

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة سعد دحلب البليدة -1-  
Université Saad Dahleb Blida -1-



Faculté des sciences  
Département de physique  
Mémoire de fin d'étude  
Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique  
Option : **Nano-physique**

Thème :

***Etude et simulation par la méthode des éléments finis  
d'un micromélangeur de fluide en utilisant l'effets  
d'électro-osmose***

Présenté par :

- BOURKAIB Mohamed Lamine
- HATTALI Fatma Zohra

Soutenu le 18 / 07/ 2023 devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	Prof A.AISSAT	<b>PROF</b>	<b>USDB1</b>
<b>Examineur :</b>	Dr A.HASSEIN BEY	<b>MCB</b>	<b>USDB1</b>
<b>Promoteur :</b>	Dr N. BELGROUNE	<b>MCB</b>	<b>USDB1</b>

## ملخص

هذه المذكرة تعرض دراسة حول استخدام تأثير الكهروستاتيكا كطريقة لخلط السوائل بكفاءة في أنظمة الميكروفلويديكس. يتم استخدام هذه الأنظمة لمجموعة متنوعة من المهام، مثل مراقبة السوائل ونقلها وفصلها، بالإضافة إلى جمع البيانات، على مقياس صغير. يعد خلط التدفقات المختلفة للسوائل أمراً ضرورياً للعديد من التطبيقات، ولكن الخلط الانتشاري التقليدي يستغرق وقتاً طويلاً للجزيئات الكبيرة. يقدم المشروع نهجاً يستخدم تأثير الكهروستاتيكا، الناجم عن مجال كهربائي يعتمد على الوقت، لاضطراب التدفق الصفحي وتعزيز الخلط. يجمع النظام بين اثنين من السوائل الداخلة من مدخلات مختلفة في قناة واحدة، ثم يمر عبر غرفة خلط مع ميكروإلكترونيات على الجدار الخارجي. يتم استخدام محاكاة طريقة العناصر المحدودة لتأكيد نموذج الجهاز. يمكن أن تخدم هذه النتائج كمرشد لتصميم وتحسين الأجهزة الميكروفلويديكية، وفتح آفاق جديدة في مجال الميكروفلويديكس وأنظمة التحليل على الشريحة. يمكن استخدام هذه التقنية لتطبيقات متنوعة، مثل تحليل الأدوية والخلايا وتطوير العقاقير. يمكن أيضاً استخدامها لمراقبة العمليات الكيميائية وتحسين الكفاءة. تعد هذه التقنية واعدة لتطوير أنظمة ميكروفلويديكية أكثر كفاءة ودقة. يمكن أن يؤدي إلى تحسين جودة الحياة في العديد من المجالات، بما في ذلك الرعاية الصحية والبيئة.

الكلمات المفتاحية: بيوسانسر، النمذجة والمحاكاة، طريقة العناصر المحدودة، مامس، ميكروفلويديك، ميكروكانال، نانوفيزياء.

## RESUME

Ce mémoire présente une étude sur l'utilisation de l'effet d'électro-osmose comme moyen de mélanger efficacement les fluides dans les systèmes microfluidiques. Ces systèmes sont utilisés pour diverses tâches, telles que le contrôle, le transport et la séparation des fluides, ainsi que l'acquisition de données, à petite échelle. Le mélange rapide de différents flux de fluides est essentiel pour de nombreuses applications, mais le mélange diffusif conventionnel prend trop de temps pour des molécules plus grosses.

Le projet propose une approche utilisant l'effet électro-osmose, induit par un champ électrique dépendant du temps, pour perturber le flux laminaire et favoriser le mélange. Le système combine deux fluides entrant de différentes entrées dans un seul canal, passant ensuite par une chambre de mélange avec des microélectrodes sur la paroi extérieure. La simulation par la méthode des éléments finis sont utilisées pour valider le modèle du dispositif. Ces résultats peuvent servir de guide pour la conception et l'optimisation des dispositifs microfluidiques, ouvrant de nouvelles perspectives dans le domaine de la microfluidique et des systèmes d'analyse sur puce

Les mots clés : biosensor, modeling and simulation, MEF, MEMS, Microfluidique, Microcanal, nanophysique.

## ABSTRACT

This thesis presents a study on the use of the electroosmotic effect as a means of effectively mixing fluids in microfluidic systems. These systems are used for a variety of tasks, such as fluid control, transport, and separation, as well as data acquisition, at a small scale. Rapid mixing of different fluid flows is essential for many applications, but conventional diffusive mixing takes too long for larger molecules. The project proposes an approach using the electroosmotic effect, induced by a time-dependent electric field, to disrupt laminar flow and promote mixing. The system combines two fluids entering from different inlets into a single channel, then passing through a mixing chamber with microelectrodes on the outer wall. Finite element simulation is used to validate the device model. These results can serve as a guide for the design and optimization of microfluidic devices, opening new perspectives in the field of microfluidics and lab-on-a-chip Systems.

Keywords : biosensor, modeling and simulation, MEF, MEMS, Microfluidice, Microcanal, nanophysique.

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions tout d'abord, Dieu tout puissant de nous avoir donné du courage, de la patience et surtout de la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*En second lieu, nous remercions très sincèrement, les membres de jury, le président Mr. **ABDELKADER AISSAT** et l'examineur Mr. **ABDELKADER HASSEIN-BEY** d'avoir bien voulu accepter de faire partie du jury d'examinations.*

*Nous tenon sa remercier notre promoteur Mr. **NADIR BELGROUNE** pour ses précieux conseils et ses aides durant toute la période du travail.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans là pour suite de nos études.*

*Nous remercions vivement les étudiants Master nano-physique pour leur aide morale durant toute la période de préparation.*

*Nous n'oublions pas de remercier le chef Département de physique*

*Mr. **AZIZ MOUZALI**.*

**Merci**

## **DEDICACE**

*À MES PARENTS, QUI ONT TOUJOURS CRU EN MOI ET M'ONT SOUTENU INCONDITIONNELLEMENT TOUT AU LONG DE MES ETUDES. VOTRE AMOUR, VOS ENCOURAGEMENTS ET VOTRE FIERTE SONT MES PLUS GRANDES MOTIVATIONS. MERCI POUR TOUT.*

*À MON ENCADREUR, NADIR BELGROUNE, POUR SON EXPERTISE, SON SOUTIEN CONSTANT ET SES PRECIEUX CONSEILS TOUT AU LONG DE CE TRAVAIL. VOTRE GUIDANCE M'A PERMIS DE ME DEPASSER ET DE DONNER LE MEILLEUR DE MOI-MEME. JE VOUS EN SUIS INFINIMENT RECONNAISSANT.*

*À MES PROFESSEURS ET ENSEIGNANTS, POUR LEUR EXPERTISE ET LEUR ENSEIGNEMENT DE QUALITE QUI ONT FAÇONNE MA FORMATION ACADEMIQUE. VOS CONNAISSANCES ET VOTRE PASSION POUR VOTRE DOMAINE M'ONT INSPIRE ET ONT CONTRIBUE A MA CROISSANCE INTELLECTUELLE.*

*À MES AMIS ET CAMARADES DE CLASSE, QUI ONT PARTAGE AVEC MOI DES MOMENTS INOUBLIABLES ET M'ONT SOUTENU TOUT AU LONG DE CE PARCOURS ACADEMIQUE. VOS ENCOURAGEMENTS, VOTRE SOUTIEN MUTUEL ET NOS DISCUSSIONS STIMULANTES ONT RENDU CETTE EXPERIENCE ENCORE PLUS ENRICHISSANTE. MERCI D'AVOIR ETE LA POUR MOI.*

*À TOUTES LES PERSONNES QUI CROIENT EN L'IMPORTANCE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET DE L'AVANCEMENT DES CONNAISSANCES. VOTRE SOUTIEN A LA SCIENCE ET VOTRE ENGAGEMENT EN FAVEUR DE L'EDUCATION SONT D'UNE VALEUR INESTIMABLE.*

***BOURKAIB***

## **DEDICACE**

***A mon très cher père et ma très  
chère mère Qu'ils trouvent en moi la  
source de leur fierté***

***A qui je dois tout***

***A mon Frère et mes sœurs***

***A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite***

***A mes Amis***

***A tous ceux qui mes ont chers***

**HATTALI**

# SOMMAIRE

ملخص

RESUME

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

DEDICACE

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABBREVIATIONS

INTRODUCTION GENERAL..... 1

## **CHAPITRE 01 :GENERALITES ET ETAT DE L'ART SUR LE MELANGE**

### **MICROFLUIDIQUE**

1.1. Introduction ..... 4

1.2 Principes et caractéristique de base de la microfluidique ..... 5

1.2.1 Les Principes de la Microfluidique..... 6

1.2.2 Régime d'écoulement des fluides ..... 6

1.2.3 Les écoulements Laminaires et profil de vitesse des Microécoulements..... 8

1.2.4 La Micro-hydrodynamique ..... 9

1.3 Diffusion et mélange ..... 10

1.3.1 La nature du transport de masse : Le nombre de Péclet..... 11

1.3.2 Principaux microsystèmes pour le mélange ..... 12

1.4 L'électro-osmose et son utilisation pour le mélange ..... 15

1.5 Conclusion ..... 17

## **CHAPITRE 02 :METHODOLOGIE ET CONCEPTION DU MICROMELANGEUR**

2.1. Introduction ..... 19

2.2 Description de la conception du micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose ..... 19

2.2.1 Description géométrique du micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose..... 19

2.2.2 Principe de fonctionnement ..... 20

2.2.3 Modélisation mathématique ..... 24

2.3 Procédés technologiques de réalisation et dimensionnement ..... 25

2.3.1 Choix des matériaux et des dimensions appropriés ..... 25

2.4 Flot de conception du micromélangeur ..... 29

2.5 Conclusion ..... 31

## CHAPITRE 03 :SIMULATION, RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Introduction .....	33
3.2 Modélisation pas élément finis .....	33
3.2.1 Principe de la modélisation par la méthode des éléments finis .....	34
3.2.2 Procédure d'introduction d'un modèle pour la méthode des éléments finis (FEM) sous Comsol Multiphysics.....	35
3.3 Les étapes des simulations suivis pour le système de séparation par unmicromélangeur .....	37
3.3.1 Création du modèle de simulation.....	37
3.3.2 Définition des paramètres globaux.....	37
3.3.3 Création de la géométrie.....	38
3.3.4. Ajout des propriétés du matériau .....	38
3.3.5 Sélection de la physique d'étude.....	38
3.3.6 Écoulement laminaire .....	39
3.3.7 Les condition aux limites du model pour les deux études.....	39
3.3.8 Le maillage (meshing).....	40
3.4. Résultats et discussion .....	40
3.4.1 Vérification du modèle numérique.....	40
3.4.2 Caractéristiques d'écoulement dans les dispositifs hybrides .....	41
3.4.3. Effet de l'intensité du champ électrique alternatif sur l'efficacité de mélange du micromélangeur.....	43
3.4.4. Effet de la fréquence du champ électrique alternatif sur l'efficacité de mélange du micromélangeur .....	45
3.5 Conclusion .....	48
CONCLUSION GENERALE .....	49
REFERENCES .....	50

