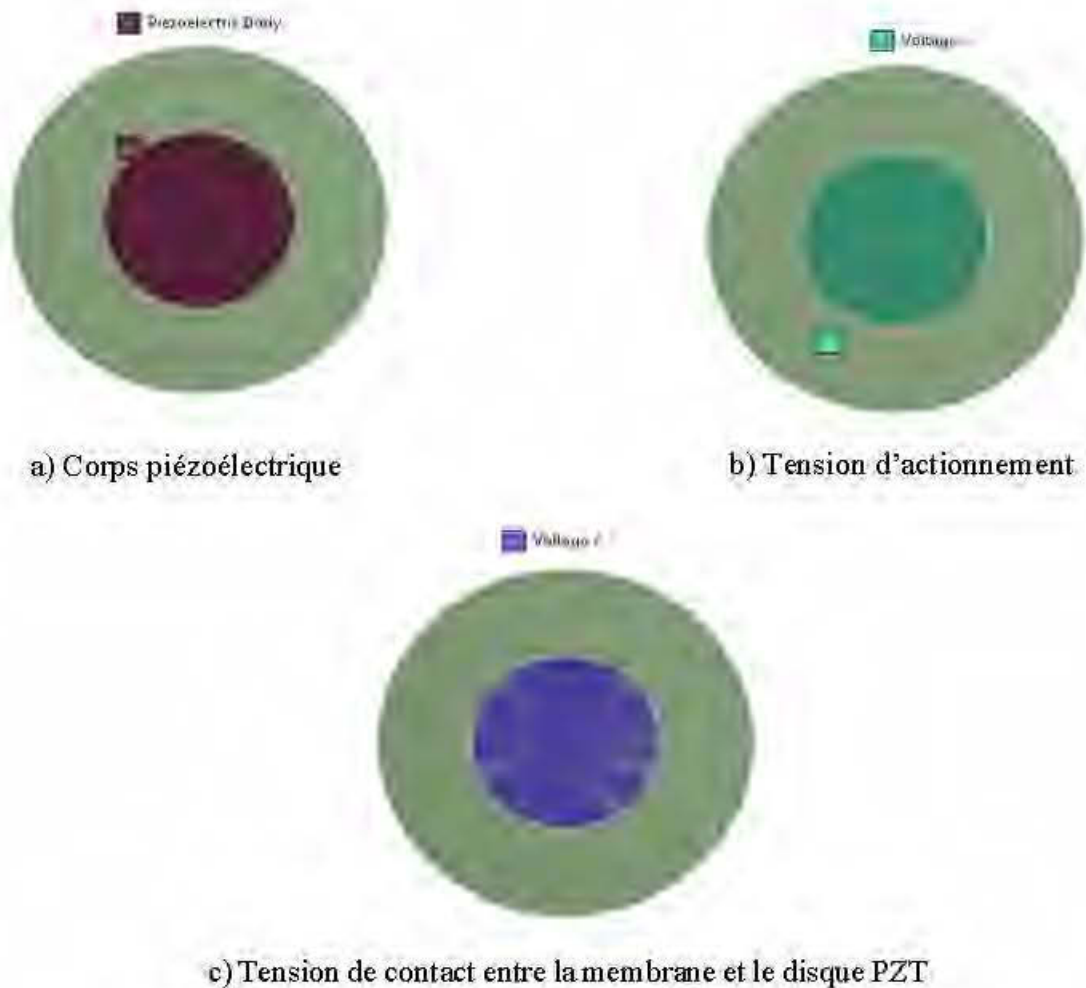


Figure 5.7: Module des simulations sur le code structurel statique MEMS et Piézo de la membrane à actionneur PZT

#### 5.7.4 Module Piézo and MEMS-SOLVER de la membrane

La résolution a été concentrée sur la variation de déplacement en fonction de plusieurs critères, entre autres, la tension électrique, les paramètres de la membrane et du disque piézoélectrique et le changement de matériau à chaque modélisation pour avoir une déflexion plus performante (Figure 5.8).



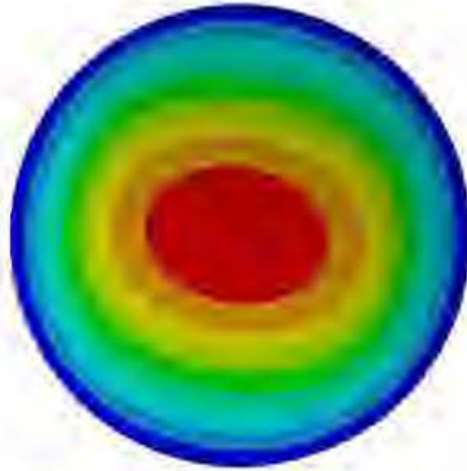


Figure 5.8: Variation de déplacement en fonction des paramètres dimensionnels de la membrane et de la tension électrique

## 5.8 Réalisation de l'étape II: Modélisation numérique d'une micropompe PZT à une chambre

### 5.8.1 Conception de la micropompe PZT à une seule chambre

La conception de la micropompe à membrane PZT est composée de quatre parties: la moitié supérieure et inférieure du boîtier, des valves d'entrée et de sortie en une seule plaque, et un disque piézoélectrique (Figure 5.9). La plaque de valves est assemblée entre les boîtiers supérieur et inférieur qui le fixent par le haut et par le bas. La section extérieure de la partie supérieure, qui chevauche la partie inférieure et la soupape, assure l'étanchéité de l'enveloppe de la micropompe. La performance de la valve est une partie importante dans la conception de la micropompe PZT. La valve doit être capable de laisser passer un débit suffisant, de minimiser le retour de courant, d'avoir une réponse dynamique appropriée et de satisfaire aux autres exigences de la conception de la micropompe.



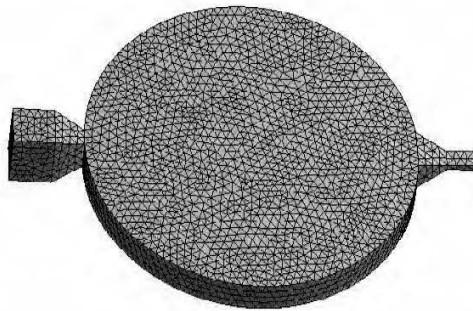
Figure 5.9: Module d'assemblage de la micropompe PZT

### 5.8.2 Module de maillage de la micropompe PZT à une chambre

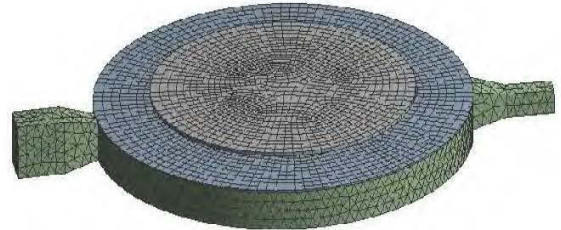
L'étude de la micropompe monochambre PZT nécessite une discrétisation dans le domaine de la simulation Flow. En fait, la simulation numérique sur CFX estime la taille globale d'un élément en tenant compte de son volume, de sa surface et de la complexité de la conception, plus la maille d'une géométrie est fine, plus l'écart sur les résultats est faible. Un maillage tétraédrique avec un ordre d'éléments quadratique est donc plus recommandé qu'un maillage tétraédrique avec un ordre d'éléments linéaire pour la discrétisation de formes complexes. Par conséquent, la vérification des résultats obtenus est obligatoire lors de la génération du maillage jusqu'à ce que les résultats deviennent indépendants du maillage. Nous pouvons ainsi constater que le Tableau 5.2 montre l'écart relative entre les résultats de la convergence du maillage à un débit de  $100 \mu\text{l}/\text{min}$  et un angle de  $20^\circ$ , avec un écart de  $0,8 \%$ , qui est inférieure à  $1 \%$ . Bref, les résultats sont indépendants du taille du maillage et du type de maillage [31]. La Figure 5.10 illustre un exemple de maillage.

Tableau 5.2: Variation du maillage de la micropompe a une seule chambre

Type de maillage	Nombre nœuds	Nombre d'éléments	La différence de pression en Pa
Tétraédrique quadratique	50316	32484	2142
Tétraédrique linéaire	6768	5482	2125



a) maillage tétraédrique de forme quadratique



b) maillage tétraédrique de forme linéaire

Figure 5.10: Module de maillage de la micropompe PZT à une seule chambre

### 5.8.3 Simulations numériques sur ANSYS-CFX à une chambre

Sur le logiciel de résolution numérique flow simulation, il faut bien préciser les paramètres et les conditions de simulation afin d'obtenir les résultats attendus. Notre simulation a donc été centrée sur les critères suivants:

- Une vitesse de déplacement de la membrane PZT en fonction du débit.
- Un débit d'entrée de 100  $\mu\text{l}/\text{min}$  à 400  $\mu\text{l}/\text{min}$ .
- Une pression de sortie de 100 kPa.
- Angle des microvalves ( $10^\circ$ ,  $20^\circ$ )

Ces paramètres sont indiqués à la Figure 5.11.

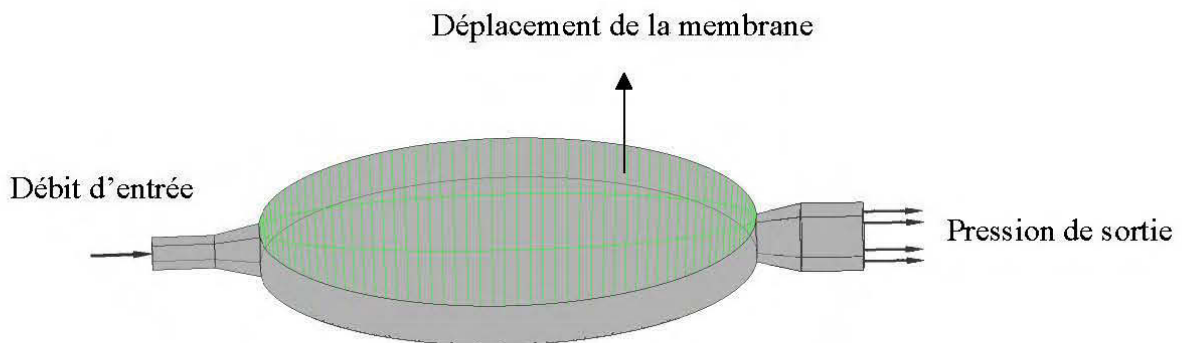


Figure 5.11: Module des simulations numériques sur ANSYS-CFX

### 5.8.4 Module CFX-SOLVER de la micropompe à une chambre

La résolution des équations de la micropompe PZT a été centrée sur la variation de la différence de pression en fonction de plusieurs critères, entre autres, le débit d'entrée, les dimensions des valves, la déflexion de la membrane et la pression de sortie (Figure 5.12).

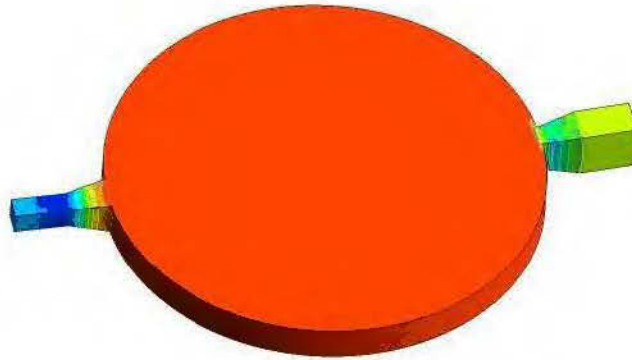


Figure 5.12: Écoulement de fluide en fonction du débit volumique

## 5.9 Réalisation de l'étape III: Modélisation numérique de la micropompe à deux chambres

### 5.9.1 Conception de la micropompe à deux chambres

La géométrie de la micropompe à deux chambres consiste à assembler deux micropompes à une chambre unique en modifiant la surface de contact entre les deux chambres de pompage. Cette modification permet de changer la section d'écoulement du fluide d'une surface conique à une surface plane (Figure 5.13).

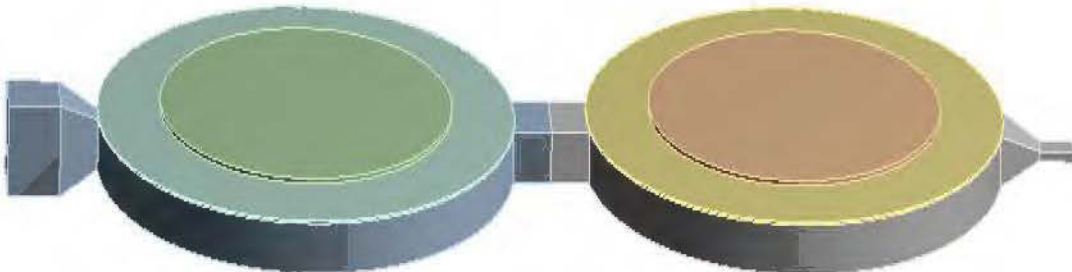


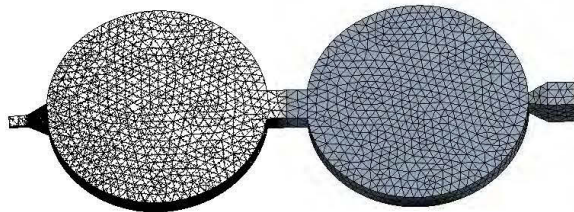
Figure 5.13 : Module d'assemblage de la micropompe PZT à deux chambres

### 5.9.2 Maillage de la micropompe à deux chambres

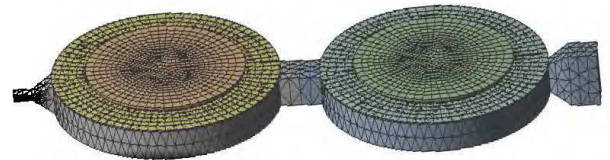
La méthode de maillage de la micropompe à deux chambres nécessite une estimation de la taille réelle de l'ensemble en tenant compte du nombre d'éléments utilisés et de la contrainte de chaque surface. La maille utilisée est une maille tétraédrique avec un ordre d'élément quadratique et linéaire, plus le maillage est fin, plus les résultats sont précis. Cependant, la différence majeure dans les résultats des simulations de la micropompe à deux chambres avec un débit de 300  $\mu\text{l}/\text{min}$  et un angle de  $20^\circ$  dans le Tableau 5.3 est de 0,32 % [31]. Cette différence prouve alors que les résultats sont indépendants du maillage. Un exemple de maillage est illustré à la Figure 5.14.

Tableau 5.3: Variation du maillage de la micropompe multichambre

Type de maillage	Nombre nœuds	Nombre d'éléments	La différence de pression en Pa
Tétraédrique	28547	17543	12040
	4249	2035	12001



a) maillage tétraédrique de forme quadratique



a) maillage tétraédrique de forme linéaire

Figure 5.14: Module de maillage de la micropompe PZT à deux chambres

### 5.9.3 Simulations numériques de la micropompe à deux chambres sur ANSYS-CFX

Les paramètres utilisés pour faire une simulation numérique de la micropompe à deux chambres avec la membrane PZT sont:

- Une vitesse de déplacement de la membrane PZT en fonction du débit.
- Un débit d'entrée de 100  $\mu\text{L}/\text{min}$  à 400  $\mu\text{L}/\text{min}$ .
- Une pression de sortie de 100 KPa.

Ces paramètres sont illustrés à la Figure 5.15.

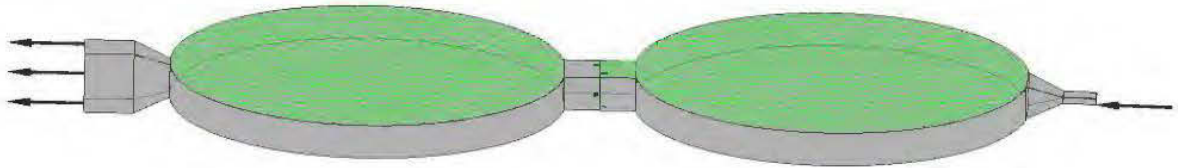


Figure 5.15: Module des simulations numériques sur ANSYS-CFX

### 5.9.4 Module CFX-SOLVER de la micropompe à deux chambres

Les résolutions numériques des paramètres de la micropompe PZT à deux chambres consistent à faire varier le débit, la pression et la vitesse de déplacement de la membrane en fonction du débit d'entrée (Figure 5.16).



Figure 5.16: Écoulement de fluide en fonction du débit volumique

## CHAPITRE 6

### ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DES MICROPOMPES À MEMBRANE PZT

Déterminer les paramètres de conception à partir d'un modèle qui existe dans la littérature est difficile en raison de la grande sensibilité des tolérances et les contraintes d'assemblage, des très petites dimensions des microcomposants, ainsi que de l'effet des écarts de simulation. De plus, les forces d'amortissement des valves et la membrane PZT sont difficiles à estimer avec précision. Par conséquent, trois paramètres de conception ont été étudiés: les dimensions de la membrane PZT, les paramètres des valves et la géométrie de la micropompe. Le nombre des cas était limité par le nombre de variations des composants. La liste des paramètres de conception et d'opération est présentée dans ce chapitre [28].

#### 6.1 Conception de la membrane PZT

La conception de la membrane a été faite d'après un ensemble d'exemples publiés dans la littérature [26, 30, 32-34] et des équations mentionnées au chapitre 4 (les équations des contrainte et de moment fléchissant). La membrane a été modélisée à partir des données aux Tableaux 6.1 et 6.2, des équations de piézoélectricité et des contraintes mécaniques mentionnées au chapitre 4. Suivant l'équation 4.48 de l'actionnement piézoélectrique électrique, le disque PZT et l'époxy ont été conçus (Figure 6.1). À l'aide du logiciel SolidWorks, le tout a été assemblé (Figure 6.2). Par après, la validation des dimensions de la membrane a été faite en comparant les résultats de la résolution numérique avec ceux publiés dans la littérature [4, 10, 16, 20, 29].



Tableau 6.1: Paramètres d'opération et de conception de la membrane PZT

<b>Paramètre de la membrane PZT</b>	<b>Valeurs</b>
Rayon de la membrane $R_m$ [ $\mu\text{m}$ ]	1200
Rayon du disque PZT $R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	600-720-840
Rapport de rayon $R_r$ [mm]	0,5-0,6-0,7
Épaisseur de la membrane $E_m$ [ $\mu\text{m}$ ]	50-100
Épaisseur du disque piézoélectrique $E_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	50-100
Épaisseur d'époxy $E_e$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Tension d'actionnement [V]	0-100

Tableau 6.2: Constantes des matériaux de la membrane PZT

<b>Constantes des matériaux</b>	<b>Valeurs</b>
Module d'élasticité du disque piézoélectrique $E$ [Pa]	$64 \times 10^9$
Coefficient de Poisson du disque piézo $\nu_p$	0,32
Module d'élasticité de l'époxy $E_a$ [Pa]	$5,17 \times 10^{10}$
Coefficient de Poisson de l'époxy $\nu_e$ [Pa]	0,345
Masse volumique du disque piézoélectrique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2770
Amortissement structural [-]	1 %
Module d'élasticité du silicium $E$ [Pa]	$47 \times 10^9$
Module d'élasticité du verre de borosilicate $E$ [Pa]	$64 \times 10^9$
Module d'élasticité de l'aluminium $E$ [Pa]	$71 \times 10^9$
Coefficient de Poisson du silicium [-]	0,28
Coefficient de Poisson du verre de borosilicate [-]	0,22
Coefficient de Poisson de l'aluminium [-]	0,33
Masse volumique du silicium [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2330
Masse volumique du verre de borosilicate [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2230
Masse volumique de l'aluminium [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2770

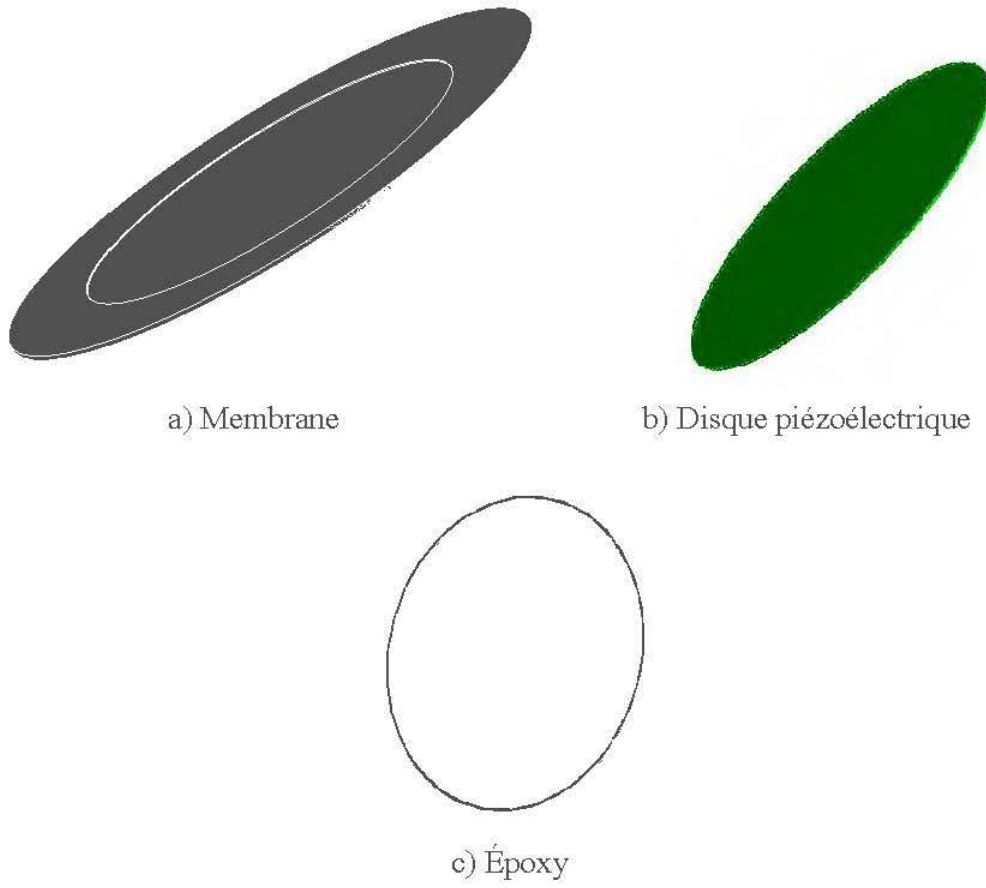


Figure 6.1: Composants de la membrane piézoélectrique

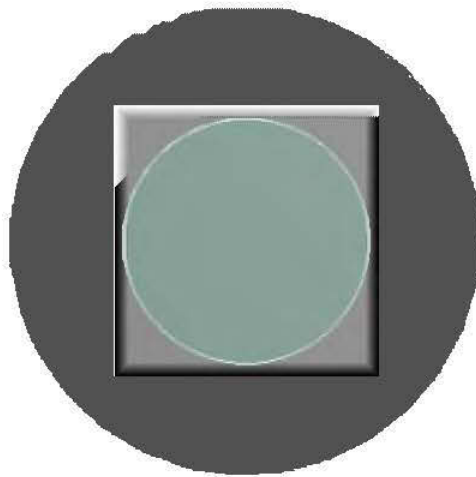


Figure 6.2: Assemblage des trois composants

## 6.2 Étude paramétrique de la membrane PZT

Un certain nombre d'exigences des spécifications géométriques et dimensionnelles ont été définies en fonction du type de matériau. Les paramètres pour la conception de la membrane PZT ont été établis en examinant les membranes existantes et en identifiant les objectifs de cette recherche (Figure 6.3) [33, 34].



Figure 6.3: Schéma des paramètres d'opération et de conception de la membrane PZT

### 6.2.1 Définition des constantes de la piézoélectricité

Les paramètres de la piézoélectricité ont été déterminés d'après les équations de la résolution (5.5-5.13) pour faciliter la simulation numérique.

En commençant par l'équation principale pour définir les trois matrices:

$$D = e^t S + e^s E \quad (6.1)$$

$$S = s^E T + d^t E \quad (6.2)$$

$$T = c^E S - e E \quad (6.3)$$

où  $S$  est la déformation relative,  $\varepsilon^T$  est la permittivité électrique à contrainte constante,  $D$  est la densité de la charge,  $E$  est le champ électrique,  $s^E$  est la conformité mécanique,  $T$  est la contrainte mécanique,  $d$  est la constante piézoélectrique reliant la déformation relative au champ électrique,  $d^T$  est la constante piézoélectrique reliant la déformation au champ électrique transposé et  $c^E$  est la matrice de rigidité.

À partir des équations de résolution numérique 5.14-5.16 et avec les paramètres de piézoélectricité, les matrices du disque piézoélectrique peuvent être définies comme suit [19, 20]:

Matrice de rigidité  $c^E$  :

$$c^E = \begin{bmatrix} 127,2 & 80,2 & 84,67 & 0 & 0 & 0 \\ 80,2 & 127,2 & 84,67 & 0 & 0 & 0 \\ 84,67 & 84,67 & 117,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 23,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23 \end{bmatrix} \text{GPa}$$

Matrice de permittivité électrique  $\varepsilon^T$  :

$$[\varepsilon^s] = \begin{bmatrix} 150,9 & 0 & 0 \\ 0 & 150,9 & 0 \\ 0 & 0 & 126,9 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \frac{F}{m}$$

Matrice de couplage piézoélectrique  $e$  :

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 741 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 741 & 0 \\ -274 & -274 & 593 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \frac{C}{N}$$

## 6.2.2 Paramètres des simulations de la membrane PZT

Tout d'abord, une étude stationnaire paramétrique a été faite pour déterminer la géométrie de la membrane PZT à partir des données de référence [6, 11, 26, 34, 35]. La simulation a été commencée par l'ajout de l'extension MEMS et Piézo. Ensuite, le rapport de rayon a été déterminé selon le type de matériau pour une tension appliquée de 0 V à 100 V, puis les paramètres du disque piézoélectrique ont été maintenus fixes. En revanche, dans la deuxième simulation, les paramètres du disque piézoélectrique (le rayon et l'épaisseur) ont été variés en gardant les dimensions de la membrane fixes, toujours à une tension d'actionnement de 0 V à 100 V. Cependant, à chaque simulation, le matériau a été changé entre le silicium, le verre de borosilicate et l'aluminium. La Figure 6.4 situe ces paramètres dans un schéma.

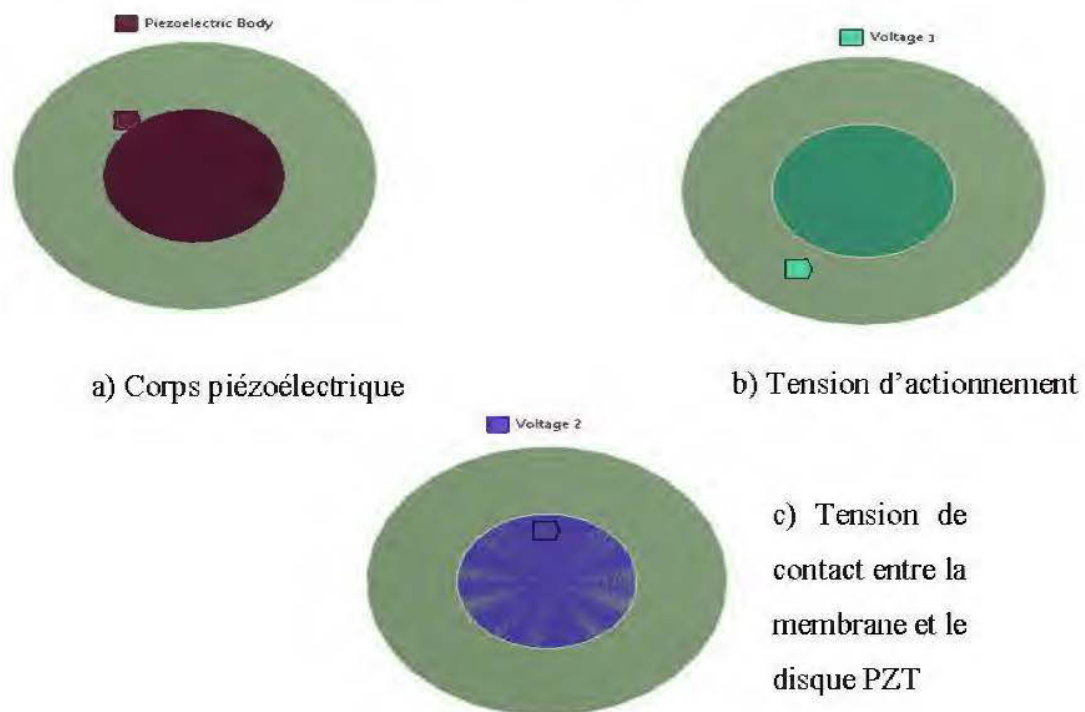


Figure 6.4: Module de résolution sur le code structurel statique MEMS et Piézo de la membrane à actionneur PZT

### 6.3 Conception d'une micropompe PZT pour une seule chambre à deux chambres

Le modèle à une seule chambre se compose d'une chambre à fluide et d'un actionneur piézoélectrique séparés par une fine membrane. Les matériaux suivants ont été utilisés dans les simulations, à savoir l'eau, la céramique PZT, l'aluminium, le silicium et le verre de borosilicate. Les ports d'entrée et de sortie sont situés sur les côtés opposés de la chambre. Le rayon de la membrane est de  $1200\ \mu\text{m}$  ; la membrane a une épaisseur de  $50\ \text{à}\ 100\ \mu\text{m}$ . Le diamètre a été choisi pour être approximativement celui des pompes existantes [2]. Le concept de la micropompe est illustré à la Figure 6.5 [17].

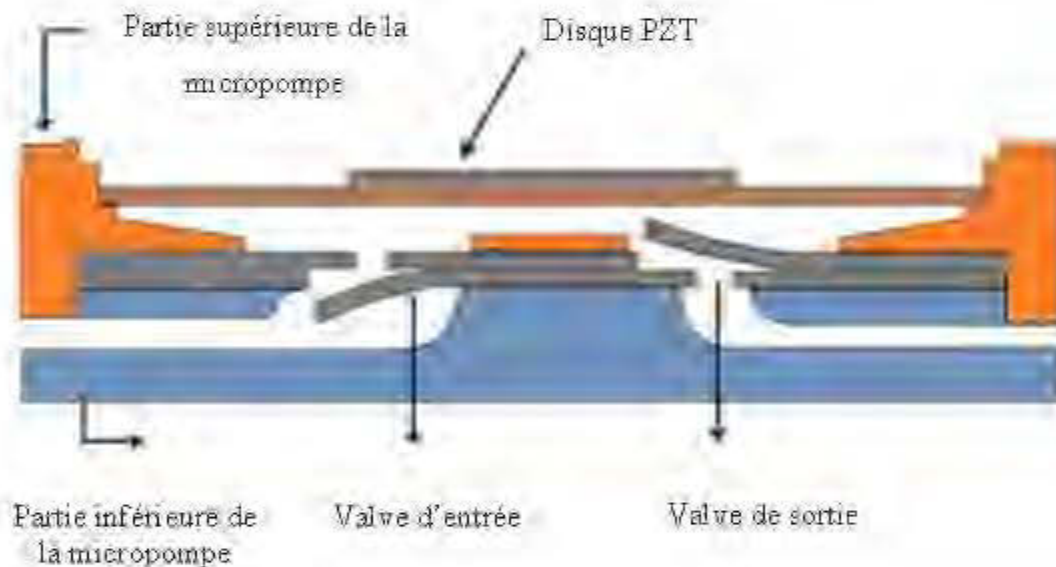


Figure 6.5: Concept de la micropompe PZT [16]

Par ailleurs, la conception de la micropompe PZT à deux chambres est un procédé qui consiste à assembler deux micropompes PZT à une chambre. Il se compose de deux chambres à fluide et deux actionneurs piézoélectriques séparés par une fine membrane avec des valves d'entrée et de sortie, comme illustré dans les Tableaux 6.3-6.6 et les Figures 6.6- 6.11



Figure 6.6: Membrane à disque PZT

Tableau 6.3: Paramètres de la chambre de la micropompe

<b>Paramètres de la chambre de micropompe PZT</b>	<b>Valeurs</b>
Diamètre extérieur $d_e$ [mm]	14
Diamètre intérieur $R_i$ [mm]	12
Diamètre du trou d'entrée [mm]	1,5
Diamètre du trou de sortie [mm]	1,5
Hauteur de la chambre [mm]	1,5

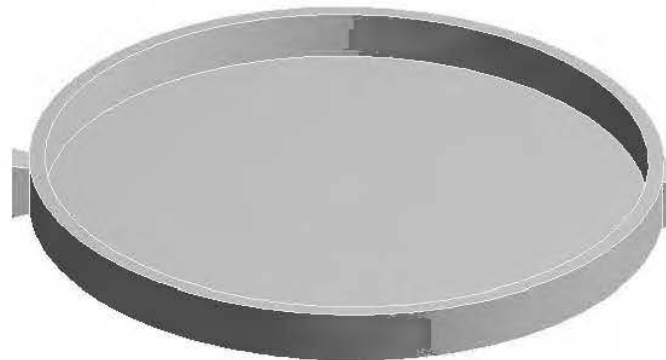


Figure 6.7: Chambre de la micropompe PZT

Tableau 6.4: Paramètres de conception de la valve d'entrée

<b>Paramètres de la valve d'entrée PZT</b>	<b>Valeurs</b>
Épaisseur de valve [mm]	0,2
Largeur de valve d'entrée [mm]	1
Longueur de valve d'entrée [mm]	1,5
Angle de la partie conique de la valve d'entrée [°]	10
Largeur de la partie conique de la valve d'entrée [mm]	0,61
Longueur de la partie conique de la valve d'entrée [mm]	1,093



Figure 6.8: Valve d'entrée



Tableau 6.5: Paramètres de la valve de sortie

Paramètres de la valve de sortie PZT	Valeurs
Épaisseur de la valve [mm]	0,2
Largeur de la valve de sortie [mm]	1
Longueur de la valve de sortie [mm]	1,5
Angle de la partie conique de la valve de sortie [°]	10-20
Largeur de la partie conique de la valve de sortie [mm]	1
Longueur de la partie conique de la valve de sortie [mm]	1,093



Figure 6.9: Paramètres de conception de la valve de sortie



Figure 6.10: Assemblage complet de la micropompe PZT

Tableau 6.6: Paramètres de conception de la micropompe à deux chambres

Paramètres de la micropompe PZT à deux chambres	Valeurs
Diamètre de la chambre $D_r$ [mm]	14
Épaisseur de valve $E_p$ [mm]	0,2
Largeur de valve d'entrée $l_v$ [mm]	1
Longueur de valve d'entrée $L_v$ [mm]	1,5
Angle de la partie conique de valve d'entrée [°]	20
Largeur de la partie conique de valve d'entrée $l_c$ [mm]	1
Longueur de la partie conique de valve d'entrée $L_c$ [mm]	1,093
Largeur de la surface de contact entre les deux chambres $l_s$ [mm]	1,75
Longueur de la surface de contact entre les deux chambres $L_s$ [mm]	1

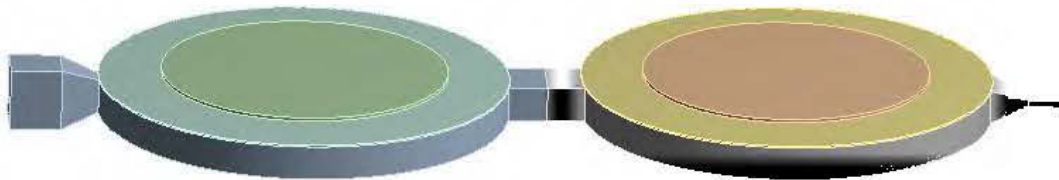


Figure 6.11: Assemblage de la micropompe PZT à deux chambres

#### 6.4 Étude paramétrique de la micropompe PZT à deux chambres

Une analyse par interaction fluide-structure de la micropompe a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS-CFX par le module volume fini. La meilleure approche pour trouver la déflexion et la pression obtenue par une basse tension d'une micropompe consiste à effectuer une analyse avec un modèle (3D) bien dimensionné. Cependant, l'étude paramétrique de la micropompe a été concentrée sur les pièces qui sont en mouvement et qui peuvent influencer les résultats des simulations. Il s'agit de la membrane PZT, du disque PZT et des valves. À partir des résultats des simulations de la déflexion de

la membrane, une étude plus approfondie sur l'écoulement de fluide dans la chambre et les valves a été faite [2, 5] (Figure 6.12 et Tableaux 6.7 et 6.8) [24].

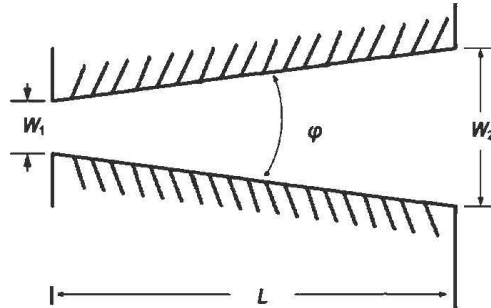


Figure 6.12: Schéma d'une valve [36]

Tableau 6.7: Paramètres de simulation numérique de la micropompe PZT

Paramètres de la micropompe	Valeurs
L'angle de valve [°]	10-20
Hauteur de la chambre [mm]	1
Diamètre de la chambre [mm]	14
Longueur des valves [mm]	1,5
Largeur de la partie conique de la valve d'entrée [mm]	0,61
Largeur de la valve de sortie [mm]	1
Pression d'entrée [Pa]	100 000
Débit de sortie [ $\mu\text{l}/\text{min}$ ]	100-400

Tableau 6.8: Constantes de matériau de la micropompe PZT

Constantes des matériaux	Valeurs
Module d'élasticité du disque piézoélectrique E [Pa]	$64 \times 10^9$
Coefficient de Poisson du disque piézoélectrique $\nu_p$	0,32

Module d'élasticité de l'époxy $E_a$ [Pa]	$5,17 \times 10^{10}$
Coefficient de Poisson de l'époxy $\nu_e$ [-]	0,345
Amortissement structural [%]	1
Masse volumique de l'eau [kg/m <sup>3</sup> ]	997
Viscosité de l'eau [Pa.s]	$1 \times 10^{-3}$

---

## CHAPITRE 7

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats de simulation des composants de la micropompe PZT, incluant les résultats numériques de la membrane et du système de la micropompe PZT. Les simulations ont été effectuées sur un modèle de structure électrique qui contient la structure statique de la membrane PZT avec la tension électrique. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes qui caractérisent la déflexion de membrane en fonction de la tension électrique, du rapport de rayon, de l'épaisseur du disque piézoélectrique, ainsi que la puissance de micropompe en fonction de débit, des angles des microvalves. Les Tableaux 7.1-7.3 indiquent des paramètres dimensionnels et opérationnels avec les constantes des matériaux utilisés [3, 30].

Tableau 7.1: Paramètres dimensionnels

<b>Composants de la micropompe</b>	<b>Paramètres</b>
Chambre de la micropompe PZT	Diamètre intérieur [mm]: 12
	Diamètre du trou d'entrée de fluide [mm]: 0,60
	Diamètre du trou de sortie de fluide [mm]: 1
	Hauteur de la chambre [mm]: 1
	Longueur de la surface de contact entre les boîtiers supérieur et inférieur [mm]: 3
	Largeur de la surface de contact entre les boîtiers supérieur et inférieur [mm] : 3
Valve d'entrée	Épaisseur de la valve d'entrée [mm]: 0,60
	Longueur des valves [mm] : 1,093
	Largeur de la valve d'entrée [mm]: 0,60
Valve de sortie	Largeur de la valve de sortie [mm]: 1
	Longueur de la partie conique de la valve de sortie [mm] : 1,093
	Épaisseur de la valve de sortie [mm]: 1
	Longueur de la valve de sortie [mm]: 1,5

Tableau 7.2 : Paramètres opérationnels

Composants de la micropompe	Paramètres
Valve	Angle de la valve [°]: 10-20
	Diamètre de la valve d'entrée [mm]: 3-4
	Diamètre de la valve de sortie [mm]: 2-3
Chambre de pompage	Pression d'entrée [Pa] : 100 000
	Débit de sortie [ $\mu$ l/min] : 100-400
	Hauteur de la chambre [mm] : 1,2
Membrane PZT	Diamètre de la membrane $R_m$ [mm]: 12
	Rayon du disque PZT $R_p$ [ $\mu$ m]: 600 ; 720 ; 840
	Rapport de rayon $R_r$ [mm] : 0,5 ; 0,6 ; 0,7
	Épaisseur de la membrane $E_m$ [ $\mu$ m]: 50 ; 100
	Épaisseur du disque piézoélectrique $E_p$ [ $\mu$ m]: 50 ; 100
	Tension électrique [V]: 0-100

Tableau 7.3 : Constantes des matériaux

Constantes des matériaux	Valeurs
Module d'élasticité du disque piézoélectrique E [Pa]	$64 \times 10^9$
Coefficient de Poisson du disque piézo Vp	0,32
Module d'élasticité de l'époxy $E_a$ [Pa]	$5,17 \times 10^{10}$
Coefficient de Poisson de l'époxy $V_e$ [-]	0,345
Masse volumique du disque piézoélectrique [ $\text{kg/m}^3$ ]	2770
Amortissement structural [-]	1 %
Module d'élasticité du silicium E [Pa]	$47 \times 10^9$
Module d'élasticité du verre de borosilicate E [Pa]	$64 \times 10^9$
Module d'élasticité de l'aluminium E [Pa]	$71 \times 10^9$
Coefficient de Poisson du silicium [-]	0,28
Coefficient de Poisson du verre de borosilicate [-]	0,22
Coefficient de Poisson de l'aluminium [-]	0,33
Masse volumique du silicium [ $\text{kg/m}^3$ ]	2330
Masse volumique du verre de borosilicate [ $\text{kg/m}^3$ ]	2230
Masse volumique de l'aluminium [ $\text{kg/m}^3$ ]	2770
Densité de l'eau [ $\text{kg/m}^3$ ]	997
Viscosité de l'eau [Pa.s]	$1 \times 10^{-3}$

Coefficient de dilatation thermique de l'époxy en céramique [ $K^{-1}$ ]  $7 \times 10^{-6}$

---

## 7.1 Simulations numériques de la membrane

Dans cette simulation, la déflexion de la membrane a été réalisée à l'aide du logiciel de simulation ANSYS avec une nouvelle extension Piezo and MEMS. Le but de cette simulation était de définir les paramètres permettant d'avoir une déflexion maximale de l'ensemble composé de la membrane en verre borosilicate, en silicium ou en aluminium, du disque piézoélectrique et de la couche époxy.