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

<b>Figure 1. 1:</b> Laboratoire sur puce « lab. on chip ». ....	4
<b>Figure 1. 2:</b> Générateur de gradient développé au laboratoire SATIE de l'ENSCachan, Images O. Français. ....	5
<b>Figure 1. 3:</b> Caractérisation du type d'écoulement en fonction de nombre de Reynolds Re photos sites images des mathématiques ....	7
<b>Figure 1. 4:</b> Les lignes de courants des particules de fluide. ....	8
<b>Figure 1. 5:</b> Les profils de vitesse d'écoulements : (a) Profil de forme parabolique, (b) profil de forme uniforme, (c) profil de vitesse s'annule près des parois puis uniforme. ....	9
<b>Figure 1. 6:</b> Le profil de vitesse d'écoulement de Poiseuille dans un microcanal de section circulaire. ....	10
<b>Figure 1. 7:</b> Exemple d'un circuit en Y ....	11
<b>Figure 1. 8:</b> Représentation schématique d'un micromélangeur en Y.....	12
<b>Figure 1. 9:</b> Représentation schématique d'un micromélangeur en T.....	13
<b>Figure 1. 10:</b> Schéma de principe d'un circuit en T.....	13
<b>Figure 1. 11:</b> Représentation conceptuelle du filtre H développé dans le laboratoire de Paul Yager à l'Université de Washington.....	14
<b>Figure 1. 12:</b> Schéma illustrant le dispositif d'un micromélangeur transverse. ....	14
<b>Figure 1. 13:</b> Diagramme représentant l'électro-osmose à travers un capillaire de verre immergé dans une solution aqueuse.....	16
<b>Figure 2. 1:</b> Géométrie du micro mélangeur avec quatre électrodes symétriques sur la paroi de la chambre de mélange. ....	20
<b>Figure 2. 2:</b> Schéma du principe de fonctionnement.....	21
<b>Figure 2. 3:</b> Les étapes technologiques de la réalisation des canaux microfluidiques sur un substrat de silicium ou de verre.....	27
<b>Figure 2. 4:</b> Les étapes de fabrication d'un dispositif microfluidique par lithographie douce : (a) Réalisation du moule, (b) réalisation de la structure en PDMS.....	28
<b>Figure 2. 5:</b> Flot de conception proposé du micromélangeur. ....	31
<b>Figure 3. 1:</b> Les procédures et les étapes de la simulation par éléments finis. ....	35
<b>Figure 3. 2:</b> Les paramètres du modèle.....	38



<b>Figure 3. 3:</b> Concentration en régime permanent lorsque aucun champ électrique n'est appliqué. ....	41
<b>Figure 3. 4:</b> Lignes de potentiel d'un micromélangeur à électroosmotique .....	41
<b>Figure 3. 5:</b> Lignes d'écoulement du fluide dans un micromélangeur à écoulement électroosmotique à $t = 0,0375$ s. ....	42
Figure 3. 6: Champ de concentration du micromélangeur .....	43
<b>Figure 3. 7:</b> Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 0,1 V. ....	43
<b>Figure 3. 8:</b> Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 0,3 V. ....	44
<b>Figure 3. 9:</b> Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 1 V. ....	44
<b>Figure 3. 10:</b> Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 3 V. ....	45
<b>Figure 3. 11:</b> Résultats de simulation à différentes fréquences du champ électrique appliqué. ....	47
<b>Tableau 2. 1:</b> Données d'entrée du modèle. ....	20

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

CAO	: Conception Assistée par Ordinateur
COMSOL	: with the lumped model software lead to very time consuming simulation duration times
FEM	: La méthode des éléments finis.
MEMS	: Microsystème électromécanique
PDMS	: Poly diméthylsiloxane
UV	: Ultraviolette
$C_i$	: La concentration en espèces (Unité SI : mol/ m <sup>2</sup> )
$D_v$	: Le débit volumique (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
$D$	: Coefficient de diffusion (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
$E$	: L'énergie d'activation (unité SI : Jmol).
$f$	: Le débit molaire (unité SI : mol/s)
$L$	: La longueur caractéristique de canal (m)
$P$	: La pression (Pa)
$\Delta P$	: Gradient de pression sur la longueur de conduit $L$ (Pa)
$Q$	: Quantité de chaleur (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$r$	: rayon (coordonnée cylindrique) (m)
$R$	: Rayon interne de la conduite (m)
$Re$	: Le nombre de Reynolds
$R_H$	: La résistance hydraulique ( $\Omega$ )
$R_i$	: Le terme en et de réaction (unité SI : mol/(m <sup>3</sup> . s))
$S$	: Surface de la paroi solide (m <sup>2</sup> )
$T$	: Température dans le fluide (C°)
$\tau$	: Temps de séjour (S)
$U$	: La vitesse du fluide (m/s)
$\rho$	: La masse volumique du fluide (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	: La viscosité dynamique (kg.s /m)
$\nu$	: La viscosité cinématique du fluide (m <sup>2</sup> /s)
$\eta$	: La viscosité de l'eau (m <sup>2</sup> /s)
$u(r)$	: Vitesse du fluide au rayon $r$ (m.s <sup>-1</sup> )

## INTRODUCTION GENERAL

La microfluidique est une discipline en plein essor qui concerne le contrôle, la manipulation et l'analyse des fluides à l'échelle micrométrique. Elle présente de nombreuses applications dans des domaines tels que la biologie, la chimie, la médecine et les sciences de l'environnement. Les systèmes microfluidiques offrent de nombreux avantages, notamment la réduction des coûts, la diminution des quantités de réactifs nécessaires, l'accélération des temps d'analyse et la possibilité de réaliser des expériences sur des échantillons de petite taille. [1]

L'un des défis majeurs en microfluidique est le mélange rapide et efficace de différents flux de fluides. Dans les microcanaux, le mélange turbulent n'est pas possible en raison de l'écoulement laminaire qui prédomine. Le mélange se produit principalement par diffusion moléculaire, un processus relativement lent, en particulier pour les molécules de poids moléculaire élevé telles que les peptides, les protéines et les acides nucléiques. Ces limitations temporelles sont préjudiciables pour de nombreuses applications chimiques et biologiques nécessitant un mélange rapide et homogène des fluides.

La problématique de notre étude porte sur l'amélioration du mélange des fluides en microfluidique. Nous nous intéressons plus spécifiquement à l'utilisation de l'effet d'électro-osmose pour perturber le flux laminaire et favoriser le mélange des fluides. L'électro-osmose est un phénomène électrocinétique dans lequel un fluide est déplacé sous l'effet d'un champ électrique.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier et de simuler un micromélangeur de fluide utilisant l'effet d'électro-osmose. Nous souhaitons modéliser le comportement du fluide dans le micromélangeur en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) afin de comprendre les mécanismes sous-jacents du mélange induit par l'électro-osmose. De plus, nous visons à évaluer l'efficacité du micromélangeur en termes de mélange homogène des fluides et à analyser l'influence de différents paramètres, tels que la fréquence du champ électrique, sur les performances de mélange.[2]

Pour atteindre nos objectifs de recherche, nous adopterons une approche méthodologique basée sur la modélisation et la simulation. Nous commencerons par une revue de la littérature pour comprendre les principes de base de la

microfluidique, du mélange des fluides et de l'électro-osmose, ainsi que pour identifier les lacunes et les opportunités de recherche.

Ensuite, nous procéderons à la conception du micromélangeur en utilisant des matériaux appropriés et des dimensions adaptées. Nous modéliserons le comportement du fluide dans le micromélangeur en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) et nous validerons notre modèle en le comparant à des résultats expérimentaux existants.

Nous effectuerons ensuite des simulations pour étudier les performances de mélange du micromélangeur en variant différents paramètres tels que la fréquence du champ électrique et la concentration des fluides. Nous analyserons les résultats obtenus, comparerons les simulations avec des données expérimentales disponibles et évaluerons quantitativement l'efficacité du mélange.

Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres pour présenter de manière cohérente et approfondie notre étude sur le micromélangeur de fluide utilisant l'effet d'électro-osmose.

Le chapitre 1 présente une revue de la littérature sur la microfluidique, le mélange des fluides, l'électro-osmose et les techniques existantes de mélange en microfluidique. Il met également en évidence les lacunes identifiées et justifie la nécessité de notre recherche.

Le chapitre 2 détaille la méthodologie de conception du micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose. Il aborde les choix des matériaux et des dimensions appropriés, ainsi que la modélisation du micromélangeur en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) et la validation du modèle avec des expériences existantes.

Le chapitre 3 présente les simulations réalisées, analyse les performances de mélange en fonction de différents paramètres et compare les résultats avec des données expérimentales. Il évalue quantitativement l'efficacité du mélange et identifie les facteurs influençant les performances de mélange.

Enfin, la conclusion résume les principales conclusions de l'étude, propose des perspectives futures pour l'amélioration du micromélangeur et met en avant la contribution globale du projet à l'avancement de la microfluidique et des dispositifs de mélange.

# **CHAPITRE 01**

## **GENERALITES ET ETAT DE L'ART SUR LE MELANGE MICROFLUIDIQUE**

## 1.1. Introduction

La microfluidique est une technologie qui se consacre à l'étude du transport et de la circulation des fluides, ainsi qu'à la mise en œuvre des écoulements au sein de réseaux de micro-canaux aux dimensions microscopiques. Son développement est considérable dans de nombreux secteurs industriels tels que l'alimentaire, les biotechnologies et l'analyse chimique. La microfluidique est à la croisée des chemins de la biologie, de la physique, de la chimie et de l'ingénierie. Elle tire parti des avancées de la micro-électronique pour sa réalisation et exploite les phénomènes physiques propres à cette échelle, résultant de la réduction de taille des géométries. La diversité des sujets traités par la microfluidique a été abordée dès ses premières réalisations, ce qui rend difficile l'identification d'un système en tant que premier élément de microfluidique. La diversité des sujets traités par la microfluidique a commencé dès les premières réalisations. Il est donc difficile de désigner un système comme étant le premier élément microfluidique.

Grâce à la microfluidique, il est envisageable que des systèmes d'analyse complets se développent dans un avenir proche. À partir d'une simple goutte d'échantillon, ces systèmes permettront de transporter les liquides vers des capteurs afin d'extraire des informations sur leur contenu (figure 1.1).