En fait, les simulations ont été réalisées en modifiant, à chaque lancement, certains des paramètres de l'assemblage, qu'ils soient géométriques, dimensionnels ou de contrainte [32].

## 7.2 Déflexion maximale de la membrane sous une tension appliquée variable

Dans cette section, il s'agit d'étudier la variation de la flexion de la membrane en fonction de quatre paramètres:

- Tension électrique de 0 à 100V;
- Rapport de rayon de 0,5; 0,6; 0,7;
- Choix des matériaux (silicium, verre de borosilicate et aluminium);
- Fixation des épaisseurs de la membrane et du disque piézoélectrique.

### **7.2.1 Effet de la tension électrique, du rapport de rayon sur la déflexion de la membrane PZT**

Pour le silicium, le rapport de rayon observé à la Figure 7.1 a un impact sur la déflexion de la membrane pour des valeurs de tension électrique élevées et pour une épaisseur de disque piézoélectrique supérieure à celle de la membrane. Cela s'explique par le fait que la déflexion augmente progressivement pour atteindre une valeur de 65  $\mu\text{m}$  à mesure que le rapport de rayon croît. Ce phénomène s'explique par le fait que le champ électrique autour de la surface d'un élément actionné est proportionnel à la contrainte mécanique et donc au rapport du rayon. D'ailleurs, la Figure 7.2 montre que l'actionnement électrique de la membrane en verre borosilicate génère une plus grande déflexion que le silicium. Cela indique également que la valeur de déflexion peut atteindre 70  $\mu\text{m}$  en fonction de la progression du ratio de rayon. Cette croissance est principalement due à la conductivité électrique et à l'élasticité du verre de borosilicate. De plus, pour une membrane en aluminium, il faut mentionner qu'avec une tension électrique de 100 V et avec un rapport de rayon de 0,7, la déflexion atteint 72  $\mu\text{m}$ , ce qui signifie une augmentation de près de 10,77 % par rapport au silicium et de 2,86 % par rapport au verre borosilicate, ainsi, plus le module d'élasticité des matériaux est grand, plus la flèche obtenue par l'actionnement électrique du disque PZT est grande, comme illustré dans La Figure 7.3. Il est également à noter que les courbes sont linéaires pour les trois Figures, ce qui permet de calculer les coefficients de détermination afin de déduire le lien statistique entre la tension électrique et la valeur de la déflexion. Selon le Tableau 7.4, le coefficient de détermination varie entre 0,99 et 1, cette valeur prouve que le lien statistique linéaire est suffisamment fort entre les deux variables, ce qui signifie que plus la tension électrique est élevée, plus la déflexion s'accroît progressivement. Cela dit, il est utile de définir la droite de régression qui sera utilisée pour prédire les valeurs de la déflexion de la membrane pour une tension électrique  $x$ . La prévision de la déflexion de la membrane PZT d'une tension électrique de 100 V pour un rapport de rayon de 0,6 à la Figure 7.1 est de 60,114  $\mu\text{m}$  en comparant



cette valeur avec celle de la simulation sur ANSYS qui est de 60,10  $\mu\text{m}$ , l'écart est de 0,02% presque nul en fait la ligne est parfaitement linéaire.

Tableau 7.4: Coefficients de détermination et droite de régression des trois Figures 7.1-7.3

<b>Figures</b>	<b>Rapport du rayon</b>	<b>Coefficient de détermination</b>	<b>La droite de régression linéaire</b>
<b>Figure 7.1</b>	0,5	1	$Y = 0,4545x - 0,11$
	0,6	0,9989	$Y = 0,5853x + 1,584$
	0,7	0,9978	$Y = 0,611x + 2,91$
<b>Figure 7.2</b>	0,5	1	$Y = 0,5012x - 0,01$
	0,6	1	$Y = 0,6615x$
	0,7	0,9991	$Y = 0,7029x + 1,855$
<b>Figure 7.3</b>	0,5	0,9999	$Y = 0,6898x - 0,48$
	0,6	1	$Y = 0,685x$
	0,7	0,9991	$Y = 0,702x + 0,11$

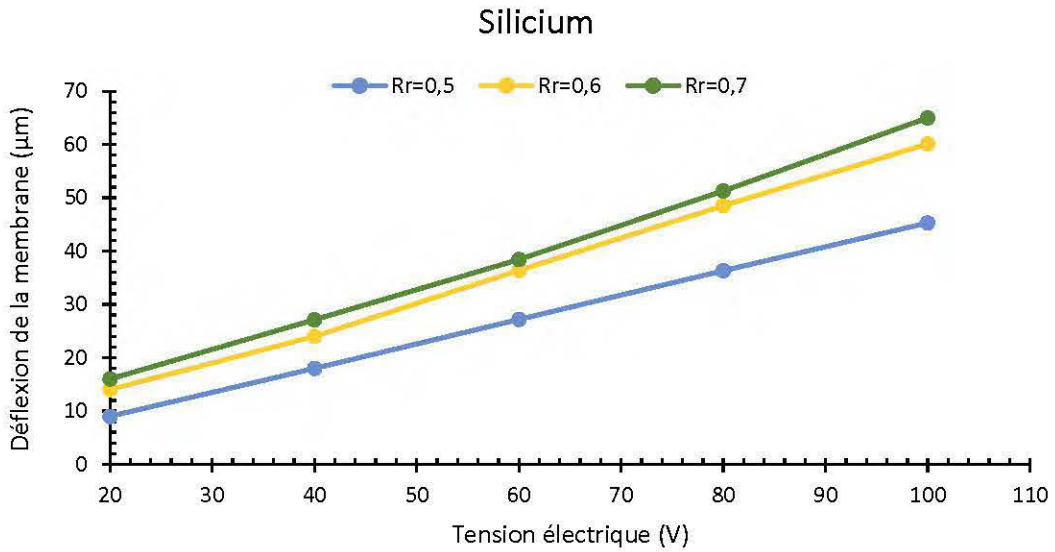


Figure 7.1: Déflexion de la membrane piézoélectrique en fonction de la tension électrique à une épaisseur de la membrane de 0,05 mm et du disque piézoélectrique de 0,1 mm (rapport de rayon : 0,5 ; 0,6 et 0,7).

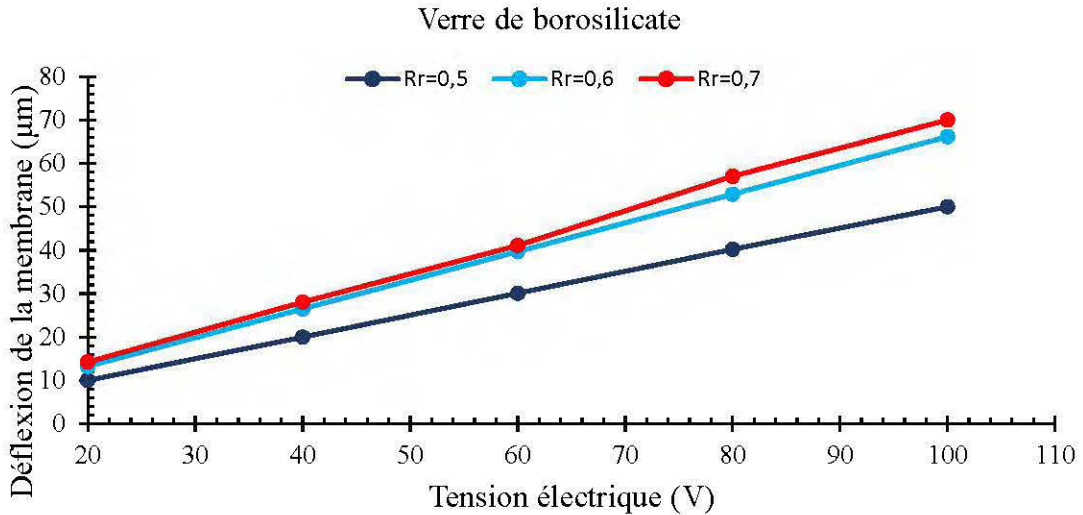


Figure 7.2: Déflexion de la membrane piézoélectrique en fonction de la tension électrique à une épaisseur de la membrane de 0,05 mm et du disque piézoélectrique de 0,1 mm (rapport de rayon: 0,5 ; 0,6 et 0,7)

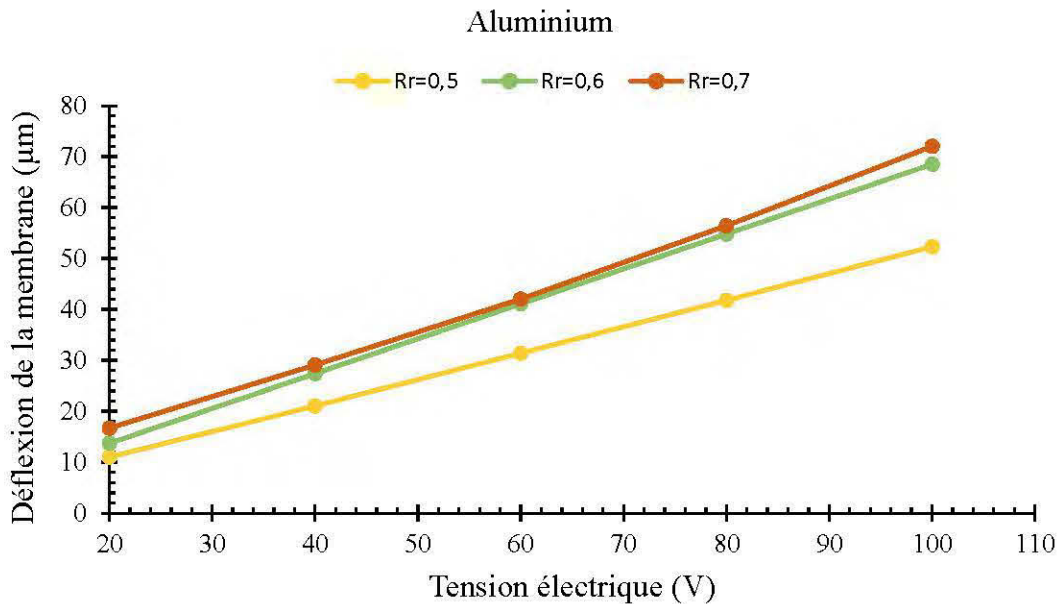


Figure 7.3: Déflexion de la membrane piézoélectrique en fonction de la tension électrique à une épaisseur de la membrane de 0,05 mm et du disque piézoélectrique de 0,1 mm (rapport de rayon: 0,5 ; 0,6 et 0,7)

Par ailleurs, les Figures 7.4-7.6 illustrent les marges de déflexion des membranes pour le silicium, pour le verre borosilicaté et pour l'aluminium avec des rapports de rayons de 0,5, 0,6 et 0,7. Ainsi, le point de déflexion maximale est observé au centre des membranes. Cependant, la déflexion de la membrane est proportionnelle à la valeur du rapport de rayon. Enfin, les contours indiquent que l'aluminium a un effet assez significatif sur la déflexion en raison de sa conductivité électrique supérieure à celle du silicium et du verre de borosilicate.

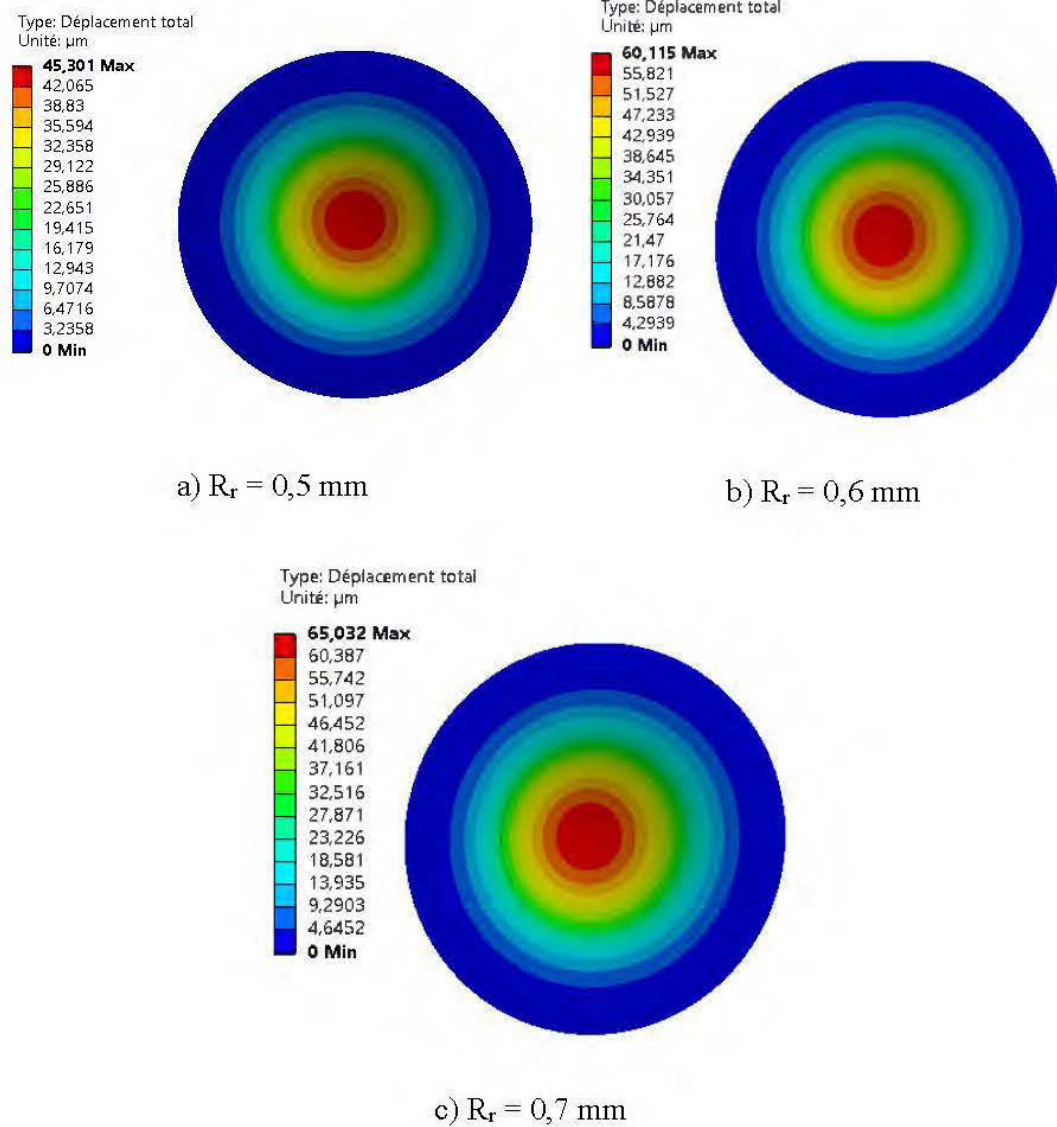


Figure 7.4: Contours de déflexion de la membrane en silicium pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,1 \text{ mm}$  et  $E_m = 0,05 \text{ mm}$  avec le rapport de rayon comme paramètre

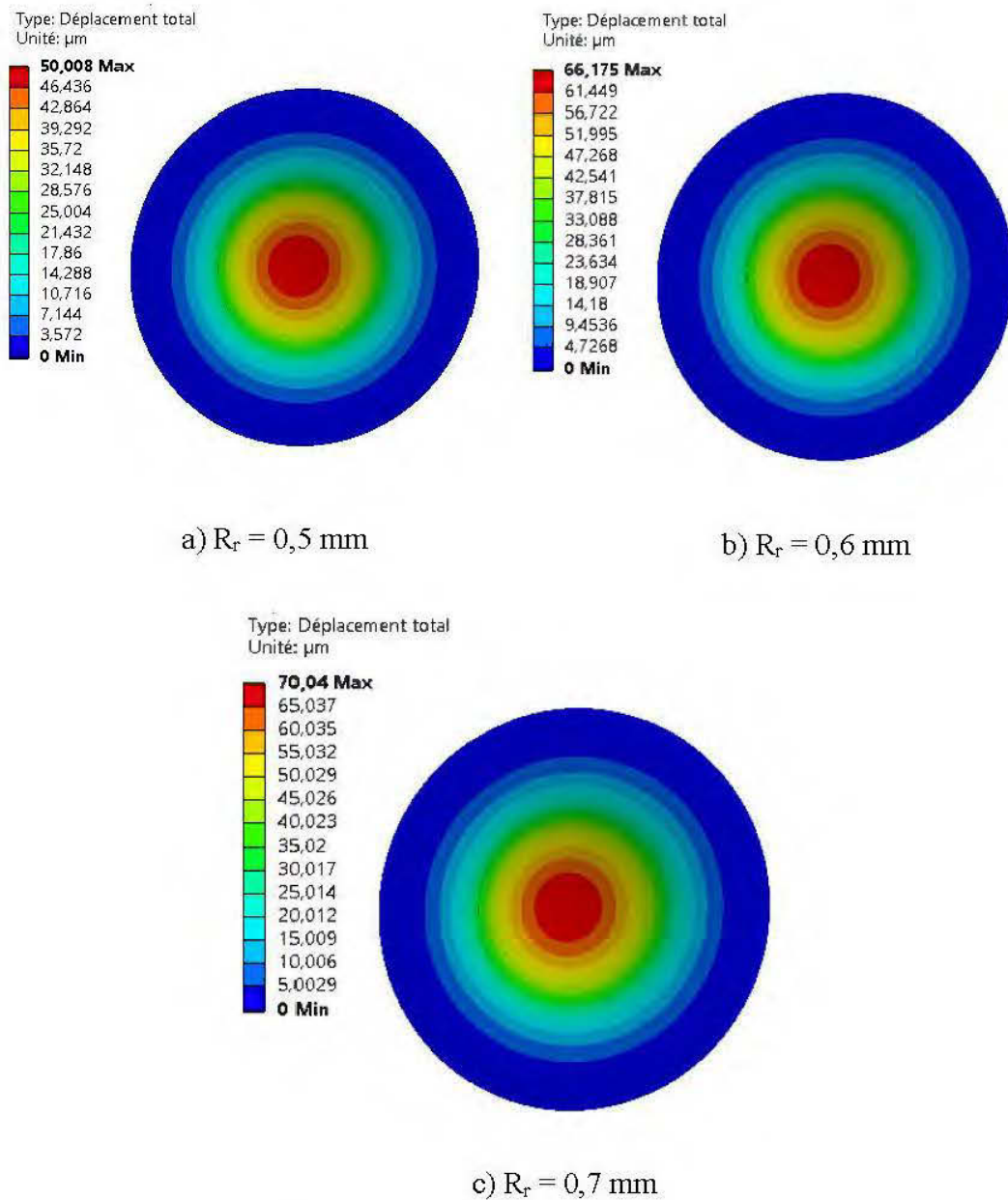


Figure 7.5: Contours de déflexion de la membrane en verre de borosilicate pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,1$  mm et  $E_m = 0,05$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

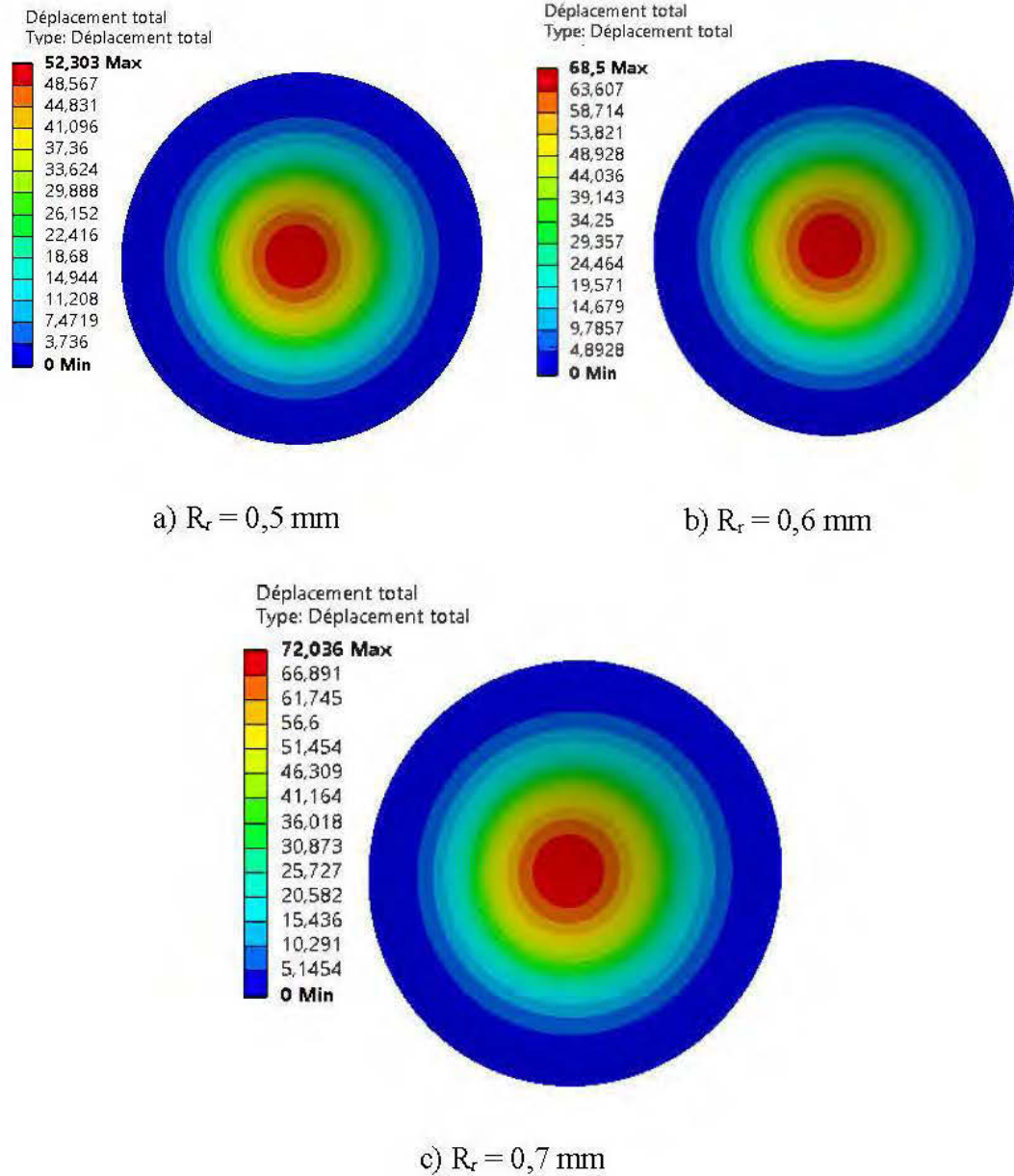


Figure 7.6: Contours de déflexion de la membrane en aluminium pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,1$  mm et  $E_m = 0,05$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

### 7.2.2 Effet de la tension électrique et du rapport de rayon sur la déflexion de la membrane

Cette analyse se concentre sur la variation de l'épaisseur du disque piézoélectrique de 0,1 mm à 0,05 mm du silicium, du verre de borosilicate et de l'aluminium afin d'examiner son effet sur la déflexion de la membrane en PZT. Ainsi, une augmentation significative de la déflexion est observée dans les Figures 7.7-7.9 avec un rapport de rayon de 0,7. Celle-ci est due à la diminution de l'épaisseur des disques piézoélectriques ( $E_p$ ). Cela peut s'expliquer par l'actionnement d'une couche piézoélectrique ultramince qui permet d'augmenter le champ électrique à basse tension. Dans le Tableau 7.5, le plus petit coefficient de détermination est 0,9798 ; cette valeur est proche de 1, de sorte que le lien statistique est très linéaire. Si en remplaçant  $x$  par 100 V dans l'équation de la droite de régression liée à cette valeur de détermination, la prédiction de la déflexion de la membrane PZT devient 223,29  $\mu\text{m}$ , de ce fait, la comparaison entre la valeur obtenue par la droite de régression et celle de la simulation sur ANSYS qui est 215,2  $\mu\text{m}$  génère un écart de 3,76 %, cela peut indiquer que la droite est proche de l'ensemble du nuage de points de déflexion.

Tableau 7.5: Coefficients de détermination et droite de régression des trois Figures 7.7-7.9

Figures	Rapport du rayon	Coefficient de détermination	La droite de régression linéaire
<b>Figure 7.7</b>	0,5	0,9994	$Y = 1,9827x + 7,704$
	0,6	0,9994	$Y = 1,946x + 3,8$
	0,7	1	$Y = 1,8145x$
	0,5	0,998	$Y = 1,5879x + 50,01$

<b>Figure 7.8</b>	0,6	0,9952	$Y = 1,808x + 20,96$
	0,7	1	$Y = 1,8407x + 0,12$
<b>Figure 7.9</b>	0,5	1	$Y = 1,8556x - 0,069$
	0,6	0,9959	$Y = 1,92x + 16,34$
	0,7	0,9694	$Y = 1,607x + 63,2$

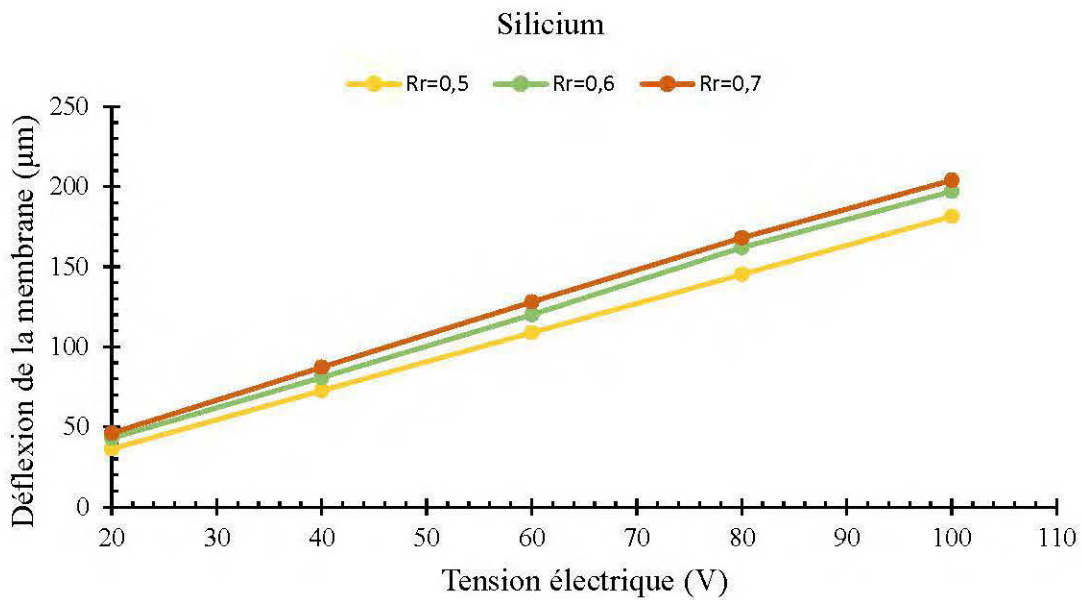


Figure 7.7: Déflexion de la membrane piézoélectrique en fonction de la tension électrique à une épaisseur de la membrane de 0,05 mm et de disque piézoélectrique de 0,05 mm (rapport de rayon: 0,5 ; 0,6 et 0,7)



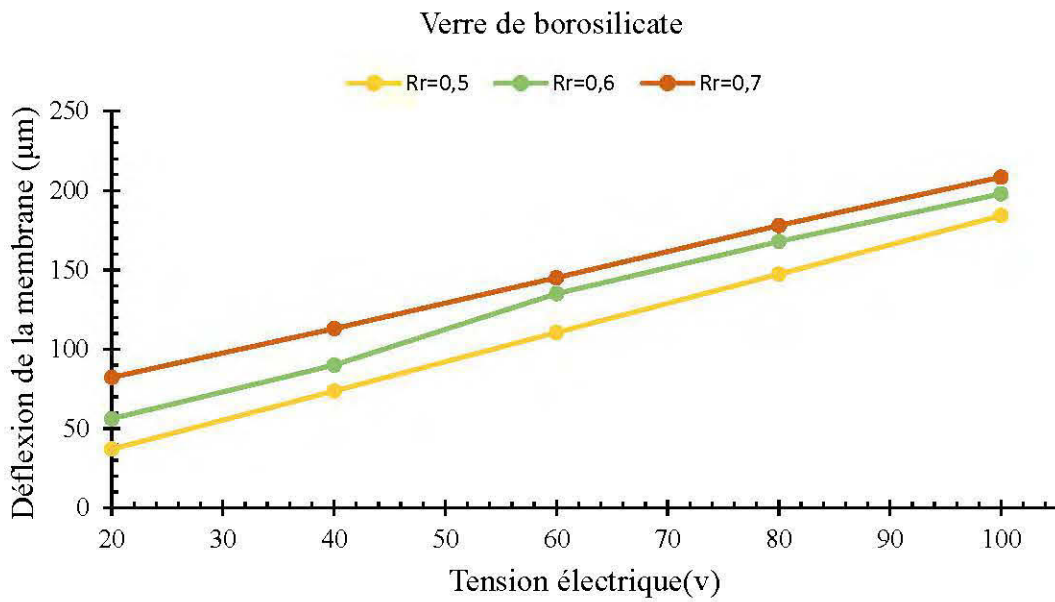


Figure 7.8: Déflexion de la membrane piézoélectrique en fonction de la tension électrique à une épaisseur de la membrane de 0,05 mm et du disque piézoélectrique de 0,05 mm (rapport de rayon: 0,5 ; 0,6 et 0,7)

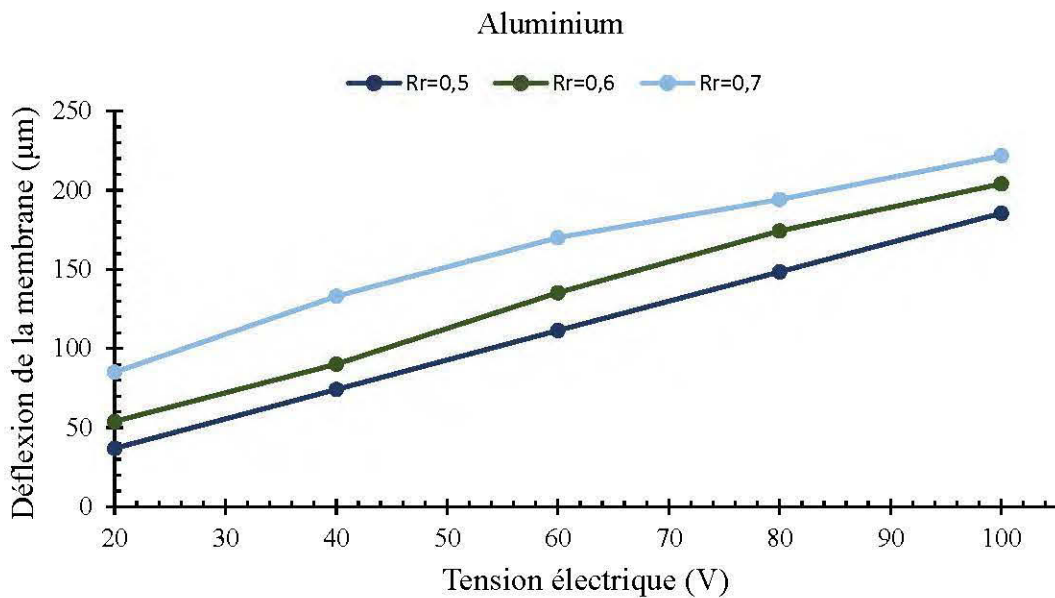


Figure 7.9: Déflexion de la membrane piézoélectrique en fonction de la tension électrique à une épaisseur de la membrane de 0,05 mm et du disque piézoélectrique de 0,05 mm (rapport de rayon: 0,5 ; 0,6 et 0,7)

Les Figures 7.10-7.12 représentent les contours de déflexion de la membrane PZT en fonction de son épaisseur et de la tension d'actionnement. On constate par ailleurs que l'aluminium réagit plus rapidement avec la tension électrique que le silicium et le verre de borosilicate, peu importe l'épaisseur du disque piézoélectrique ou le rapport de rayon. En plus de cela, une déflexion de la membrane de 215,2 µm a été observée, cette augmentation est très significative pour avoir un débit très élevé.

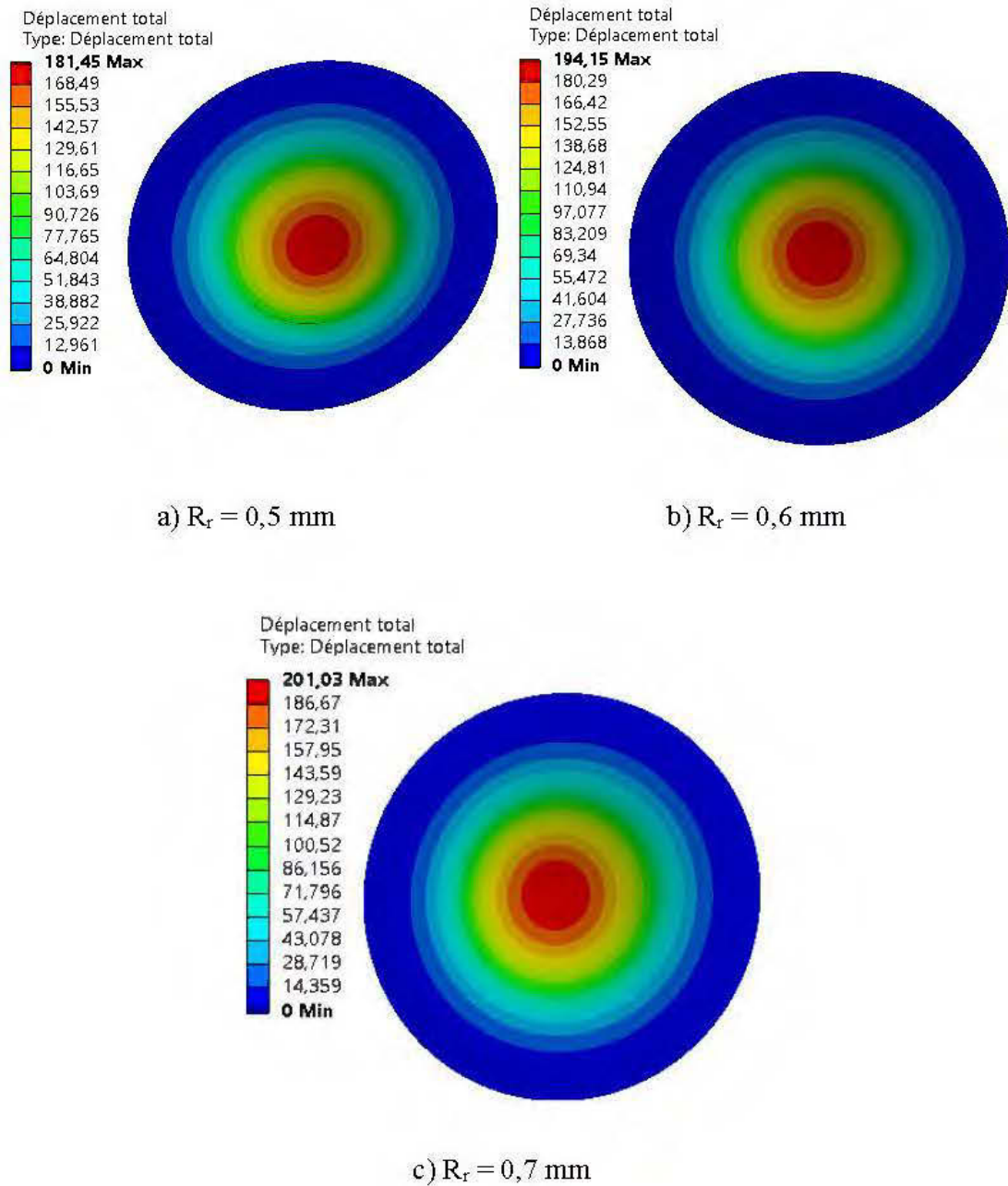


Figure 7.10: Contours de déflexion de la membrane en silicium pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,05$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

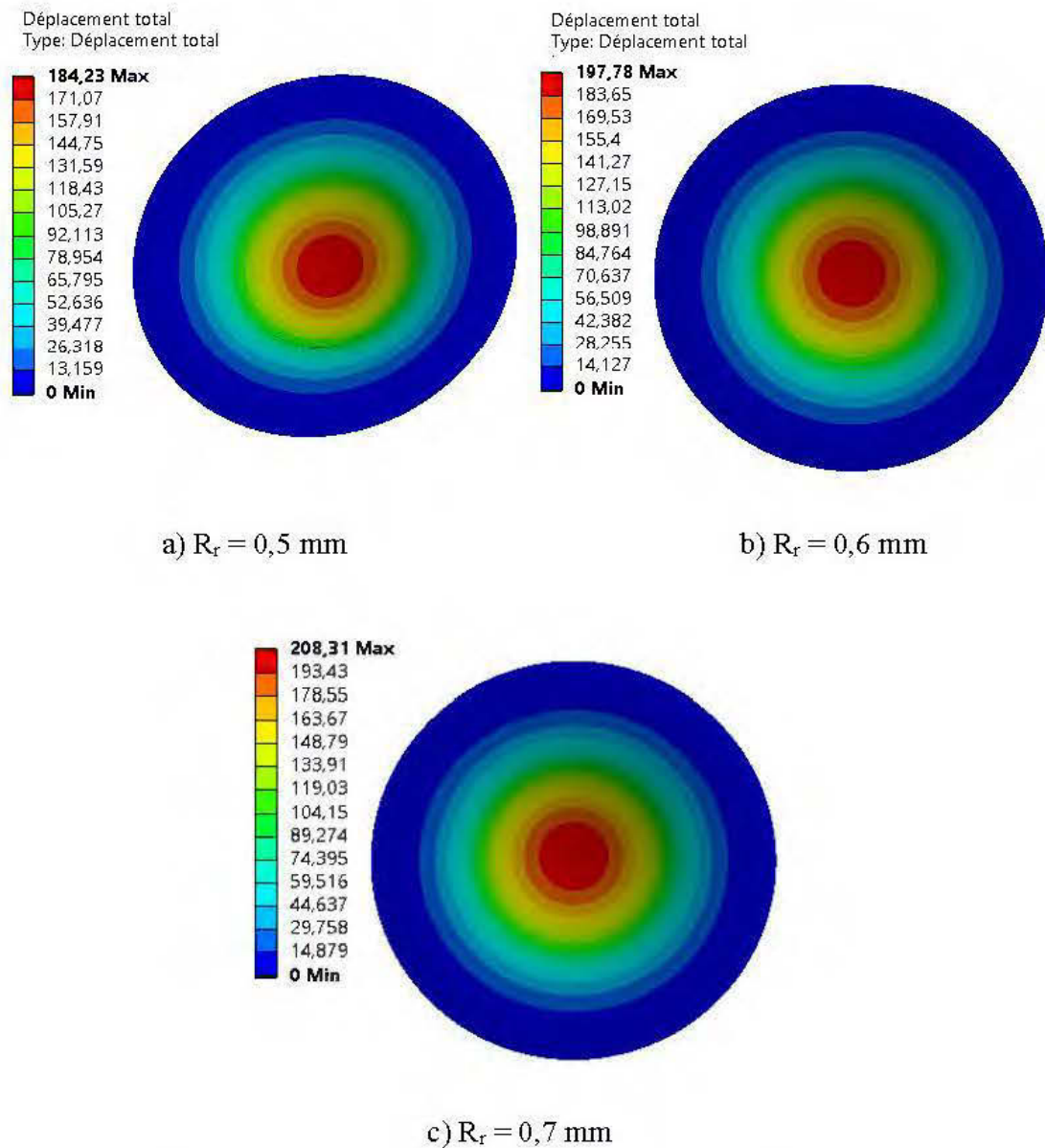


Figure 7.11: Contours de déflexion de la membrane en verre de borosilicate pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,05$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