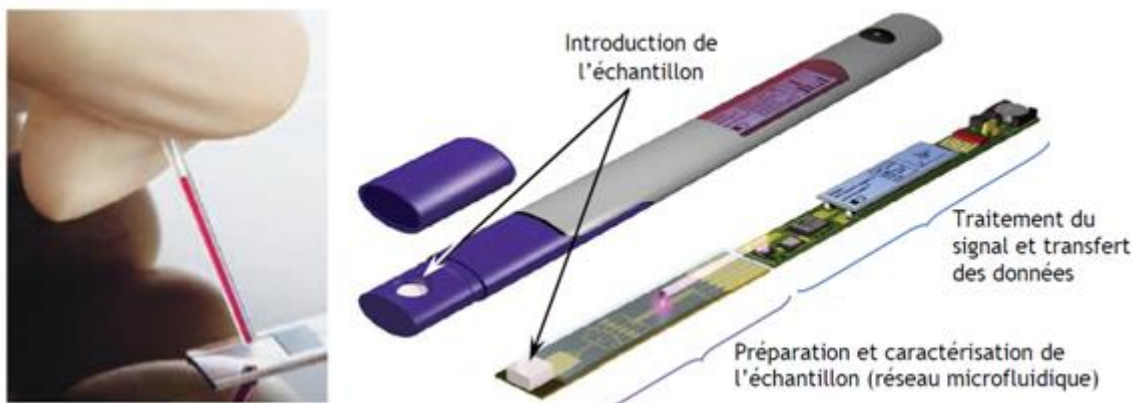


Figure 1. 1: Laboratoire sur puce « lab. on chip » [1].

Ce chapitre aborde des généralités et l'état de l'art sur la microfluidique et le mélange des fluides. Nous commencerons par expliquer les principes physiques de base des écoulements et du mélange des fluides à ces échelles et leur exploitation, en mettant en évidence les particularités de l'écoulement laminaire et ses implications sur les processus de mélange. Ensuite, nous passerons en revue les techniques existantes de mélange en microfluidique, en soulignant leurs avantages, leurs limites et leurs domaines d'application.

## 1.2 Principes et caractéristique de base de la microfluidique

Aux dimensions micrométriques, les lois d'écoulement restent celles du fluide classique et peuvent être étudiées avec l'équation de Navier-Stokes dans le cas de liquide incompressible dont les termes inertiels peuvent être ici négligés. En effet, certains phénomènes comme la capillarité et les forces de viscosité deviennent prépondérants tandis que d'autres, comme la gravité, deviennent négligeables dans l'étude des écoulements de fluides.

Le régime d'écoulement est majoritairement laminaire, caractérisé par un faible nombre de Reynolds ( $Re < 1$ ). Les phénomènes de diffusion au sein de ces écoulements sont bien maîtrisés et permettent le développement d'applications associées telles que des micromélangeurs ou des générateurs de gradient de concentration (figure 1.2).

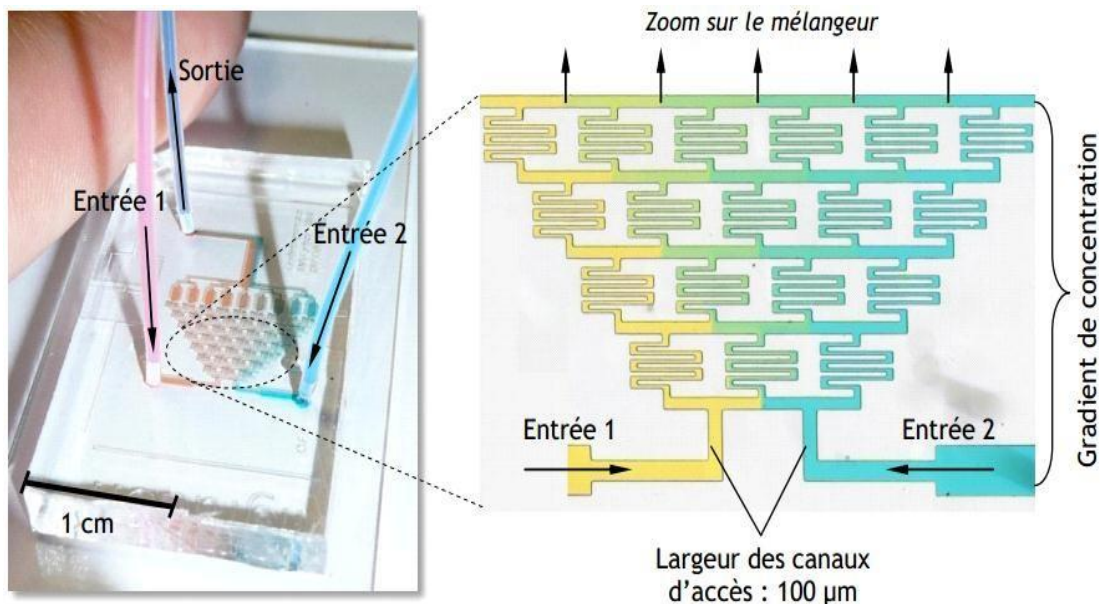


Figure 1. 2: Générateur de gradient développé au laboratoire SATIE de l'ENSCachan, Images O. Français.[2]

Les microsystèmes développés en microfluidique s'appuient sur les procédés des micro-technologies propres aux MEMS et doivent offrir aux applications microscopiques, les mêmes fonctionnalités que les applications macroscopiques. La technologie autour de la microfluidique, associée à la maîtrise comportementale des écoulements fluidiques, a permis très naturellement son application en direction des sciences du vivant. En étant à des échelles dimensionnelles physiologiques de la circulation sanguine (du micron à quelques dizaines de microns) il est possible de reproduire des environnements mimétiques dont les conditions expérimentales sont contrôlées et évolutives.

### 1.2.1 Les Principes de la Microfluidique

Cette technologie de microfluidique se concentre sur l'étude des fluides à des échelles inférieures à 100 micromètres, où les phénomènes de surface et les forces capillaires deviennent dominants. Dans sa forme la plus basique, la microfluidique est tout ce qui touche à de minuscules quantités de liquide dans des circuits d'à peine quelques dizaines de micromètres. Les principes clés de la microfluidique comprennent :

- Laminarité : À l'échelle microscopique, les fluides sont généralement laminaires, ce qui signifie qu'ils s'écoulent sous forme de couches parallèles sans mélange turbulent. Cette caractéristique permet un contrôle précis du débit et des réactions chimiques.
- Forces capillaires : Les forces capillaires, qui résultent des interactions entre le fluide et les parois du dispositif microfluidique, sont cruciales pour manipuler les fluides à cette échelle. Elles peuvent être utilisées pour l'acheminement, la séparation et la manipulation des échantillons.
- Rapport surface-volume : En raison de la petite échelle, le Rapport surface-volume des canaux microfluidiques est élevé. Cela permet des réactions rapides et une interaction accrue entre les fluides et les matériaux environnants.

Les avantages de pouvoir travailler à une échelle aussi minuscule sont nombreux. Comparée aux méthodes de test traditionnelles qui utilisent des boîtes de Petri et des compte-gouttes, la microfluidique utilise des échantillons de taille bien inférieure, ce qui réduit la quantité nécessaire de réactifs et de composés chimiques souvent onéreux. Les tests microfluidiques sont aussi plus sûrs car dans de nombreux cas, les substances toxiques peuvent être mieux contrôlées et contenues.

### 1.2.2 Régime d'écoulement des fluides

Le régime d'écoulement en nature peut être défini comme la façon dont un fluide (liquide ou gaz) s'écoule dans un canal ou une conduite. Il existe différents types de régimes d'écoulement en fonction des caractéristiques du fluide et des conditions de l'écoulement (laminaire ou turbulent). La figure 1.3 montre les différents régimes d'écoulement.



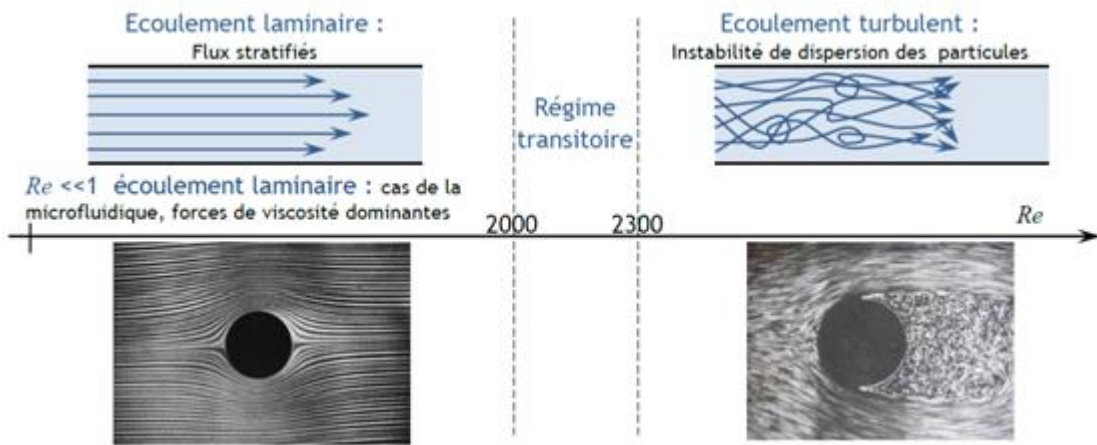


Figure 1. 3:Caractérisation du type d'écoulement en fonction de nombre de Reynolds Re photos sites images des mathématiques [3].

En régime d'écoulement turbulent, les particules fluides décrivent un mouvement aléatoire irrégulier et des tourbillons instables apparaissent et interagissent les uns avec les autres. Contrairement, dans le cas de l'écoulement laminaire, les lignes de courant des particules fluides sont localement parallèles.

Il convient de noter que ces régimes d'écoulement dépendent également des caractéristiques géométriques de la conduite ou du canal, ainsi que des propriétés physiques du fluide telles que sa viscosité, sa densité et sa vitesse. Des paramètres tels que le nombre de Reynolds sont souvent utilisés pour déterminer le type d'écoulement qui prédomine dans une situation donnée. Ce nombre de Reynolds caractérise le rapport relatif entre la force d'inertie et la force de viscosité. Il est sans dimension et peut être défini par la relation suivante [1 , 2] :

$$Re = \rho \frac{UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (1.1)$$

Où  $U$  (m/s) est la vitesse du fluide,  $L$  (m) la longueur caractéristique de canal,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) la masse volumique du fluide,  $\mu$  (kg/s.m) la viscosité dynamique et  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) la viscosité cinématique du fluide. Selon la valeur de  $Re$  plusieurs régimes d'écoulements ont été identifiés. Pour  $Re$  inférieur à 2000 l'écoulement est typiquement laminaire. Dans ce régime laminaire, les forces visqueuses dominent ce qui nous conduit à négliger les forces d'inertie.