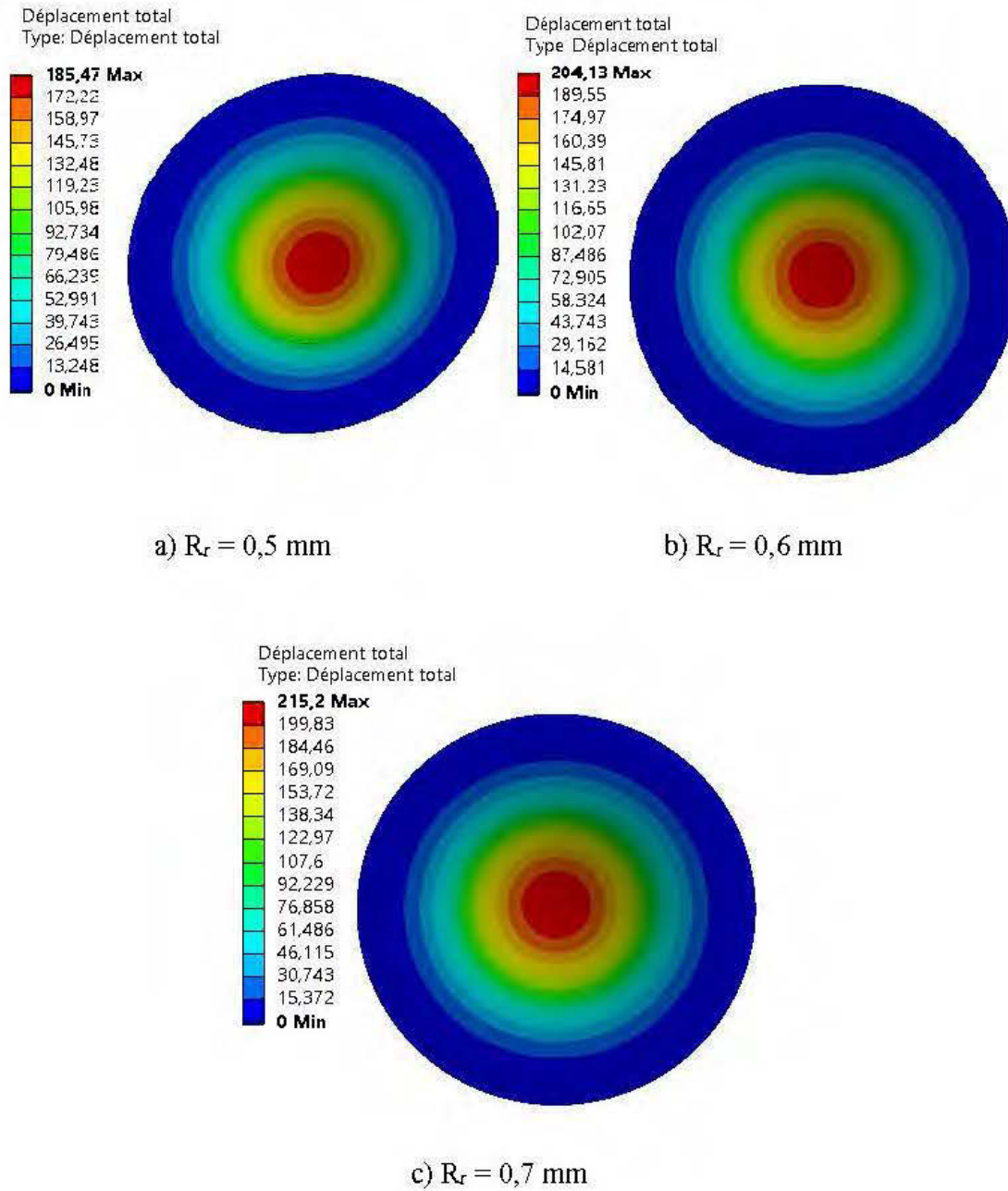


Figure 7.12: Contours de déflexion de la membrane en aluminium pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,05$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

### 7.2.3 Effet de la tension électrique et du rapport de rayon sur la déflexion de la membrane PZT

Les Figures 7.13-7.15 représentent les résultats des simulations d'une membrane plus épaisse en silicium, en verre borosilicate et en aluminium. Dans cette simulation, l'épaisseur de la membrane a été changée de 0,05 mm à 0,1 mm. La déflexion de la membrane accroît avec l'augmentation du rapport de rayon. Par conséquent, plus le rapport de rayon est grand, plus l'actionnement piézoélectrique est élevé. Il y a également une grande différence de déflexion entre les résultats obtenus avec la membrane en aluminium et ceux du silicium, et du verre borosilicate. En somme, la déflexion de la membrane en l'aluminium peut atteindre une valeur de 236  $\mu\text{m}$  s'il y a un accroissement du rapport de rayon et si la membrane a une épaisseur supérieure à celle du disque piézoélectrique. Cela est justifié par le fait que l'actionnement d'une pièce ultramine peut générer un champ électrique et un fort déplacement mécanique, ces deux derniers ont des impacts sur le coefficient piézoélectrique qui est utilisé pour avoir une déflexion remarquable. Le Tableau 7.6 indique que la moyenne du coefficient de détermination pour les trois Figures est de 0,9781, de sorte que la relation statique entre les deux variables est suffisamment linéaire pour que si la tension augmente, la déflexion croît, il faut mentionner que les droites de régression existant au Tableau 7.6 permettent de prévoir facilement la magnitude de la déviation à toute tension électrique.

Tableau 7. 6: Coefficients de détermination et droite de régression des trois Figures 7.13-7.15

Figures	Rapport du rayon	Coefficient de détermination	La droite de régression linéaire
	0,5	0,999	$Y = 2,0435x - 0,76$
<b>Figure 7.13</b>	0,6	0,9917	$Y = 1,813x + 35,916$

	0,7	0,9797	$Y = 1,8285x + 47,949$
	0,5	0,9944	$Y = 2,0282x + 9,684$
<b>Figure 7.14</b>	0,6	0,9798	$Y = 1,8374x + 41,514$
	0,7	0,9694	$Y = 1,8991x + 55,06$
	0,5	0,9604	$Y = 1,995x + 26,3$
<b>Figure 7.15</b>	0,6	0,9481	$Y = 1,831x + 49,96$
	0,7	0,9572	$Y = 1,8666x + 58,836$

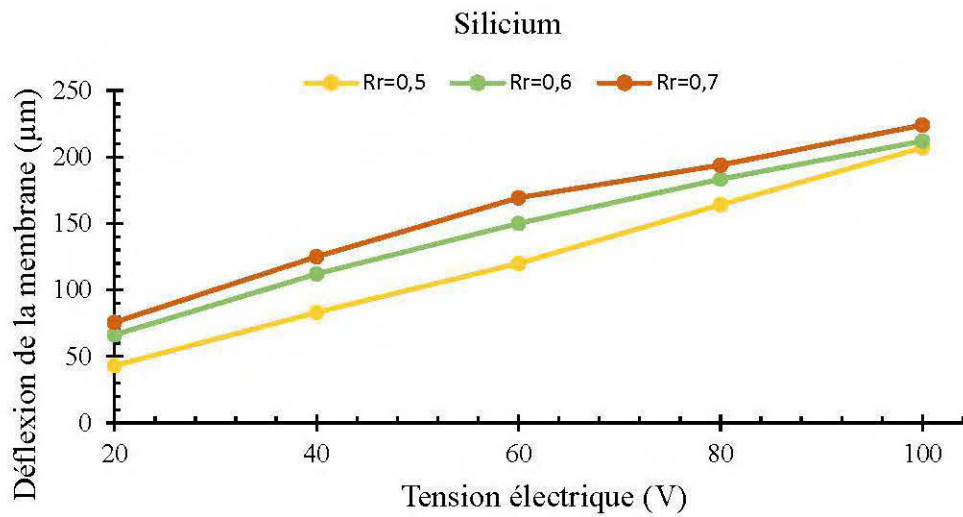


Figure 7.13: Déflexion de la membrane pour une tension de 0 V-100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,1$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

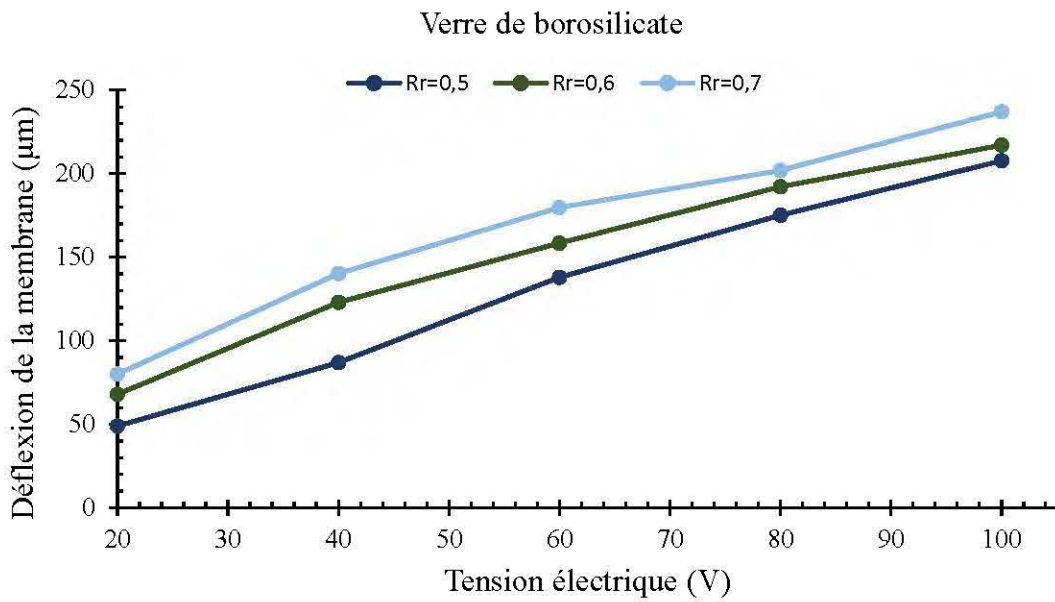


Figure 7.14: Déflexion de la membrane pour une tension de 0 V-100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,1$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre



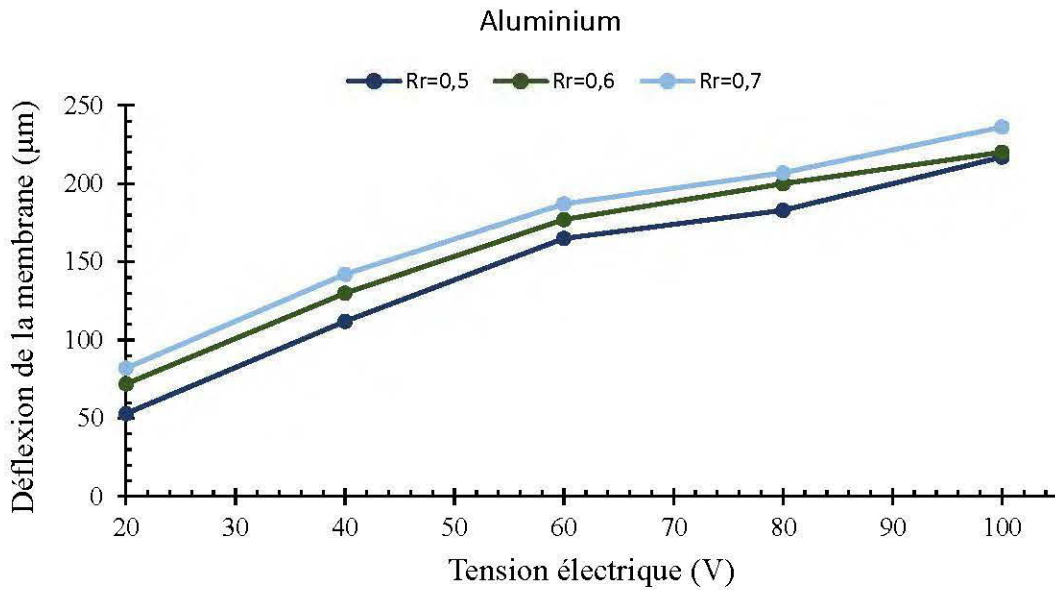


Figure 7.15: Déflexion de la membrane pour une tension de 0 V-100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,1$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

Pour la composante de l'aluminium, qu'il soit actionné par une grande ou par une petite tension électrique, se déforme plus rapidement que le silicium et que le verre de borosilicate, grâce à sa bonne conductivité électrique et à sa malléabilité. Pour une épaisseur de membrane supérieure à celle du disque piézoélectrique et pour une tension de 100 V, la meilleure déflexion a été obtenue, ce qui est très intéressant pour augmenter la pression de sortie de la micropompe PZT. Cet effet est d'ailleurs présenté dans les 7.16-7.18.

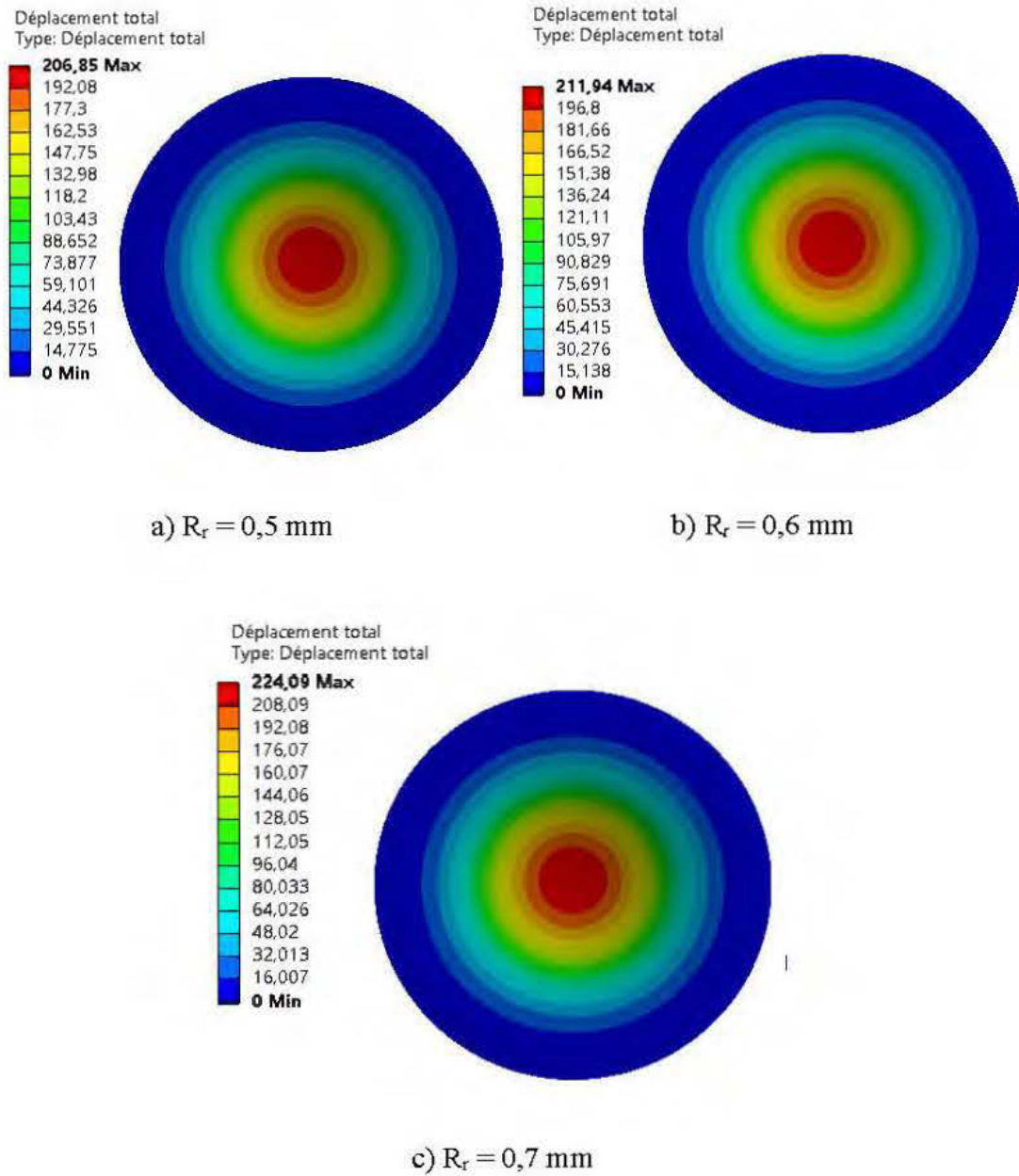


Figure 7.16: Contours de déflexion de la membrane en silicium pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,05 \text{ mm}$  et  $E_m = 0,1 \text{ mm}$  avec le rapport de rayon comme paramètre

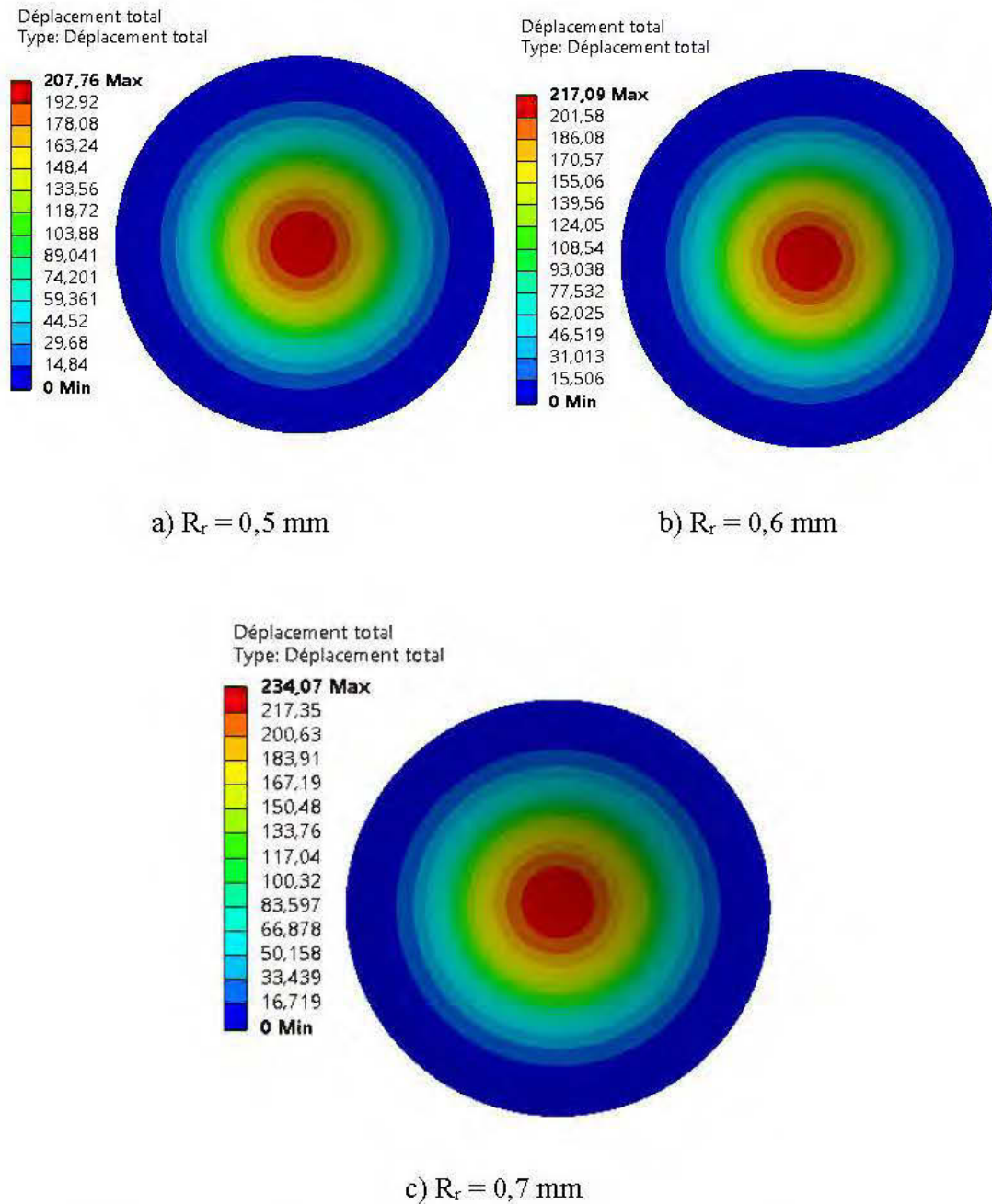


Figure 7.17: Contours de déflexion de la membrane en verre de borosilicate pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,1$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

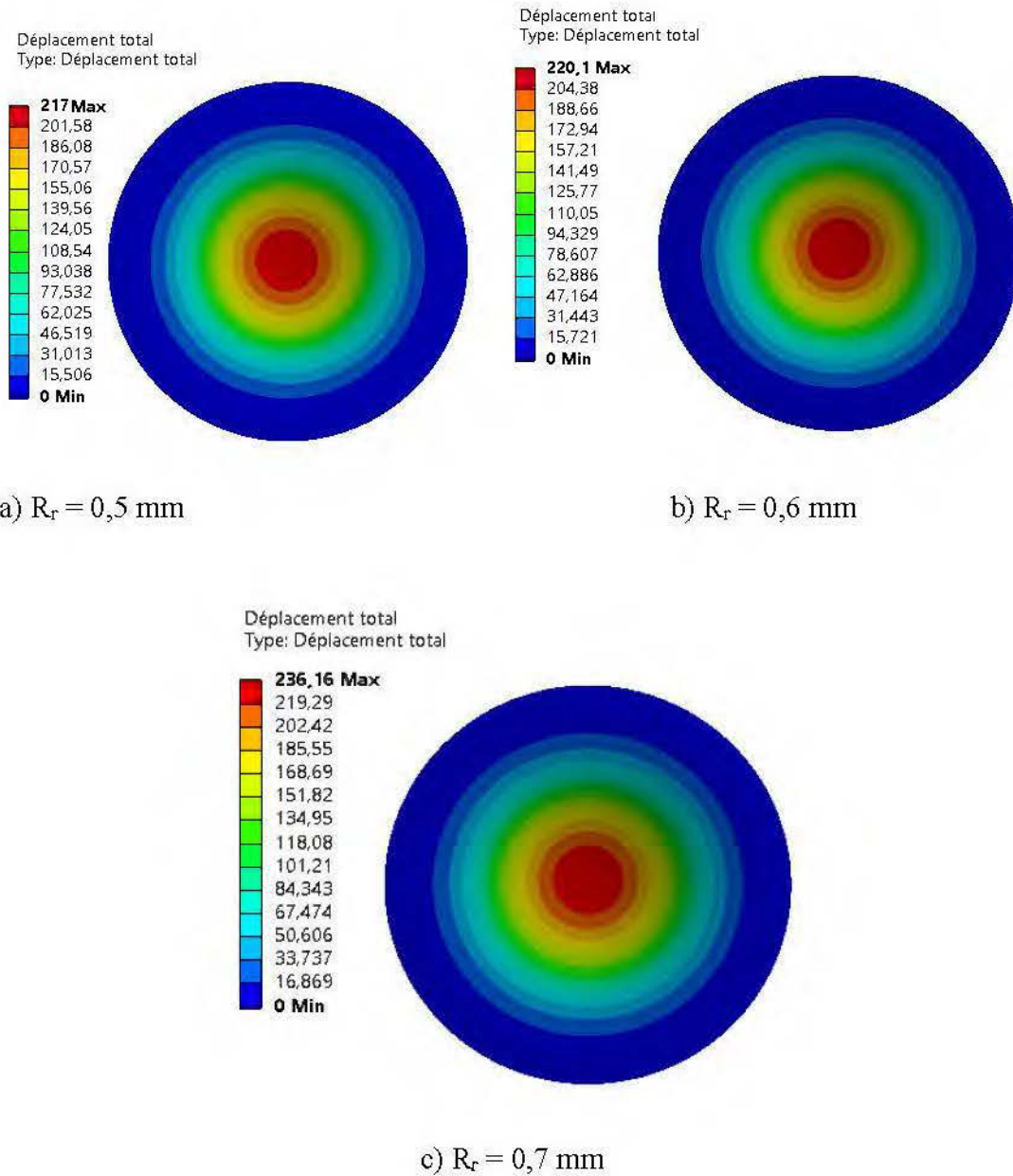


Figure 7.18: Contours de déflexion de la membrane en aluminium pour une tension de 100 V à  $E_p = 0,05$  mm et  $E_m = 0,1$  mm avec le rapport de rayon comme paramètre

### **7.3 Effet de la tension électrique avec différentes épaisseurs pour un rapport de rayon constant sur la déflexion de la membrane PZT**

Il est noté dans les résultats de simulation de la section 7.2 que la déflexion maximale a été obtenue lorsque la valeur du rapport de rayon est de 0,7. Dans cette simulation, le rapport de rayon est fixé à 0,7 et les épaisseurs des disques piézoélectriques et de la membrane ont été variés pour examiner son effet sur l'actionnement et la flexion des trois matériaux (silicium, aluminium et verre borosilicate).

Dans les Figures 7.19-7.20, le rapport de rayon a été fixé à 0,7. La déflexion de la membrane pour  $E_m > E_p$  est beaucoup plus élevée que pour  $E_m < E_p$ . Cependant, la valeur de déflexion augmente avec l'accroissement de l'épaisseur de la membrane, lorsque  $E_m > E_p$ , la déflexion produite à une tension électrique de 100 V est de 224,11  $\mu\text{m}$  pour le silicium, de 234  $\mu\text{m}$  pour le verre borosilicate et de 236  $\mu\text{m}$  pour l'aluminium. Ceci fait que les tenseurs de contraintes mécaniques et les déformations sont liés à la rigidité de la pièce actionnée et du support. Il est également constaté que le matériau joue un rôle majeur dans la variation de la flexion. Ainsi, la déflexion maximale obtenue dans cette simulation est réalisée en aluminium en raison de sa conductibilité électrique élevée.

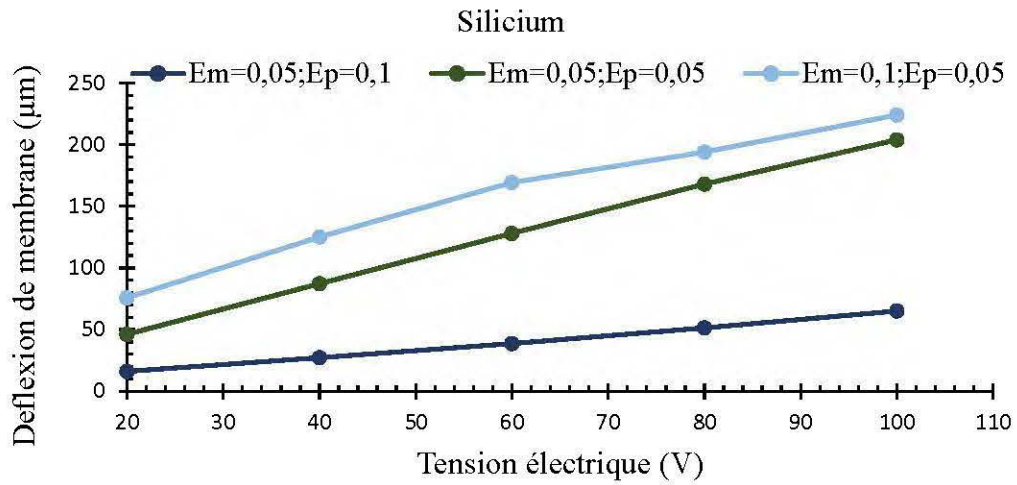


Figure 7.19: Déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique à un rapport de rayon fixe de 0,7 et des épaisseurs de la membrane et du disque comme paramètres

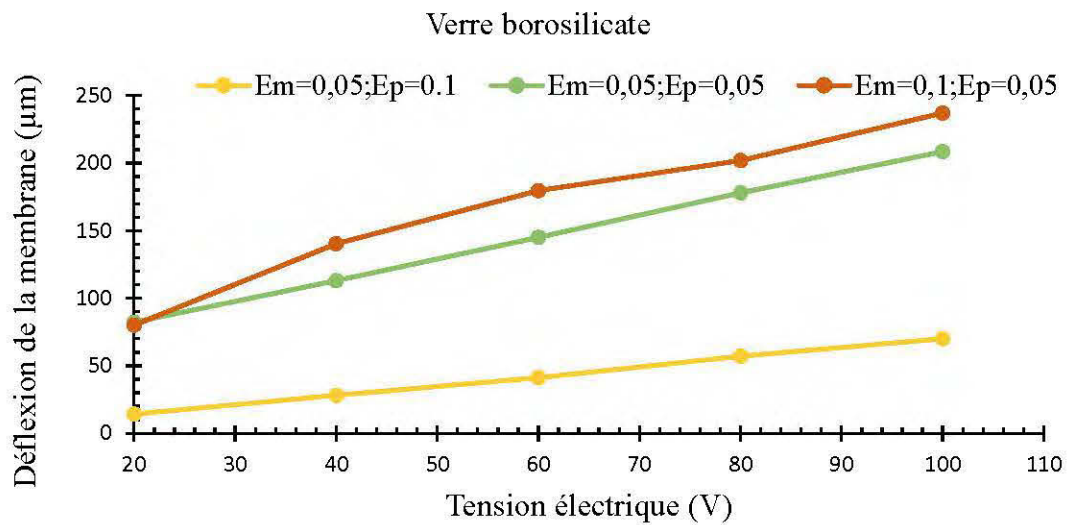


Figure 7.20: Déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique à un rapport de rayon fixe de 0,7 et des épaisseurs de la membrane et du disque comme paramètres

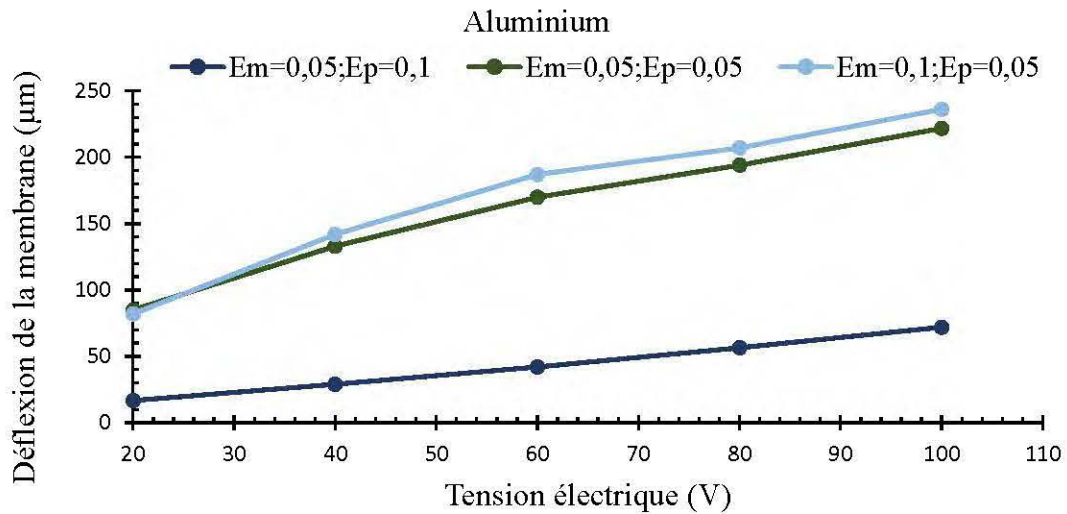


Figure 7.21: Déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique à un rapport de rayon fixe de 0,7 et des épaisseurs de la membrane et du disque comme paramètres

#### 7.4 Effet du débit volumique et de l'angle des microvalves sur la variation de pression de la micropompe PZT

La Figure 7.22 montre la variation de pression en fonction du débit volumique et de l'angle des microvalves. De ce fait, plus l'angle augmente, plus la différence de pression augmente progressivement avec l'accroissement du débit. Avec un débit de 400 µl/min et avec un angle de 20°, la différence de pression est de 8 699,2 Pa. Ceci est dû à la réduction du coefficient de conductivité qui est proportionnel à l'angle des microvalves, ce qui génère une forte augmentation de pression.

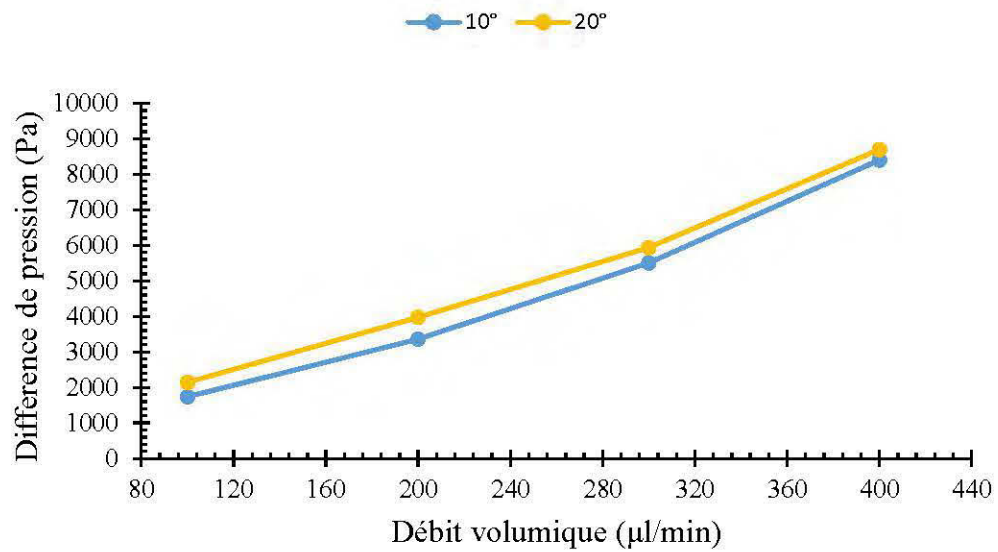


Figure 7.22: Différence de pression en fonction du débit volumique et de l'angle des microvalves

En outre, la Figure 7.23 indique les contours de pression pour un angle de 10°. En fait, l'augmentation de la différence de pression est proportionnelle au débit d'entrée de la micropompe et aux dimensions de la microvalve.



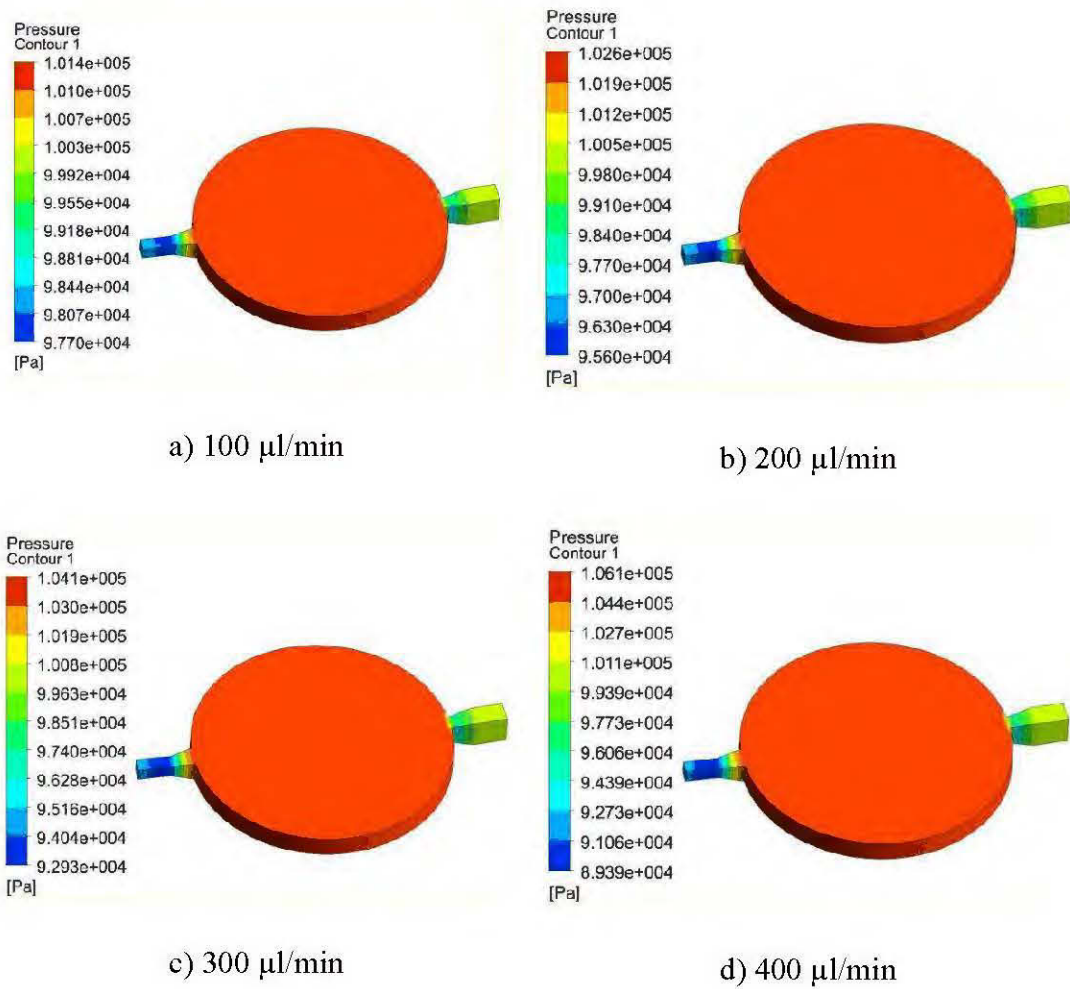


Figure 7.23: Contours de la pression pour un angle de  $10^\circ$  à différents débits

Par ailleurs, la Figure 7.24 indique les contours de pression à un angle de  $20^\circ$  en fonction d'un débit volumique de 100 µl/min à 400 µl/min. La différence de pression est plus importante dans une microvalve d'angle de  $20^\circ$  que de  $10^\circ$ . À cet effet, l'angle de  $20^\circ$  a été considéré comme l'angle d'étude pour la micropompe à deux chambres.