A des valeurs du nombre de Reynolds supérieur à 2300, on parle d'écoulement turbulent. La transition entre l'écoulement laminaire et turbulent se produit autour d'une valeur seuil,  $Re \approx 2000$ . [3].

Dans notre cas, celui des microcanaux, le nombre de Reynolds reste généralement faible en raison des petites dimensions et de faibles valeurs du débit. Par exemple, de l'eau qui s'écoule à une vitesse de 1 mm/s dans un microcanal circulaire de rayon 100 $\mu$ m, le nombre de Reynolds est égal à 0.1.

### 1.2.3 Les écoulements Laminaires et profil de vitesse des Microécoulements

L'écoulement d'un fluide dans un microcanal est généralement laminaire. Ainsi l'ensemble des lignes des courants des particules de fluide (ou couches) se déplacent dans une direction bien définie dans un microcanal (figure 1.3). Donc ces lignes de courant ne s'entremêlent pas. Ainsi, le long d'un microcanal l'écoulement est uni axial et parallèle aux parois. Les écoulements sont alors laminaires sans aucune turbulence [4, 5].

La nature laminaire des écoulements peut être avantageuse dans plusieurs applications microfluidiques. Par exemple, dans les systèmes de séparation électrophorétique basés sur les phénomènes de dispersion ou dans les dispositifs de séparation axés sur les phénomènes de diffusion ou de réaction [2-4]. Il peut être aussi un inconvénient majeur comme dans les processus où le mélange est nécessaire. En effet, des réactions chimiques sont générées dans les microréacteurs, et afin d'augmenter la cinétique réactionnelle, un écoulement turbulent est nécessaire pour augmenter le mélange entre les espèces chimiques [5].

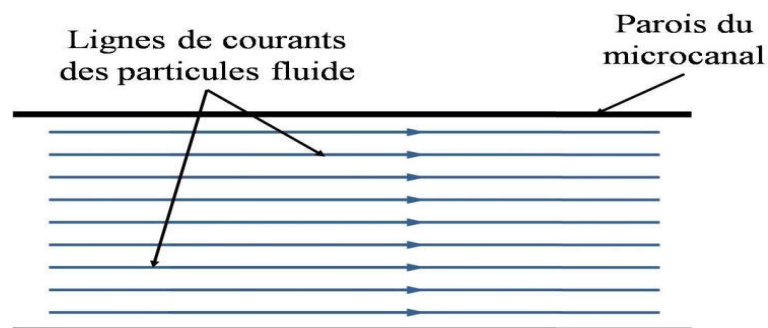


Figure 1. 4: Les lignes de courants des particules de fluide.

Les microcanaux à section transversale rectangulaire et circulaires sont couramment utilisés dans les applications microfluidiques. Etant donné que l'écoulement est laminaire, les équations régissant cet écoulement (équation de Navier-Stokes) peuvent être simplifiées et appliquées à chaque géométrie afin de déterminer le profil de vitesse dans la section du microcanal [5, 6].

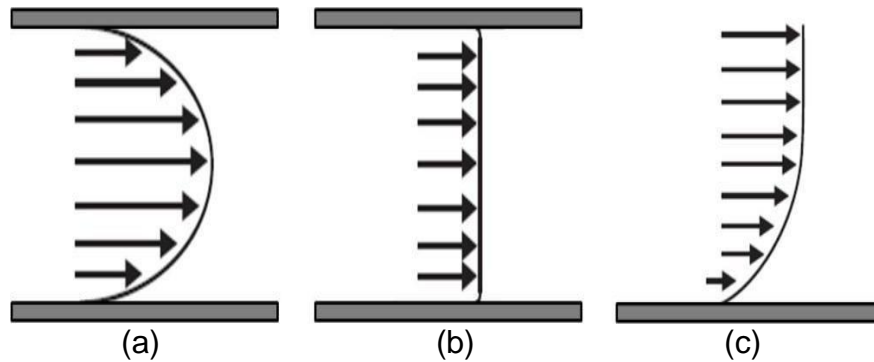


Figure 1. 5:Les profils de vitesse d'écoulements : (a) Profil de forme parabolique, (b) profil de forme uniforme, (c) profil de vitesse s'annule près des parois puis uniforme.

Il existe essentiellement trois profils de vitesse pour les écoulements laminaires à l'intérieur des microcanaux. Les écoulements induits par un gradient de pression possèdent un profil de forme parabolique où la vitesse est maximale au milieu du canal pour s'annuler près des parois (figure 1.5.a). Tandis que pour les écoulements contrôlés par des pompes électroosmotique, le profil est presque uniforme (figure 1.5.b). Finalement, dans le cas des microcanaux ouverts avec un écoulement généré par une pression, les gradients de vitesse d'écoulement se produisent près des parois pour s'annuler (Figure 1.5.c) [6].

#### 1.2.4 La Micro-hydrodynamique

L'hydrodynamique s'intéresse à l'étude de la dynamique de l'écoulement dans les canaux. Les écoulements liquides restent fluides jusqu'à quelques nanomètres. Ainsi à l'échelle du micron, on peut appliquer l'équation constitutive d'un fluide newtonien incompressible, non pesant et visqueux qui est décrite par l'équation de Navier-Stokes.

En régime stationnaire, c.à.d. indépendant du temps. De plus, le nombre de Reynolds ( $Re$ ) est supposé inférieur au seuil de 2000 rendant l'hypothèse laminaire de l'écoulement valable le long du microcanal où l'on peut négliger les termes d'inertie, cette équation se réduit à la loi suivante :

$$\Delta P = \eta \Delta \vec{U} \quad (1.2)$$

C'est l'équation de Poiseuille qui peut se résoudre selon la géométrie du canal. La forme analytique du profil de vitesse peut être décrite à travers cette relation appelée la loi de Poiseuille. Ici la résolution est donnée pour une canalisation circulaire de rayon  $R$ . Dans ces conditions, on peut représenter l'allure du profil du champ de

vitesse qui est de forme parabolique comme schématisé dans la figure 1.5. Dans ce cas, la vitesse est nulle aux parois en raison des forces de frottement, et maximale au centre du cylindre [7,9]. La vitesse maximale ( $V_{max}$ ) de ce profil dépend directement de la pression appliquée.

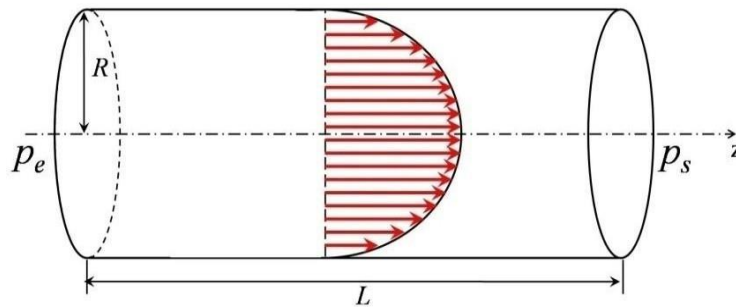


Figure 1. 6:Le profil de vitesse d'écoulement de Poiseuille dans un microcanal de section circulaire.

Nous pouvons aussi exprimer le débit volumique  $Dv$  dans le canal en intégrant le flux du vecteur de vitesse à travers une couronne transversale élémentaire comprise entre  $r$  et  $r+dr$  :

$$Dv = \int_0^R U(r)2\pi r dr = \int_0^R \frac{Pe-Ps}{4\eta l} (R^2 - r^2)2\pi r dr \quad (1.3)$$

$$D'où \quad Dv = \frac{\pi r^3}{8\eta L} (Pe - Ps) \quad (1.4)$$

La différence de pression  $\Delta P=Pe-Ps$  est le moteur de l'écoulement. Elle est donc proportionnelle au débit volumique et est exprimé par la loi Hagen-Poiseuille :

$$\Delta P = \frac{8\eta L}{\pi r^3} Dv \quad (1.5)$$

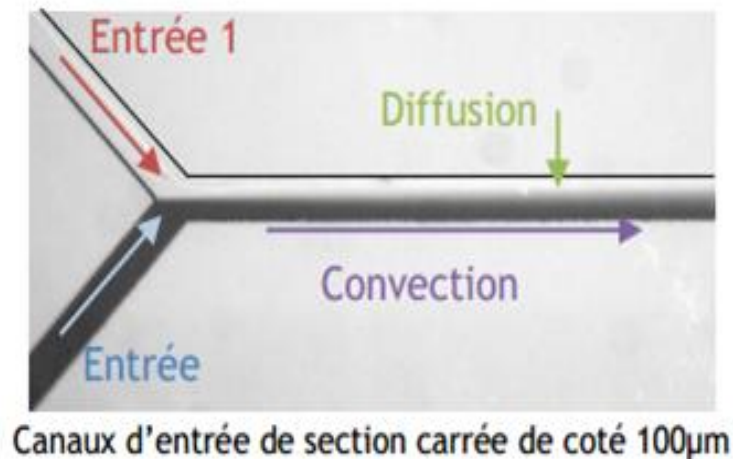
Une situation physique très différente est le transport des électrons dans un conducteur électrique : la vitesse moyenne des électrons est la même dans toute la section du conducteur. La résistance du conducteur est inversement proportionnelle à sa section ( $R2$ ) [1, 7, 10,12]. Par analogie avec la loi d'Ohm, une résistance hydraulique  $R_H$  est définie par :

$$R_H = \frac{8\eta L}{\pi r^4} \quad (1.6)$$

### 1.3 Diffusion et mélange

Le mélange du fluide dans les systèmes microfluidique peut s'effectuer de manière simple entre deux écoulements laminaires adjacents, par exemple dans un microcanal. Dans le cas où l'on cherche à observer la cinétique d'une réaction

chimique, le caractère laminaire des écoulements peut s'avérer avantageux, le mélange se produisant alors par diffusion transversale (Figure 1.7). C'est à la fois une force et une faiblesse pour la microfluidique. Faiblesse car le mélange n'est que diffusif, force car on peut alors tirer avantage de ce profil de diffusion pour analyser des réactions en écoulement ou séparer les particules de tailles différentes entre elle.



**Figure 1. 7:**Exemple d'un circuit en Y [4] .

On peut ainsi avoir une vision globale de l'évolution temporelle de la réaction chimique en analysant la réaction en différentes positions le long du microcanal. Dans le cas fréquent où l'on recherche un mélange complet et rapide, le caractère laminaire des écoulements est alors un inconvénient, et des stratégies de mélange doivent être développées [13,14].

### 1.3.1 La nature du transport de masse : Le nombre de Péclet

Les écoulements à l'échelle de la microfluidique étant laminaire, il en résulte que la mise en contact de deux milieux se traduit par un écoulement qui sera bidimensionnel. Sous un régime à bas nombre de Reynolds, les forces visqueuses dominent les forces d'inertie, et toute perturbation de l'écoulement est rapidement atténuée. L'objectif d'un mélange homogène est de réaliser une distribution uniforme des molécules, ce qui requiert généralement un processus aléatoire et irréversible.

Le nombre de Péclet mesure l'importance relative des termes de convection vis-à-vis des termes de diffusion de la masse. Ce nombre permet de caractériser la nature du transport de matière. Il est défini par le rapport entre le temps de diffusion et le temps de convection :

$$P_e = \frac{UL}{D} \quad (1.7)$$

Il est ainsi équivalent au nombre de Reynolds pour ce qui concerne le transport de masse (au lieu du transport de la quantité de mouvement) et apparaît donc pertinent lorsqu'on s'intéresse au mélange. Dans cette équation,  $U$  est une vitesse caractéristique de l'écoulement,  $L$  une longueur caractéristique (par exemple la profondeur d'un microcanal) et  $D$  représente le coefficient de diffusion moléculaire. Plus le nombre de Péclet est élevé, plus l'influence de l'écoulement est grande vis-à-vis de la diffusion moléculaire.

### 1.3.2 Principaux microsystemes pour le mélange

L'écoulement laminaire offre un contrôle précis sur les conditions d'écoulement des milieux liquides. Dans ce cadre, on utilise par exemple cette propriété de profil afin d'étudier une réaction chimique (circuit en Y ou T) ou pour faire de la séparation par la taille (circuit en H).

#### 1.3.2.1 Micromélangeurs en Y

La figure 2.4 présente un schéma simple de micro mélangeur en Y. Ce type de micro mélangeur est constitué de deux branches par les quelles les fluides à mélanger arrivent. Ces deux canaux se rejoignent ensuite en un canal principal dans lequel a lieu le mélange.

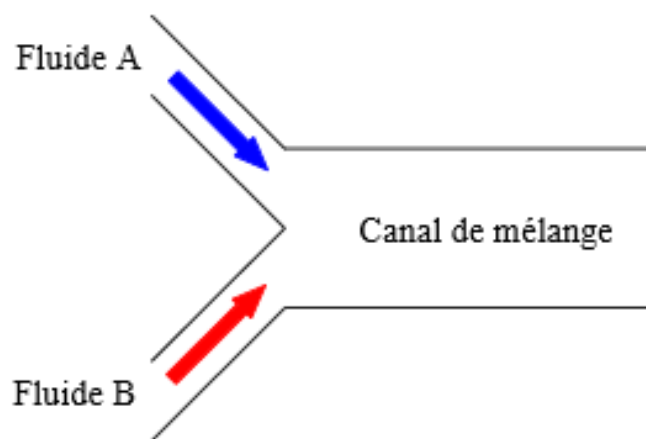


Figure 1. 8: Représentation schématique d'un micromélangeur en Y.

Ce système permet de mélanger deux fluides avec des vitesses d'écoulement différentes : le fluide arrive dans la branche A avec une vitesse supérieure à celle du fluide dans la branche B. La différence de vitesse entre les deux fluides crée une stratification du mélange avec une position de la ligne de mélange ajustable par les débits.

### 1.3.2.2 Micromélangeurs en T

La Figure 1.9 présente une représentation schématique d'un micromélangeur en T. Les fluides sont acheminés dans deux branches opposées qui débouchent dans un seul canal dans lequel a lieu le mélange.

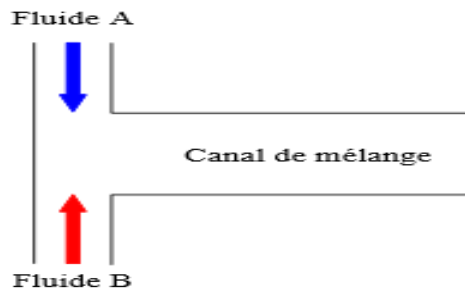


Figure 1. 9:Représentation schématique d'un micromélangeur en T.

Il existe dans la littérature de nombreux travaux numériques dédiés à l'étude du phénomène de diffusion dans ces mélangeurs. Parmi eux, l'étude d'une cinétique de réaction d'un circuit en T. Si l'on suit l'écoulement, la position le long de la zone de contact entre les deux liquides (réactifs) devient le temps de réaction. En plaçant une série de capteurs (zones de détection) on peut suivre en « temps figé », la cinétique de réaction entre les deux liquides. On dit alors que le position est l'image du temps de réaction (figure 1.10)

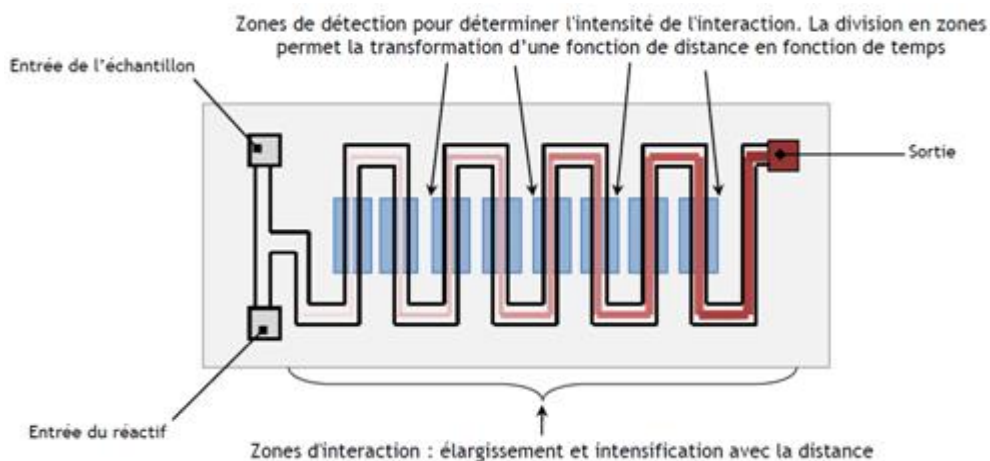


Figure 1. 10: Schéma de principe d'un circuit en T.

### 1.3.2.3 Filtre en H : Méthode séparative

Plusieurs techniques de mélange et de séparation ont été développées exploitant cet effet diffusif dans les systèmes microfluidiques. Avec la géométrie dite « filtre en H », on opère un tri en fonction de la taille des particules via la dépendance du coefficient de diffusion avec le rayon des particules (supposées sphériques). L'échantillon (en violet figure 1.11) contient deux types de particules de tailles différentes qui vont

avoir des nombres de « Peclet » différents. Les petites particules (figurées en bleu) ont un nombre de Peclet plus faible, elles diffusent alors plus rapidement dans le réactif (en rose figure 1.11) : les particules peuvent être ainsi triées et séparées. Ce principe a un intérêt si les particules à trier présentent un rapport d'au moins 10 entre leurs rayons.

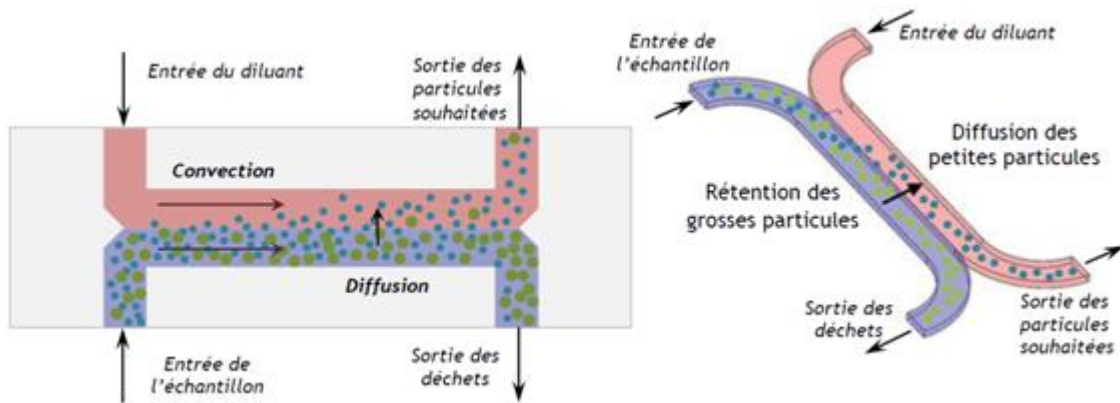


Figure 1. 11: Représentation conceptuelle du filtre H développé dans le laboratoire de Paul Yager à l'Université de Washington.

#### 1.3.2.4. Micromélangeurs chaotiques actifs

L'advection chaotique peut également être menée de manière active, à l'aide d'actionnement pneumatique ou électrocinétique par exemple. Différentes configurations sont proposées dans la littérature. Un exemple de ces micromélangeurs est le micromélangeur transverse ou mélangeur en croix.

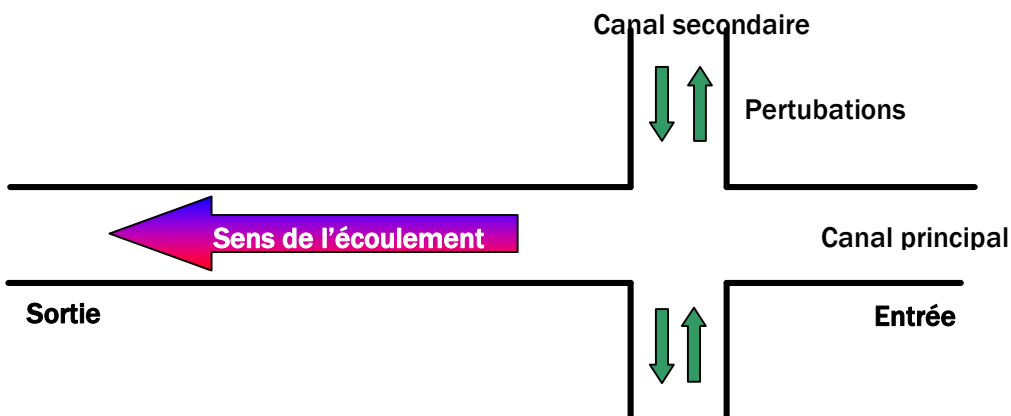


Figure 1. 12: Schéma illustrant le dispositif d'un micromélangeur transverse.