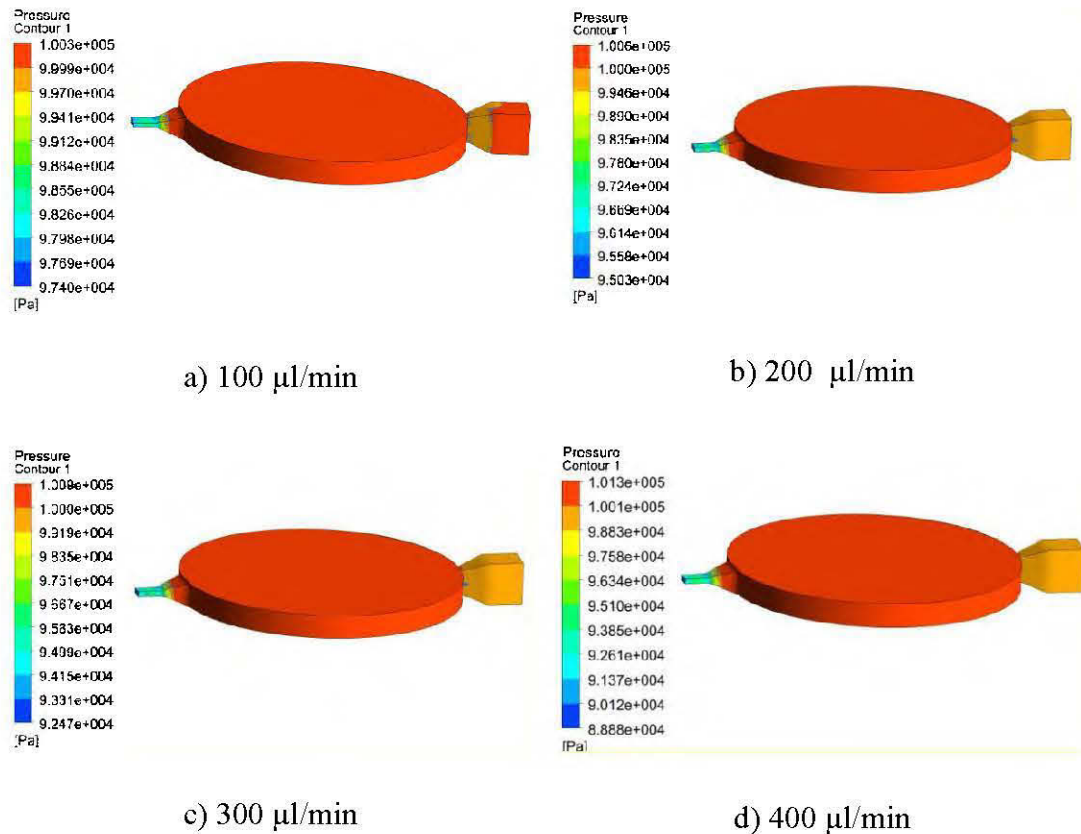


Figure 7.24: Contours de la pression pour un angle de 20° à différents débits

### 7.5 Effet du débit volumique sur la différence de pression pour une micropompe PZT à une chambre et avec deux chambres

Dans la simulation précédente d'une micropompe à chambre unique, il est apparu que la différence de pression est plus élevée pour un angle de 20°, sur la base des résultats de l'ancienne simulation, cette étude a débuté. Pour cette raison, dans la Figure 7.25, l'angle des microvalves est maintenu à 20°, en faisant varier le nombre de chambres et le débit volumique pour obtenir leur influence sur la pression. Pour la Figure 7.25, la différence de pression d'une micropompe à deux chambres a été augmentée à 19794,5 Pa avec un débit volumique de 400 µl/min. En outre, il existe une grande différence

entre les valeurs de pression d'une seule chambre et celles de deux chambres. Ceci est dû à une augmentation du nombre de chambres de sorte que la pression de sortie croît et que la section transversale des canaux est plus grande que la section de la rainure du diffuseur.

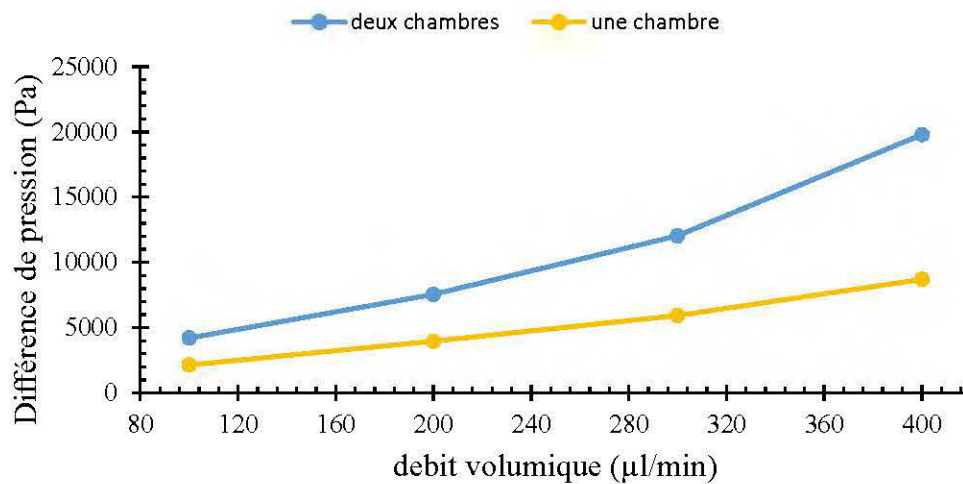


Figure 7.25: Différence de pression en fonction du débit volumique pour une micropompe à une chambre et avec deux chambres pour angle de 20°

Par ailleurs, les Figures 7.26-7.27 montrent les contours de pression de la micropompe PZT à deux chambres pour des débits de 100 µl/min et 400 µl/min respectivement. D'après les résultats de simulation sur ANSYS-CFX, l'augmentation de la pression est proportionnelle au débit volumique et les dimensions des microvalves.

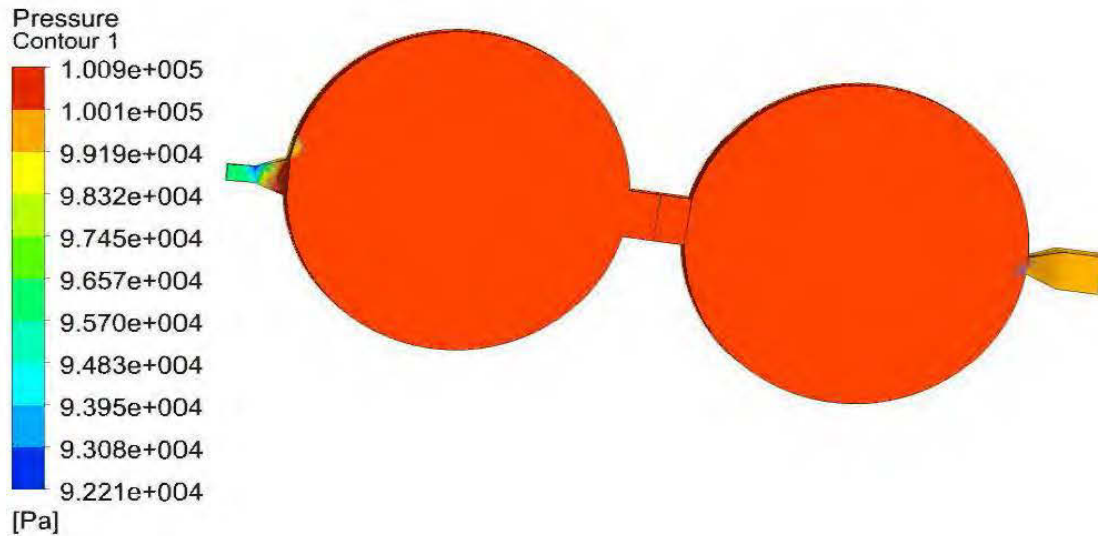


Figure 7.26: Contours de la pression pour un débit de 100  $\mu\text{l}/\text{min}$

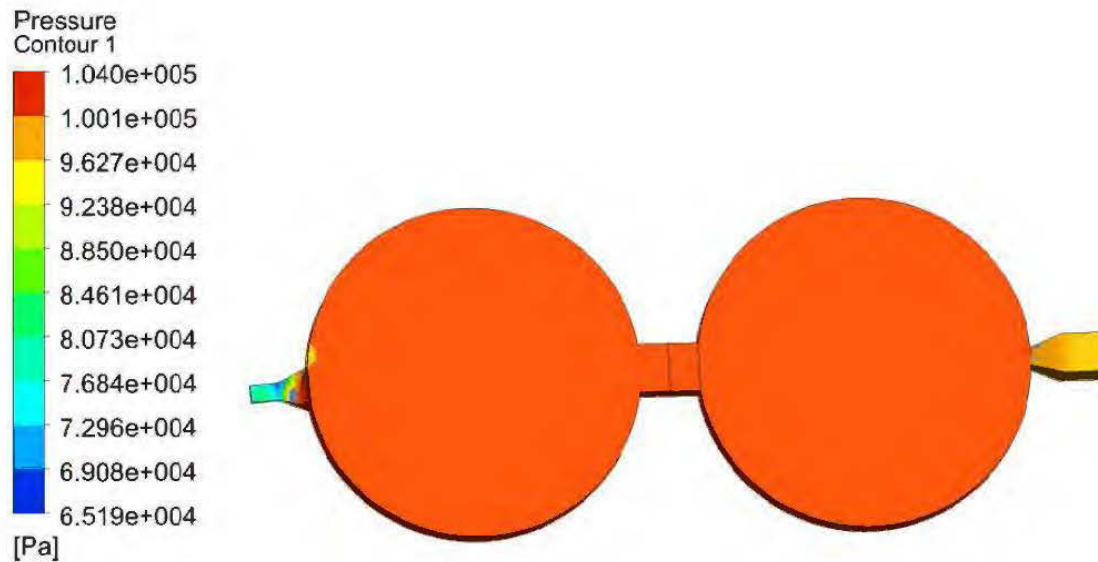


Figure 7.27: Contours de la pression pour un débit de 400  $\mu\text{l}/\text{min}$  d'une micropompe à deux chambres

## 7.6 Effet du débit volumique et de l'angle des microvalves sur la puissance de la micropompe PZT a une chambre.

La Figure 7.28 montre que la puissance augmente avec l'augmentation du débit volumique et avec de l'angle des microvalves. Ceci est dû à l'angle d'ouverture des microvalves et à la variation de pression. Notons également qu'à un débit de 400  $\mu\text{l}/\text{min}$  et un angle de  $10^\circ$ , la puissance est de  $5,6 \times 10^{-5}$  W, pour un angle de  $20^\circ$  à un débit de 400  $\mu\text{l}/\text{min}$ , la puissance est de  $5,8 \times 10^{-5}$  W. Il est également constaté que la différence entre la puissance de la micropompe à  $10^\circ$  et à  $20^\circ$  est faible, elle est de 3,57 % [15]. Il faut considérer cette déviation et ensuite simuler une micropompe à deux chambres avec un angle de microvalve de  $20^\circ$ .

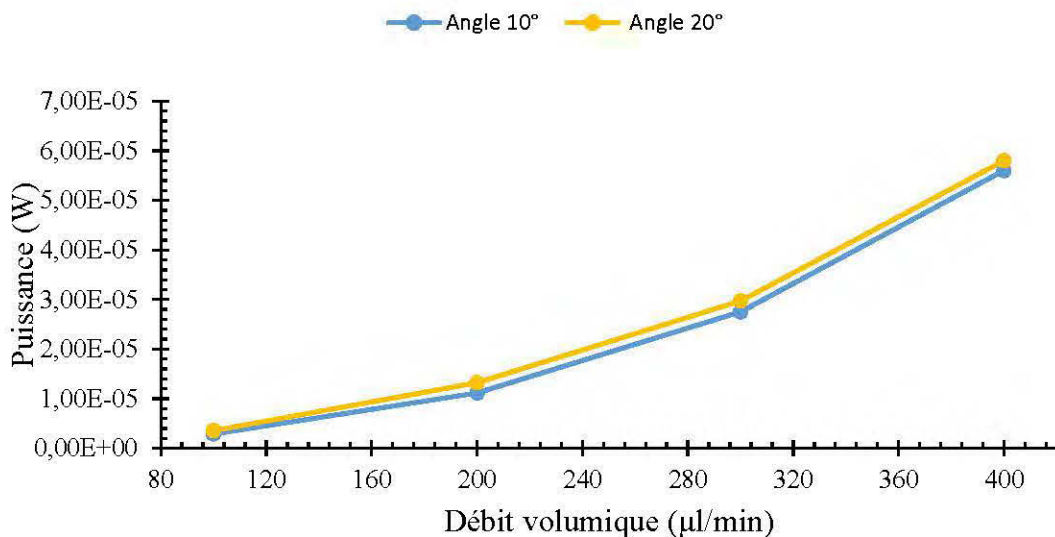


Figure 7.28: Puissance de la micropompe en fonction du débit volumique et de l'angle des microvalves

### 7.7 Effet du débit volumique à un angle de 20° des microvalves sur la puissance de la micropompe à une ou deux chambres PZT.

La Figure 7.29 montre que la puissance est suffisamment élevée pour une micropompe multichambre avec le même débit que la micropompe monochambre. Cependant, la puissance d'une micropompe à deux chambres est plus de deux fois supérieure à celle d'une micropompe à une chambre. Avec un débit de 400  $\mu\text{l}/\text{min}$ , la puissance d'une micropompe multichambre est de  $1,32 \times 10^{-4}$  W, alors que pour une micropompe monochambre, elle est de  $5,8 \times 10^{-5}$  W. Ceci est dû à la modification de la section transversale de la rainure du diffuseur des deux chambres et à l'augmentation de la pression de sortie.

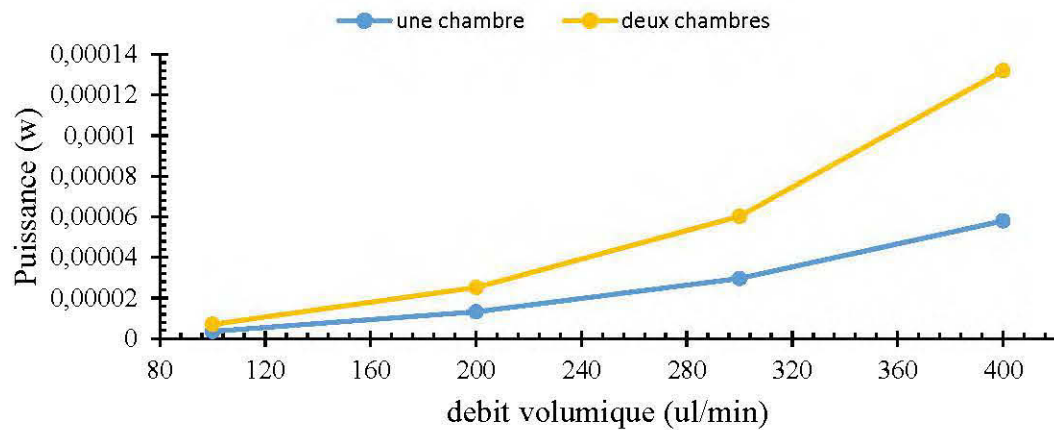


Figure 7.29: Puissance en fonction du débit volumique pour une micropompe à une chambre à deux chambres avec un angle de microvalve de 20°.

## CHAPITRE 8

### VALIDATION DES RÉSULTATS

Pour comparer les modèles développés avec les modèles de référence [9, 37]. Il est nécessaire de concevoir chaque composant de la micropompe PZT afin de lancer les simulations puis de valider les résultats avec tous ceux qui publient dans la littérature. C'est pour cette raison que cette étape a été un point critique dans ce travail. C'est pour cela aussi que cette première comparaison des résultats de la déflexion de la membrane PZT obtenue par le code ANSYS-Piezo et MEMS a été faite par différents rapports du rayon allant de 0,5-0.7. Cette analyse visait à analyser l'influence du rapport de rayon sur les résultats de déflexion et en même temps à rechercher le rapport du rayon utilisé à la référence [9], En fait, c'est l'information qui manquait dans sa recherche. Par ailleurs, la validation des résultats a également été effectuée par du verre borosilicaté et le même matériau existe à la référence [9]. De ce fait, la comparaison des résultats est basée sur les données de référence qui sont, entre autres, la déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique de même que l'épaisseur de la membrane et du disque piézoélectrique avec un autre paramètre: le rapport rayon.

Dans la deuxième validation, il y avait également un manque de données dans la référence [37], l'angle des microvalves n'était pas mentionné. Par conséquent, la validation de l'effet du débit sur la variation de pression a été effectuée avec un angle de  $10^\circ$  et avec un angle de  $20^\circ$ .

### **8.1 Comparaison des résultats de la déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique, des épaisseurs de la membrane et du disque piézoélectrique, et du rapport de rayon avec la référence [9]**

Pour valider les résultats de la membrane piézoélectrique, les résultats obtenus des prototypes numériques de la membrane PZT en 3D qui ont été simulés à l'aide de ANSYS-Piézo and MEMS ont été comparés avec la référence [9]. Dans cette validation, il est question de vérifier le point d'influence des paramètres de la membrane (son rayon et son épaisseur), des paramètres du disque piézoélectrique (son rayon et son épaisseur), la tension électrique et le rapport du rayon sur la déflexion de la membrane Piézoélectrique. Il est noté à la Figure 8.1 que la différence entre la référence [9] et les résultats de simulation pour un rapport de rayon 0,7 et une tension électrique de 100 V est de 40 %, cette différence est réduite avec la diminution du rapport de rayon de sorte qu'à un rapport de rayon de 0,6 l'écart est de 32,32 %. Toutefois, pour un rapport du rayon 0,5, le coefficient de corrélation est de 0,999, ce qui signifie que les résultats de notre étude et ceux de la référence [9] varient de la même manière avec l'augmentation de la tension électrique. Ceci pourrait expliquer par le fait que le rapport de rayon retenu dans la référence [9] est vraisemblablement de 0,5. Il est également observé, pour un ratio de rayon de 0,7, qu'il y a une grande déflexion à basse tension comparativement à une déflexion pour un ratio de rayon de 0,5. Ceci est dû au fait que le moment de flexion interne de la membrane  $M_z$  est proportionnel au rapport du rayon.



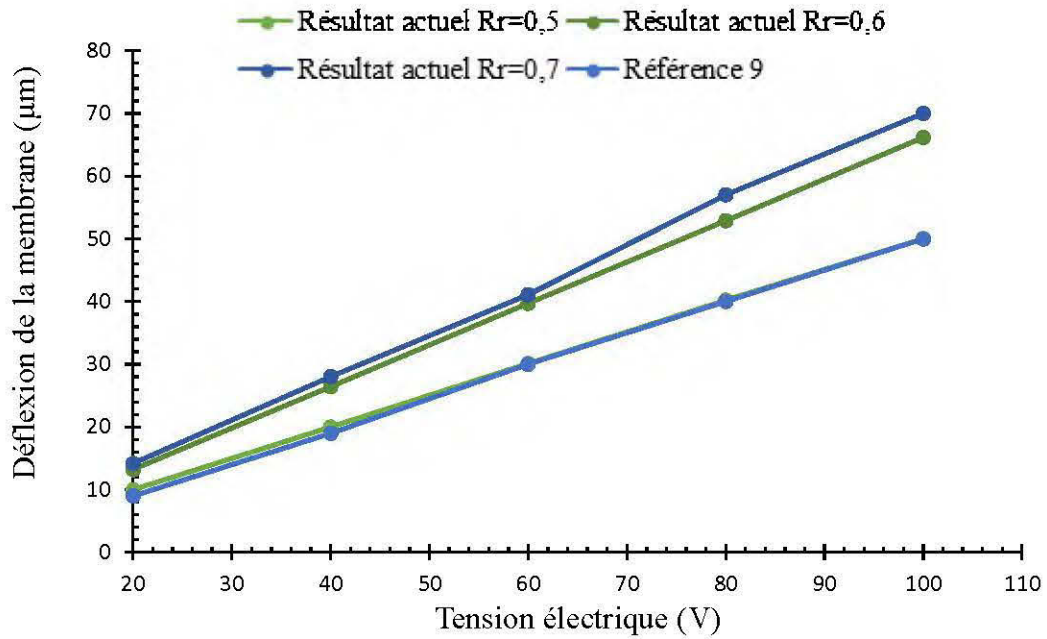


Figure 8.1: Déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique à un rapport de rayon de 0,5; 0,6; 0,7 pour  $E_m = 0,05$  mm et  $E_p = 0,1$  mm

En outre, dans la Figure 8.2-8.3, le coefficient de corrélation obtenu entre les résultats des simulations actuelles et ceux de la référence [9] à un ratio du rayon 0,5 est de 0,99. Cette valeur confirme que les résultats de la simulation suivent la tendance du résultat de référence [9]. Autrement dit, les écarts entre les courbes étaient très significatifs dans le rapport de rayon de 0,6-0,7 pour une tension électrique de 100 V, et ceci pourrait expliquer que les simulations de référence [9] ont été basées sur un ratio de rayon de 0,5.