Ce type de micromélangeur actif est constitué d'un canal principal dans lequel le mélange a lieu. Des jets oscillants transverses perturbent l'écoulement dans ce canal de mélange (Figure 1.12). Ainsi, une particule liquide à l'entrée du micromélangeur voyage parallèlement au canal principal, jusqu'à ce qu'elle atteigne la région de



l'intersection avec le canal transversal. Elle est alors soumise à un effort transverse, qui lui communique une vitesse dans la direction du canal secondaire. Après la sortie de la zone de l'intersection, l'écoulement redevient parallèle au canal principal. Si deux couches de fluides ont été introduites parallèlement en amont du canal principal, l'interface se trouve alors repliée transversalement à l'écoulement un grand nombre de fois. L'augmentation de cette surface d'échange aboutit rapidement à un mélange complet. Le processus de mélange peut être répété avec une succession de canaux transversaux.

Il existe différentes manières de contrôler activement la perturbation : par application d'un gradient de pression perturbatrice, par ondes acoustiques, par force électrophorétique ou par force électro-osmotique ... etc.

#### 1.4 L'électro-osmose et son utilisation pour le mélange

Les systèmes microfluidiques présentent des inhomogénéités en raison des parois de confinement et des espèces chimiques neutres et chargées présentes dans le fluide. Les inhomogénéités dues à la géométrie des parois, à la composition chimique et à la charge affectent la concentration de toutes les espèces dissoutes, ce qui peut induire une accumulation locale de charge même dans un fluide globalement neutre. L'électroosmose se produit lorsque des champs électriques agissent sur ces systèmes inhomogènes. Les interactions électrostatiques et la diffusion des ions jouent un rôle crucial dans l'équilibre de la concentration ionique.

L'électroosmose est un phénomène qui se produit lorsque un champ électrique est appliqué à un liquide en contact avec une surface chargée ou à travers un milieu poreux chargé. Il implique le déplacement de la phase liquide par rapport à la phase solide en raison de l'interaction entre le champ électrique appliqué et les charges présentes à l'interface. En électroosmose, les particules chargées dans le liquide, telles que les ions ou les molécules chargées, subissent une force électrostatique lorsque le champ électrique est appliqué. Cette force entraîne le déplacement du fluide dans la direction opposée au mouvement des particules chargées. En conséquence, le liquide s'écoule à travers le milieu poreux ou le long de la surface chargée.

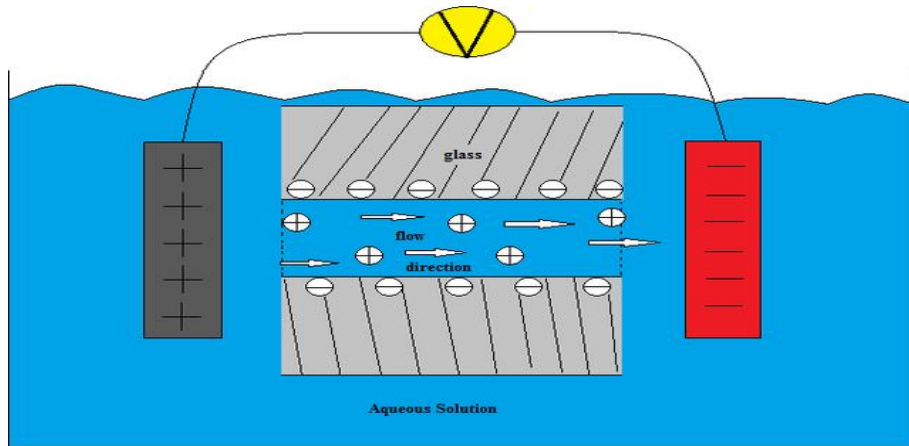


Figure 1. 13: Diagramme représentant l'électro-osmose à travers un capillaire de verre immergé dans une solution aqueuse.

L'une des applications potentielles de l'électroosmose est le mélange de fluides. Les méthodes traditionnelles de mélange de fluides reposent souvent sur l'agitation mécanique, comme l'agitation ou le secouage. Cependant, ces méthodes peuvent ne pas être réalisables ou efficaces dans certaines situations, notamment lorsqu'il s'agit de petits volumes ou d'échantillons délicats. Le mélange par électroosmose offre une approche alternative pour obtenir un mélange efficace sans avoir besoin d'une agitation mécanique. En appliquant un champ électrique, le liquide peut être induit à s'écouler et à se mélanger à l'intérieur d'un dispositif microfluidique ou d'un canal capillaire. La direction et l'intensité du flux peuvent être contrôlées en ajustant la force et la polarité du champ électrique. L'avantage du mélange par électroosmose réside dans sa capacité à offrir un contrôle précis sur le processus de mélange. Le flux peut être dirigé vers des régions spécifiques du dispositif, permettant un mélange ciblé de réactifs ou d'échantillons. De plus, le mélange par électroosmose peut être combiné à d'autres techniques, telles que la diélectrophorèse ou l'acoustophorèse, pour améliorer davantage l'efficacité du mélange. Le mélange par électroosmose trouve des applications dans divers domaines, notamment la chimie, la biologie et la microfluidique. Il a été utilisé pour la préparation d'échantillons, les réactions chimiques, l'analyse d'ADN, les systèmes de délivrance de médicaments, et bien plus encore. La capacité à réaliser un mélange efficace et contrôlé à petite échelle a ouvert de nouvelles possibilités pour les dispositifs de laboratoire sur puce, les diagnostics au point de soins et autres systèmes miniaturisés. En résumé, l'électroosmose est un phénomène où un champ électrique entraîne l'écoulement d'un liquide par rapport à une surface chargée ou à travers un milieu poreux chargé.

Il peut être exploité pour obtenir un mélange de fluides efficace, offrant des avantages en termes de contrôle précis et de miniaturisation. Ses applications potentielles couvrent différents domaines scientifiques et technologiques, contribuant aux avancées dans des domaines tels que la microfluidique et la biotechnologie.

### 1.5 Conclusion

Malgré les avancées significatives réalisées dans le domaine de la microfluidique et du mélange des fluides, il existe encore des lacunes et des défis à relever. Le mélange efficace et rapide des fluides, en particulier des molécules de poids moléculaire élevé, reste un enjeu majeur pour de nombreuses applications en chimie, en biologie et en médecine.

C'est dans ce contexte que notre recherche intervient. Nous nous intéressons à l'utilisation de l'effet d'électro-osmose pour améliorer le mélange des fluides en microfluidique. Nous cherchons à étudier et à simuler un micromélangeur de fluide utilisant l'électro-osmose, en modélisant le comportement du fluide et en évaluant ses performances de mélange. Cette étude contribuera à une meilleure compréhension des mécanismes de mélange induits par l'électro-osmose et ouvrira des perspectives pour le développement de dispositifs de mélange plus efficaces en microfluidique.

Dans les chapitres suivants, nous présenterons en détail la méthodologie de notre étude, la conception du micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose, la modélisation et la simulation par la méthode des éléments finis, ainsi que l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Enfin, nous concluons en résumant les principales conclusions de notre étude et en proposant des perspectives futures pour l'amélioration du micromélangeur et l'avancement de la microfluidique en général.

**CHAPITRE 02**  
**METHODOLOGIE ET CONCEPTION DU**  
**MICROMELANGEUR**

## 2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie et la conception du micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose. Nous détaillerons les différentes étapes de la conception, du choix des matériaux à la modélisation du dispositif, en passant par la fabrication et le montage. Nous aborderons également la modélisation et la simulation du micromélangeur à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF) pour prédire son comportement hydrodynamique et évaluer ses performances de mélange.

## 2.2 Description de la conception du micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose

Cette étude explore un modèle de chambre de mélange en forme d'anneau du côté de l'entrée. Le modèle de base se compose de deux entrées et d'une sortie. Dans ce modèle, deux concentrations distinctes du fluide sont introduites dans les moitiés supérieure et inférieure du canal d'entrée. Ces concentrations différentes se mélangent ensuite dans la chambre de mélange en forme d'anneau, et le mélange final est ensuite évacué par le canal de sortie. Cette configuration permet de réaliser un mélange efficace des fluides avec des concentrations différentes.

### 2.2.1 Description géométrique du micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose

Dans cet exemple, un micro mélangeur de géométrie relativement simple est utilisé. Le mélangeur combine deux fluides qui entrent par des entrées distinctes dans un canal unique de 10  $\mu\text{m}$  de large. Ces fluides se dirigent ensuite vers une chambre de mélange en forme d'anneau. La paroi extérieure de cette chambre comporte quatre microélectrodes placées à des positions angulaires de 45, 135, -45 et -135 degrés respectivement.

Dans ce cas particulier, nous pouvons faire la supposition que le rapport hauteur/largeur, représentant la profondeur du canal par rapport à sa largeur, est suffisamment élevé.

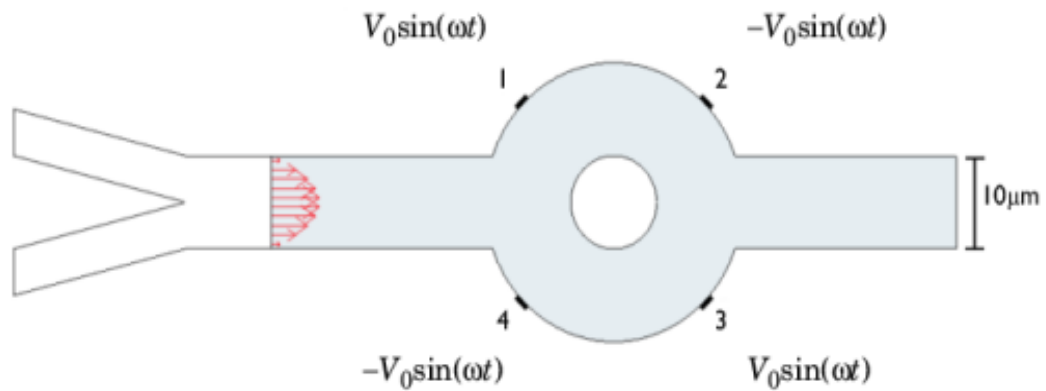


Figure 2. 1: Géométrie du micro mélangeur avec quatre électrodes symétriques sur la paroi de la chambre de mélange.

Cette caractéristique permet de modéliser le mélangeur en utilisant une géométrie en coupe transversale 2D. De plus, les paramètres de matériaux pertinents requis pour ce modèle sont spécifiés dans le tableau 1.[ 15]

Tableau 2. 1: Données d'entrée du modèle.

PARAMÈTRE	VALEUR	DESCRIPTION
$\rho$	1000 kg/ m <sup>3</sup>	Densité du fluide
$\eta$	10 <sup>-3</sup> Pas	Viscosité dynamique du fluide
$U_0$	0,1 mm/s	Vitesse moyenne à travers l'entrée
$\epsilon_r$	80.2	Permittivité électrique relative du fluide
$\zeta$	-0,1 V	Potentiel zêta à la frontière paroi-fluide
$\sigma$	0,11845 S/m	Conductivité de la solution ionique
$D$	10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> / s	Coefficient de diffusion
$c_0$	1 mol/ m <sup>3</sup>	concentration initiale

Étant donné que nous ne modélisons pas les deux canaux d'entrée, nous supposons que le canal d'entrée commence à une position où le flux a un profil laminaire entièrement développé et un afflux parabolique au début du domaine de calcul (la zone grise).