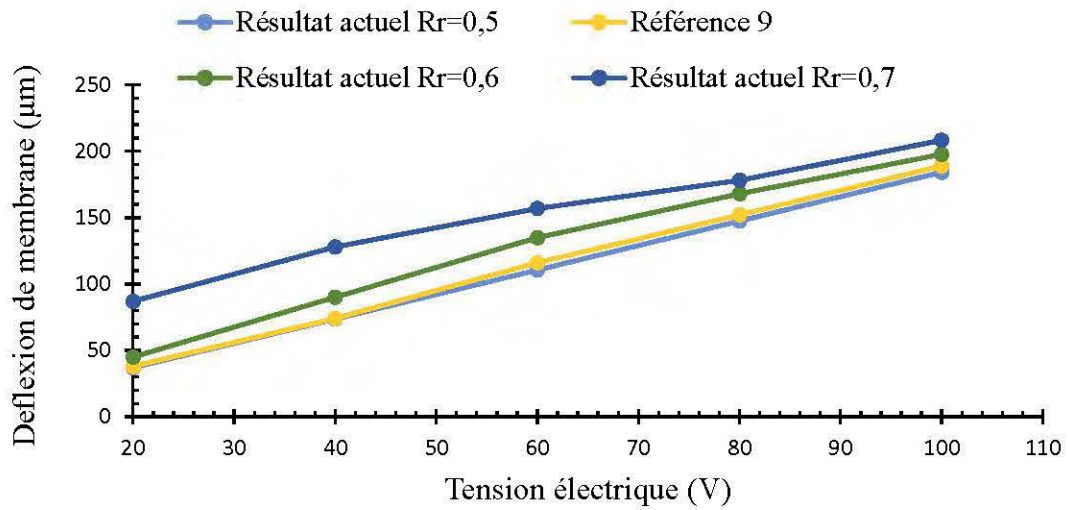


Figure 8.2: Déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique à un rapport de rayon de 0,5; 0.6; 0.7 pour  $E_m = 0,05$  mm et  $E_p = 0,05$  mm

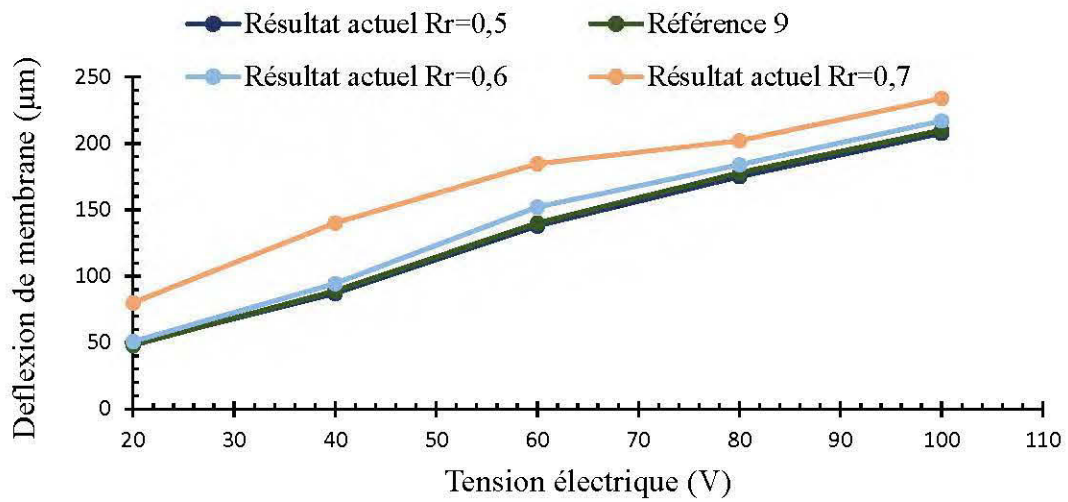


Figure 8.3: Déflexion de la membrane en fonction de la tension électrique à un rapport de rayon de 0,5; 0.6; 0.7 pour  $E_m = 0,1$  mm et  $E_p = 0,05$  mm

## 8.2 Comparaison des résultats d'écoulement de fluide d'une micropompe à une seule chambre

Dans le but de valider les résultats de la micropompe piézoélectrique, les résultats obtenus par le modèle 3D modélisé et simulé sur SolidWorks et ANSYS-CFX ont été comparés avec ceux du modèle de référence [37]. Dans cette validation, il s'agit de vérifier le point d'influence des paramètres de la microvalve et du débit d'entrée sur la variation de pression. Il s'agit également de rechercher l'angle des microvalves manquantes dans les données du [37]. Pour cela, la comparaison a été faite avec deux angles, l'un de  $10^\circ$  et l'autre de  $20^\circ$  dans une marge de différence de pression entre 0 à 10000 Pa. Cependant, le coefficient de corrélation dans la Figure 8.4 à un débit de 400  $\mu\text{l}/\text{min}$  est de 0,9994. En fait, cette valeur confirme que la courbe de cette étude suit la tendance de la courbe de référence [37]. De ce fait, les simulations de la référence [37] seraient basées sur un angle de  $10^\circ$ . Par ailleurs, dans la Figure 8.5, la différence entre les courbes pour un débit de 400  $\mu\text{l}/\text{min}$  est de 2,34 %, ce qui confirme la conclusion adoptée dans la Figure 8.4 ainsi que la non-prise en compte des pertes de charge mécaniques, volumiques lors des simulations numériques.

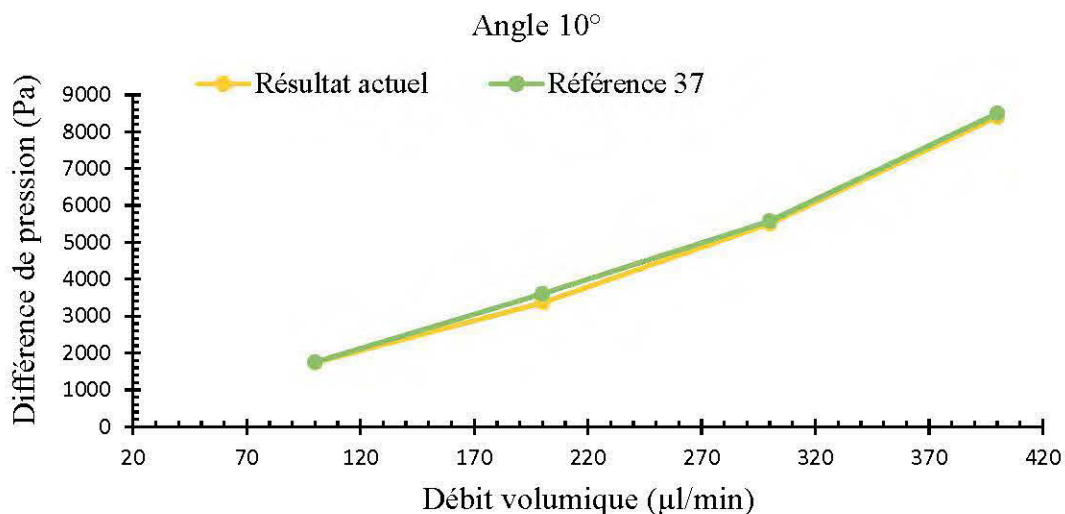


Figure 8.4: Différences de pression en fonction du débit pour un angle de  $10^\circ$

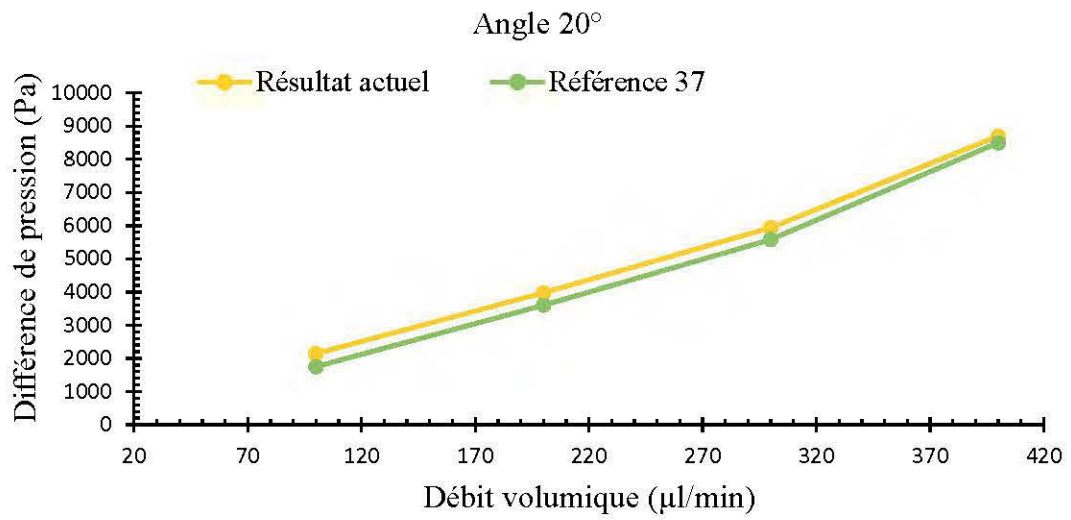


Figure 8.5: Différences de pression en fonction du débit pour un angle de 20°

## CHAPITRE 9

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette recherche était de concevoir, modéliser et simuler un modèle de la micropompe PZT et de connaître le pourcentage d'influence des paramètres de la partie mécanique sur les performances de la micropompe PZT sans varier les contraintes électriques, en parlant des changements dans les dimensions de chaque composant de la micropompe et aussi de l'utilisation de plusieurs matériaux allant du silicium, verre borrosilicate et aluminium. Il s'agissait également de réaliser une étude sur une micropompe PZT à deux chambres en série à partir de données issues de la littérature.

Pour atteindre ces objectifs, il a fallu commencer par concevoir un modèle 3D de la membrane PZT qui a été modélisée afin de l'exporter vers un logiciel d'analyse numérique en étendant la structure statique Piezo et MEMS, avec géométrie 3D, le maillage a été réalisé de différentes manières et ceci au point que les résultats étaient indépendants des maillages, le choix de l'extension Piezo et MEMS a été effectué pour prendre en compte les contraintes et l'équation des moments de flexion et les contraintes de la piézoélectricité, les conditions limites ont aussi été définies. La résolution numérique a été obtenue avec Piezo et MEMS-Solver.

En comparant les résultats numériques avec ceux de la littérature, les paramètres géométriques des modèles numériques de la membrane PZT ont été modifiés jusqu'à obtenir un écart très faible entre les courbes. Sur la base d'un modèle numérique éprouvé, la conception des autres composants de compactage de la micropompe a été lancée en se basant sur les schémas, les données et les paramètres existant dans la littérature [9, 11, 14, 15, 21, 37, 38]. Et de les assembler ensuite avec le modèle de

membrane, la simulation complète du système incluant les microvalves d'entrée et de sortie, la chambre, la membrane, l'époxy et le disque piézoélectrique se fait avec ANSYS-CFX. Le maillage de la micropompe a été modifié de grossièrement à finement pour avoir plus de précision sur les résultats. La résolution du modèle numérique de la micropompe a été effectuée sur ANSYS-CFX SOLVER. Une comparaison des résultats numériques de la micropompe monochambre avec ceux de la littérature a été faite en modifiant les paramètres des microvalves et de la chambre jusqu'à obtenir une différence très faible entre ces deux courbes. Sur la base du modèle approuvé de la micropompe à une chambre, la micropompe PZT à deux chambres a été couplée à l'aide d'équations d'écoulement de fluide pour assortir les paramètres pouvant influencer la performance des deux chambres en série dans cette dernière étape de l'étude. Elle a été maillée et simulée comme une micropompe à chambre unique en modifiant les paramètres de diffuseur de la sortie de la première micropompe et l'entrée de la seconde micropompe à chaque simulation, jusqu'à obtenir une pression relativement élevée.

Dans le but d'améliorer la conception d'une micropompe à une ou deux chambres, des analyses ont été effectuées sur les paramètres suivants: Épaisseur de la membrane, épaisseur de disque piézoélectrique, rapport de rayon, matériau, angle de microvalve. Les résultats de ces analyses numériques sont résumés ci-dessous:

- Dans le cas d'un rapport de rayon de 0,7, l'actionnement électrique du disque piézoélectrique est très efficace tandis que pour une tension de 100 V le champ électrique généré est très fort et ensuite la déflexion augmente de 43,49% par rapport à un rapport de rayon de 0,5 et 8,15% si la valeur du rapport de rayon est 0,6 (Figure 7.1);
- Le type de matériau affecte les résultats de déflexion ainsi que l'écoulement du fluide, l'aluminium réagit plus rapidement avec une faible tension électrique de sorte que l'augmentation du déplacement mécanique de l'aluminium a un rapport

de rayon 0,7 et une tension électrique de 100 V est de 10,77% comparé au silicium et 2,86% comparé au verre borosilicate si on compare les résultats des Figures 7.1 à 7.3;

- L'épaisseur de la membrane et du disque piézoélectrique influence les performances de la micropompe (débit, pression, puissance). En comparant les résultats des Figures 7.2 et 7.8 d'un rapport rayon 0,7 pour une tension électrique de 100 V, plus l'épaisseur du disque piézoélectrique est diminuée de 0,1 mm à 0,05 mm plus la déflexion augmente de 197,59 %;
- Lorsque l'épaisseur de la membrane  $E_m$  est la même que l'épaisseur du disque piézoélectrique  $E_p$ , la déflexion n'est pas vraiment importante mais si  $E_m > E_p$  la déflexion génère une valeur élevée de 236  $\mu\text{m}$  avec une tension électrique de 100 V selon la Figure 7.15 qui nous permet d'avoir une pression assez élevée;
- Plus que l'angle de la microvalve augmente de 10 à 20, la pression croît également de 8403 Pa à 8699,2 Pa à la Figure 7.22;
- Les courbes de tendance de la micropompe à deux chambres sont significatives par rapport à celles d'une seule chambre, de sorte qu'à chaque ajout d'une chambre, la pression augmente de 127,54 % à la Figure 7.25, la puissance est également en augmentation de 127,59 % à la Figure 7.29.

Dans ce contexte, plusieurs propositions en tant que perspectives de recherche seraient présentées ci-dessous:

- Optimiser la pression et la puissance des micropompes PZT à trois chambres en série avec la conception de modèles 3D, réaliser des simulations numériques sur ANSYS-CFX, étudier leurs performances en comparant les résultats avec ceux de la littérature;
- Réduire les coûts de fabrication des micropompes piézoélectriques en utilisant des matériaux disponibles et moins coûteux;

- Étudier les variations de température dans les chambres de la micropompe PZT pendant la vibration de la membrane dans le domaine ANSYS-CHALEUR, analyser son influence sur la performance de la micropompe;
- Réaliser une étude avec des microvalves carrées et effectuer des simulations dans le domaine ANSYS-CFX. En comparant les résultats avec les données des microvalves coniques;
- Étudier L'effet des particules sur les performances de la micropompe PZT en se basant dans la simulation sur ANSYS-CFX l'eau avec des particules de solide;
- L'étude des vibrations dans une micropompe à membrane dans le domaine qui relie les domaines des vibrations et la variation de fréquence électrique. Et introduire le pourcentage qui affecte la performance de la micropompe piézoélectrique (pression, puissance, rendement).



## RÉFÉRENCES

1. Cao, L., S. Mantell, and D. Polla, Design and simulation of an implantable medical drug delivery system using microelectromechanical systems technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001. 94(1-2): p. 117-125.
2. Yildirim, y.a., a. Toprak, and o. Tigli, piezoelectric membrane actuators for micropump applications using pvdf-trfe. *Journal of microelectromechanical systems*, 2018. 27(1): p. 86-94.
3. Smits, J.G., Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1990. 21(1): p. 203-206.
4. Roopa, R., P.N. Karanth, and S. Kulkarni. Effect of flexure beam geometry and material on the displacement of piezo actuated diaphragm for micropump. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
5. Leu, T.-S. and R.-H. Kao, Design and operation of a bio-inspired micropump based on blood-sucking mechanism of mosquitoes. *Modern Physics Letters B*, 2018. 32(12n13): p. 1840027.
6. Huang, J., et al., Theory and Experimental Verification on Cymbal-shaped Slotted Valve Piezoelectric Pump. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018. 31(1): p. 2.
7. Dhananchezhian, P. and S.S. Hiremath, Improving the performance of micro pumps by reduction of flow pulsation for drug delivery application. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2018. 4(1): p. 24-38.
8. Dereshgi, h.a. And m.z. Yildiz, a novel micropump design: investigation of the voltage effect on the net flow rate. *Sakarya university journal of science*, 2018. 22(4): p. 1-1.

9. Rojas, J.J., J.E. Morales, and T. Rica. Design and Simulation of a Piezoelectric Actuated Valveless Micropump. in Proceedings of the COMSOL Conference, Boston. 2015.
10. Tariq, N., et al. Comparative simulation of silicon, PDMS, PGA and PMMA actuator for piezoelectric micropump. in Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI), 2016 2nd International Conference on. 2016. IEEE.
11. Hamie, A., Prototype d'une micropompe dédiée à l'injection des médicaments anti-épileptiques. 2013, Maîtrise ès sciences appliquée, école polytechnique de Montréal.
12. Dompierre, A., Modélisation et conception de microrésonateurs piézoélectriques pour la récupération d'énergie vibratoire. 2011, Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Université de Sherbrooke.
13. Liu, G., et al., A disposable piezoelectric micropump with high performance for closed-loop insulin therapy system. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010. 163(1): p. 291-296.
14. Koch, M., et al., A novel micropump design with thick-film piezoelectric actuation. *Measurement Science and Technology*, 1997. 8(1): p. 49.
15. Laser, D.J. and J.G. Santiago, A review of micropumps. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2004. 14(6): p. R35.
16. Khalilian, S., Development of a low cost micro-pump. 2012, University of Calgary.
17. Geng, Z.-x., et al. Disposable PDMS diaphragm micropump actuated by PZT. in *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2006. NEMS'06. 1st IEEE International Conference on. 2006. IEEE.
18. Gravesen, P., J. Branebjerg, and O.S. Jensen, Microfluidics-a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1993. 3(4): p. 168.
19. Nguyen, N.-T., X. Huang, and T.K. Chuan, MEMS-micropumps: a review. *Journal of fluids Engineering*, 2002. 124(2): p. 384-392.

20. Truong, T.-Q. and N.-T. Nguyen, A polymeric piezoelectric micropump based on lamination technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004. 14(4): p. 632.
21. Ledoux, A., Theory of piezoelectric materials and their applications in civil engineering. 2011, Master Of Engineering In Civil And Environmental Engineering At The Massachussets Institute Of Technology.
22. Oh, K.W. and C.H. Ahn, A review of microvalves. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2006. 16(5): p. R13.
23. Azarbadegan, A., et al. Investigation of double-chamber series valveless micropump: An analytical approach. in *Quantum, Nano and Micro Technologies*, 2010. ICQNM'10. Fourth International Conference on. 2010. IEEE.
24. Quan-Liang, Z., et al., Stationary fluid dynamic behaviour of V-shaped diffuser/nozzle elements for valveless micropump. *Chinese Physics Letters*, 2008. 25(4): p. 1359.
25. Tsai, N.-C. and C.-Y. Sue, Review of MEMS-based drug delivery and dosing systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007. 134(2): p. 555-564.
26. Guo-jun, L., et al., Piezoelectric micro-pump for insulin injection [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007. 2: p. 024.
27. Lefevre, R., Conception et réalisation d'une micropompe intelligente: applications dans le domaine biomédical. 2013, Université de Grenoble.
28. Bardell, R.L., et al., Designing high-performance micro-pumps based on no-moving-parts valves. *Asme-Publications-Htd*, 1997. 354: p. 47-54.
29. Rojas, J.J. and J.E. Morales. Design and Simulation of a Piezoelectric Actuated Valveless Micropump. in *Proceedings of the COMSOL Conference*, Boston, MA, USA. 2015.
30. Smits, J.G., Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1990. 21(1-3): p. 203-206.

31. Roche-Carrier, L., Développement d'un outil numérique améliorant la conception et les performances des pompes centrifuges multi-étages. 2014, maîtrise en ingénierie mécanique , Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
32. Gonzalez, U.F. and W.A. Moussa, Simulation of Mems Piezoelectric Micropump for Biomedical Applications. [Online]. Retrieved from the Internet:< URL: <http://www.algor.com/news—pubs/tech—white—papers/MEMS—micropump/default.asp>, 2002: p. 1-13.
33. Mu, Y., N. Hung, and K. Ngoi, Optimisation design of a piezoelectric micropump. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999. 15(8): p. 573-576.
34. Böhm, S., W. Olthuis, and P. Bergveld, A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials. Sensors and Actuators A: Physical, 1999. 77(3): p. 223-228.
35. Goel, V., et al., Interlaminar Shear Stresses and Laminae Separation in a Disc: Finite Element Analysis of the L3-L4 Motion Segment Subjected to Axial Compressive Loads. Spine, 1995. 20(6): p. 689-698.
36. Zhang, W. and R.E. Eitel, An integrated multilayer ceramic piezoelectric micropump for microfluidic systems. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013. 24(13): p. 1637-1646.
37. Nguyen, N., T. Truong, and Z. Wu, a piezoelectric micropump based on polymeric micromachinig. 2003, International Conference on Miniaturized Chemical and Blochemical Analysts Systems, School of APE, Nanyang Technological Ukiversity2 Singapore
38. Roberts, D.C., et al., A piezoelectric microvalve for compact high frequency high differential pressure micropumping systems. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003. 12(1): p. 81-92.