### 2.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un micromélangeur à effet d'électro-osmose repose sur l'interaction entre les fluides et les champs électriques. L'électro-osmose est un phénomène électrocinétique dans lequel un fluide chargé électriquement est déplacé sous l'influence d'un champ électrique appliqué. Notre modèle se compose d'une

entrée et d'une sortie, où deux concentrations différentes de fluide entrent dans les moitiés supérieure et inférieure du canal d'entrée et sortent par le canal de sortie. Le diamètre des canaux d'entrée et de sortie est de  $10\ \mu\text{m}$ , et la longueur du micromélangeur est de  $80\ \mu\text{m}$ . Le cercle intérieur a un diamètre de  $10\ \mu\text{m}$ , et le cercle extérieur a un rayon d'arc de cercle de  $15\ \mu\text{m}$  illustrer dans la figure 2.2.[16]

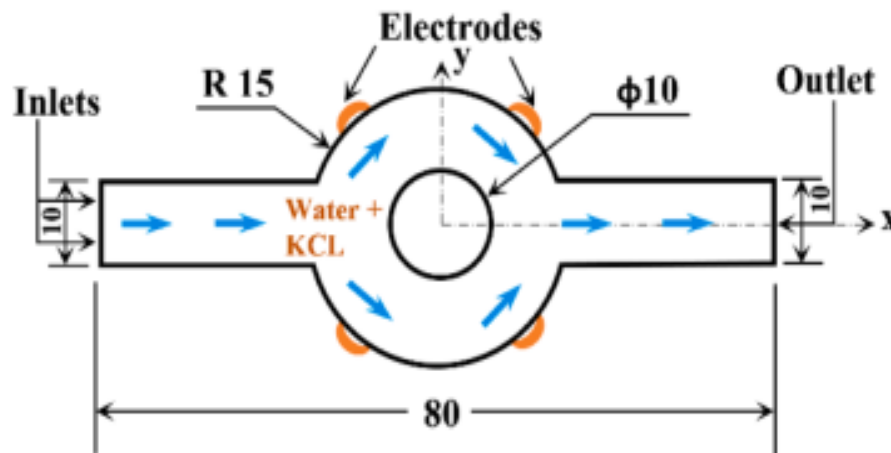


Figure 2. 2:diagramme schématique en forme d'anneau

Quatre microélectrodes sont situées sur la surface extérieure de l'arc de cercle extérieur du micromélangeur. Arc de cercle extérieur du micromélangeur aux positions angulaires  $\alpha = 45, -45, 135,$  et  $-135^\circ$ , qui sont capables de générer le champ électrique alternatif...Deux microélectrodes à une position angulaire de  $\alpha = 45$  et  $-135^\circ$  ont un potentiel positif, tandis que le potentiel de la microélectrode à une position angulaire de  $-135^\circ$  est positif. Potentiel positif, tandis que le potentiel des deux autres microélectrodes est négatif. Des micro-vortex sont générés à proximité des microélectrodes lorsqu'un champ électrique est appliqué. Lorsqu'un champ électrique est appliqué. Initialement, les fluides de différentes concentrations ont une faible vitesse, et la pression aux entrées et à la sortie est de pression atmosphérique.

Le microcanal n'est soumis à aucun gradient de pression externe ; par conséquent, le fluide ne s'écoule que sous l'effet de l'électroosmotic. Pour analyser la physique des flux, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- Les microélectrodes sont excitées par un champ électrique sinusoïdal.
- Les fluides sont indépendants du taux de cisaillement
- Les propriétés thermo physiques des fluides sont constantes.

- Les forces flottantes sont négligeables par rapport aux forces visqueuses et de pression.
- L'épaisseur de la double couche électrique (EDL) est de l'ordre du nm.
- Aucune réaction chimique n'a lieu entre les différentes espèces.
- La conductivité électrique est constante et l'effet Joule est ignoré pour l'ordre de grandeur de la tension électrique appliquée.
- Les ions sont considérés comme des charges ponctuelles et l'effet stérique n'est donc pas pris en compte. N'est pas pris en compte.
- La force du corps causée par le champ électrique a été ignorée loin de la surface solide du micromélangeur. de la paroi solide du micromélangeur.
- Les parois du micro canal sont considérés comme des non conductrices.

Lorsque le fluide se déplace sous l'effet de l'électro-osmose, il subit des forces de cisaillement qui favorisent le mélange des deux concentrations différentes. Ce fluide mélangé s'écoule librement hors de la limite d'extrémité droite, où vous spécifiez des composantes de contrainte totale nulle normales à la limite :

$$\mathbf{n} \cdot [-\mathbf{PI} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] = 0 \quad (2.1)$$

Lorsqu'elles sont mises en contact avec un électrolyte, la plupart des surfaces solides acquièrent une charge de surface. En réponse à la charge de surface formée spontanément, une solution chargée se forme à proximité de l'interface liquide-solide. Connue sous le nom de double couche électrique, elle se forme à cause des groupes chargés situés sur la surface qui fait face à la solution. Lorsque l'opérateur applique un champ électrique, le champ électrique générant le flux électro osmotique déplace le liquide chargé dans la double couche électrique. Ce schéma impose une force sur la solution chargée positivement près de la surface de la paroi, et le fluide commence à s'écouler dans la direction du champ électrique. Les gradients de vitesse perpendiculaires à la paroi donnent lieu à un transport visqueux dans cette direction. En l'absence d'autres forces.

Ce modèle remplace la double couche électrique mince par la relation de Helmholtz-Smoluchowski entre la vitesse électro osmotique et la composante tangentielle du champ électrique appliqué :

$$\mathbf{u} = \frac{\varepsilon_w \zeta_0}{\eta} \nabla_T V \quad (2.2)$$

Dans cette équation,  $\varepsilon_w = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  désigne la permittivité électrique du fluide



(F/m),  $\zeta_0$  représente le potentiel zêta à la paroi du canal (V) et  $V$  est égal au potentiel (V). Cette équation s'applique à toutes les limites à l'exception de l'entrée et de la sortie.

En supposant qu'il n'y a pas de gradients de concentration dans les ions qui transportent le courant, vous pouvez exprimer l'équilibre actuel dans le canal avec la loi d'Ohm et l'équation d'équilibre pour la densité de courant

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = 0 \quad (2.3)$$

où  $\sigma$  désigne la conductivité (S/m) et l'expression entre parenthèses représente la densité de courant (A/m<sup>2</sup>).

Les potentiels électriques sur les quatre électrodes sont sinusoïdaux dans le temps avec la même valeur maximale ( $V_0 = 0,1$  V) et la même fréquence (8 Hz), mais ils alternent en polarité. Les potentiels sur l'électrode 1 et 3 sont  $V_0 \sin(2\pi ft)$ , alors que ceux sur les électrodes 2 et 4 sont  $-V_0 \sin(2\pi ft)$  (voir Figure 2.1).

Supposons que toutes les autres limites sont isolées. La condition aux limites d'isolation met à zéro la composante normale du champ électrique.

$$-\sigma \nabla V \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (2.4)$$

A la moitié supérieure de l'entrée (voir Figure 2.1) le soluté a une concentration donnée,  $c_0$ ; dans la moitié inférieure, la concentration est nulle. Ainsi, supposons que la concentration passe brusquement de zéro à  $c_0$  au milieu de la limite d'entrée. La solution mélangée s'écoule de la sortie droite par convection, et toutes les autres limites sont supposées isolées.

A l'intérieur du mélangeur, l'équation de convection-diffusion suivante décrit la concentration des substances dissoutes dans le fluide :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) = R - \mathbf{u} \cdot \nabla c \quad (2.5)$$

Ici,  $c$  est la concentration,  $D$  représente le coefficient de diffusion,  $R$  désigne la vitesse de réaction et  $\mathbf{u}$  est égal à la vitesse d'écoulement. Dans ce modèle  $R = 0$  car la concentration n'est affectée par aucune réaction.

En utilisant l'effet d'électro-osmose, le micromélangeur offre un contrôle précis sur le débit et la distribution des fluides, ce qui permet un mélange efficace à l'échelle microscopique. Ce principe de fonctionnement est largement utilisé dans divers

domaines, tels que la microfluidique, la chimie analytique et la biotechnologie, pour réaliser des réactions chimiques rapides et homogènes dans des dispositifs miniaturisés.

### 2.2.3 Modélisation mathématique

Dans la présente modélisation du micromélangeur, trois aspects physiques (tels que le courant électrique, le fluide et le transport des espèces diluées) sont pris en considération le fluide, et le transport des espèces diluées) sont prises en considération. La modélisation mathématique avec les conditions aux limites de la physique mentionnée est présentée dans la sous-section suivante.

#### 2.2.3.1 Champ électrique

Dans la présente simulation, l'équation de Poisson [17] est prise en compte pour connaître le potentiel aux différents endroits du micromélangeur.

Connaître le potentiel aux différents endroits du micromélangeur. L'équation de Poisson peut être exprimée comme suit :

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_e}{\epsilon \epsilon_0} \quad (2.6)$$

Où  $\phi$  et  $\rho_e$  représentent la distribution du potentiel électrique et la densité de charge libre dans le micromélangeur, respectivement. Tandis que  $\epsilon_0$  et  $\epsilon$  représentent la permittivité électrique dans le milieu libre et la constante diélectrique dans le micromélangeur. Comme, loin de la paroi solide du micromélangeur de la paroi solide du micromélangeur, il n'y a pas d'ions libres et la charge nette devient donc nulle. Par conséquent, l'équation de Poisson prend la forme de l'équation de Laplace [28] et s'exprime par

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.7)$$

Les conditions aux limites suivantes sont appliquées pour résoudre l'équation ci-dessus parois du micro canal

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \phi = 0 \quad (2.8)$$

Deux paires d'électrodes

$$V = V_0 \sin(2\pi ft) \quad (2.9)$$

La sortie du microcanal

$$\phi = 0 \quad (2.10)$$

Où  $\vec{n}$  représente le vecteur de base normal unitaire orienté vers l'intérieur de la

phase liquide.

### 2.2.3.2 Champ d'écoulement

Pour déterminer le vecteur vitesse et les distributions de pression dans le microcanal, l'équation de continuité et le modèle de Navier-Stokes sont utilisés. Dans le microcanal, l'équation de continuité et l'équation de Navier-Stokes sont représentées comme suit :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \boldsymbol{\eta}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla P = \mathbf{0} \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Ils sont résolus, en supposant que le fluide est newtonien et incompressible.

### 2.2.3.3 Champ de concentration

Pour déterminer le champ de concentration, l'équation Convection-Diffusion est prise en compte. L'équation de convection-diffusion est exprimée comme suit :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \vec{\nabla} C_i = D_i \nabla^2 C_i \quad (2.12)$$

où  $i = 1$  et  $2$  dans la présente étude.  $C_i$  et  $D_i$  indiquent la concentration de la  $i$ ème espèce et le coefficient de diffusion de cette espèce, respectivement. Pour résoudre le champ de concentration, les limites suivantes ont été imposées :  $C = 0$  pour la moitié inférieure et  $C = C_0$  pour la moitié supérieure des parois du microcanal [18].

$$\mathbf{n} \cdot \nabla C_i = 0 \quad (t \geq 0) \quad (2.13)$$

## 2.3 Procédés technologiques de réalisation et dimensionnement

### 2.3.1 Choix des matériaux et des dimensions appropriés

Lors de la conception d'un micromélangeur électroosmotique, le choix des matériaux et des dimensions appropriés est crucial pour sa performance et sa fonctionnalité. Voici quelques considérations à garder à l'esprit :

Sélection des matériaux :

- Substrat : Choisissez un matériau ayant de bonnes propriétés d'isolation électrique, tel que le verre ou le silicium, afin de minimiser les courants de fuite et d'assurer un écoulement électro-osmotique efficace.
- Électrodes : Utilisez des matériaux conducteurs tels que l'or, le platine ou l'oxyde d'indium-étain (ITO) pour les électrodes, qui offrent une faible

résistance et un bon contact électrique.

- Revêtement du canal : Envisagez d'utiliser un revêtement hydrophile sur les parois du canal pour améliorer l'écoulement électro-osmotique. Des matériaux tels que le poly diméthylsiloxane (PDMS) ou les hydrogels peuvent être utilisés à cette fin.
- Largeur et hauteur : Les dimensions du microcanal doivent être soigneusement choisies pour optimiser le mélange. Des canaux étroits (typiquement dans la plage de 10 à 100  $\mu\text{m}$ ) favorisent un mélange efficace en augmentant l'interaction entre les différents flux de fluides.
- Longueur : La longueur du canal doit être suffisante pour permettre un mélange efficace, mais pas excessivement longue, car cela pourrait augmenter la perte de pression et le temps de mélange. Des longueurs de quelques centimètres à quelques millimètres sont courantes.
- Largeur des électrodes : La largeur des électrodes doit être suffisante pour assurer des champs électriques uniformes dans le canal. Une largeur comparable ou légèrement inférieure à celle du canal est généralement utilisée.
- Espacement des électrodes : L'espacement entre les électrodes affecte la force du champ électrique et l'écoulement électro-osmotique résultant. L'espacement est généralement choisi pour maintenir un équilibre entre un mélange efficace et une faible consommation d'énergie.

Prenez en compte les contraintes de taille et les exigences pratiques de votre application. Les dispositifs de microfluidique sont souvent conçus pour être compacts et portables, donc gardez les dimensions globales petites et gérables.

Il est important de noter que les dimensions et les matériaux optimaux peuvent varier en fonction des exigences spécifiques de votre conception de micromélangeur et des propriétés des fluides à mélanger. Il est donc recommandé d'effectuer des simulations et des expériences pour affiner les paramètres de conception afin d'obtenir les meilleures performances.

Les procédés de microfabrication sont utilisés pour usiner le silicium ou le verre afin de créer des microcanaux destinés au transport, au mélange, à la séparation et aux réactions de fluides dans un microréacteur.

### 2.3.1.1 Technologie de fabrication en silicium ou en verre

Les procédés de microfabrication sont donc employés pour l'usinage du silicium ou du verre dans le but de réaliser des microcanaux destinées au transport, au mélange, à la séparation, d'échantillon de fluides sur une puce microfluidiques [19].

Ces procédés se résument en général, à un dessin accompagné de gravure de microcanaux dans un substrat en silicium ou en verre nécessitant de passer par la technique de photolithographie et de gravure. Ceci est suivi par un assemblage d'un capot permettant la fermeture des canaux et assure l'étanchéité du système. Les étapes essentielles pour la réalisation d'un microcanal sur silicium ou sur verre sont résumées dans la figure 2.3.

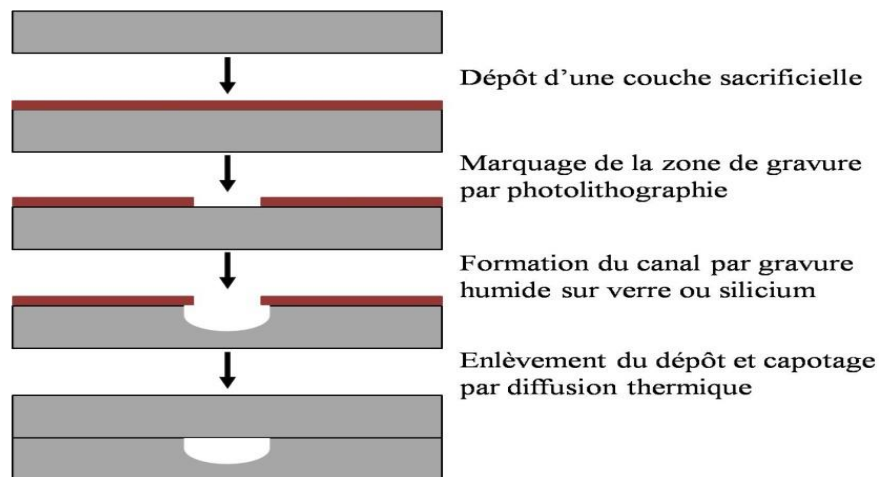


Figure 2. 3:Les étapes technologiques de la réalisation des canaux microfluidiques sur un substrat de silicium ou de verre [5] .

Le silicium est l'un des matériaux le plus utilisé pour la fabrication des dispositifs microfluidique [43]. Si le silicium présente d'un point de vue industriel l'avantage de la facilité de fabrication, il n'est pas idéal du fait de son opacité gênant une éventuelle détection optique, et sa mise en œuvre n'est pas aisée. Le verre permet de contourner l'inconvénient de l'opacité. Ses propriétés intéressantes surtout de sa transparence et sa résistance à la température, à la pression et aux solvants agressifs en font un matériau privilégié pour les systèmes microfluidiques [22-23]. Malheureusement, les techniques utilisées pour la fabrication des microcanaux en verre sont plus ou moins coûteuses et la gravure sur du verre reste difficile à réaliser. Les chercheurs se sont donc rapidement tournés vers des technologies dites lithographie douce (*soft-lithography*) utilisant des élastomères [22, 20].

### 2.3.1.2 Technologie de fabrication en lithographie douce en PDMS

Les dispositifs à base de polymère souple en PDMS sont fabriqués par une technique dite de lithographie douce (*Soft-lithography*). Dans une première étape, cette technique est basée sur la réalisation par photolithographie d'un moule en résine dure (généralement SU8) représentant un contre empreinte d'un motif particulier de microcanal. Elle est suivie par l'utilisation de ce moule pour transposer le motif des microcanaux dans une matrice par coulage du pré-polymère liquide en PDMS [24, 25].

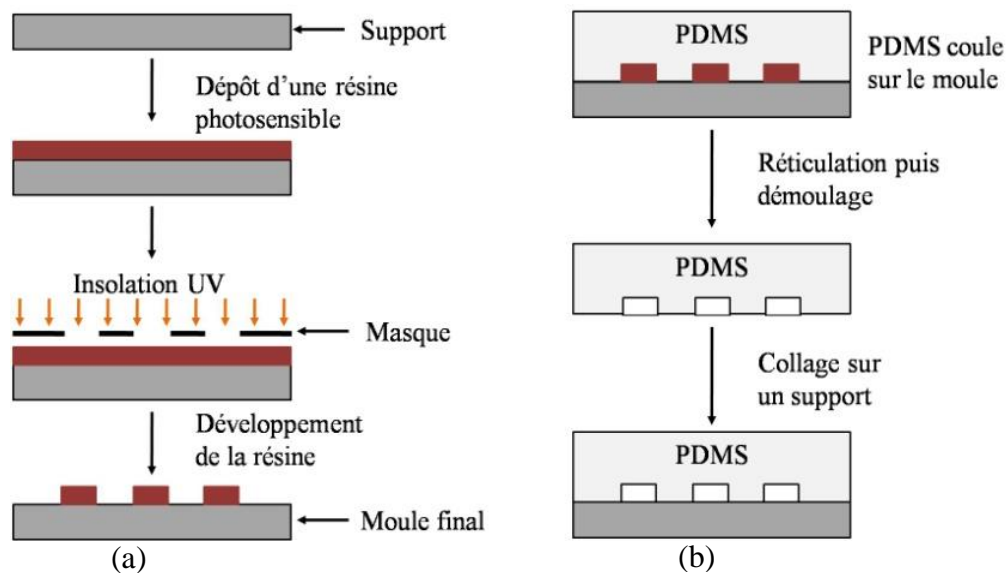


Figure 2. 4: Les étapes de fabrication d'un dispositif microfluidique par lithographie douce : (a) Réalisation du moule, (b) réalisation de la structure en PDMS.

La réalisation d'un moule en résine dure (SU8) nécessite plusieurs étapes schématisées sur la figure 2. 4.a. À partir de cette technique, il est possible de produire des moules de microcanaux de hauteur comprise typiquement entre 1 et 300 $\mu\text{m}$ . Pour obtenir des hauteurs plus grandes, il est nécessaire de déposer plusieurs couches successives de résines.

Les étapes de fabrication des dispositifs en PDMS à partir du moule en résine sont schématisées sur la figure 2. 4.b.

- ✓ Un mélange de pré-polymère PDMS liquide et d'agent réticulant avec une concentration de 10 :1 est directement versé sur le moule.
- ✓ Une cuisson (environ une heure à 65°C) permet au PDMS de réticuler et se transformer en un élastomère. Puis la couche de PDMS peut être découpée et décollée.

- ✓ La plaque de PDMS micro structurée est alors percée aux extrémités des microcanaux afin de permettre l'insertion des connexions pour l'entrée et la sortie des fluides. La matrice ainsi obtenue est scellée sur un support de silicium, une lame de verre ou même une couche réticulée en PDMS.

L'assemblage se fait par simple mise en contact après oxydation de surface dans une chambre à plasma sous atmosphère raréfiée en oxygène ou sous *ozoneur*. Cette opération est donc réalisée sous un plasma d'ozone, pendant 20 minutes pour le verre ou le silicium et 1 minute pour le PDMS. Une fois collé, le dispositif est placé plusieurs heures à 65°C en étuve [26-27].

#### 2.4 Flot de conception du micromélangeur

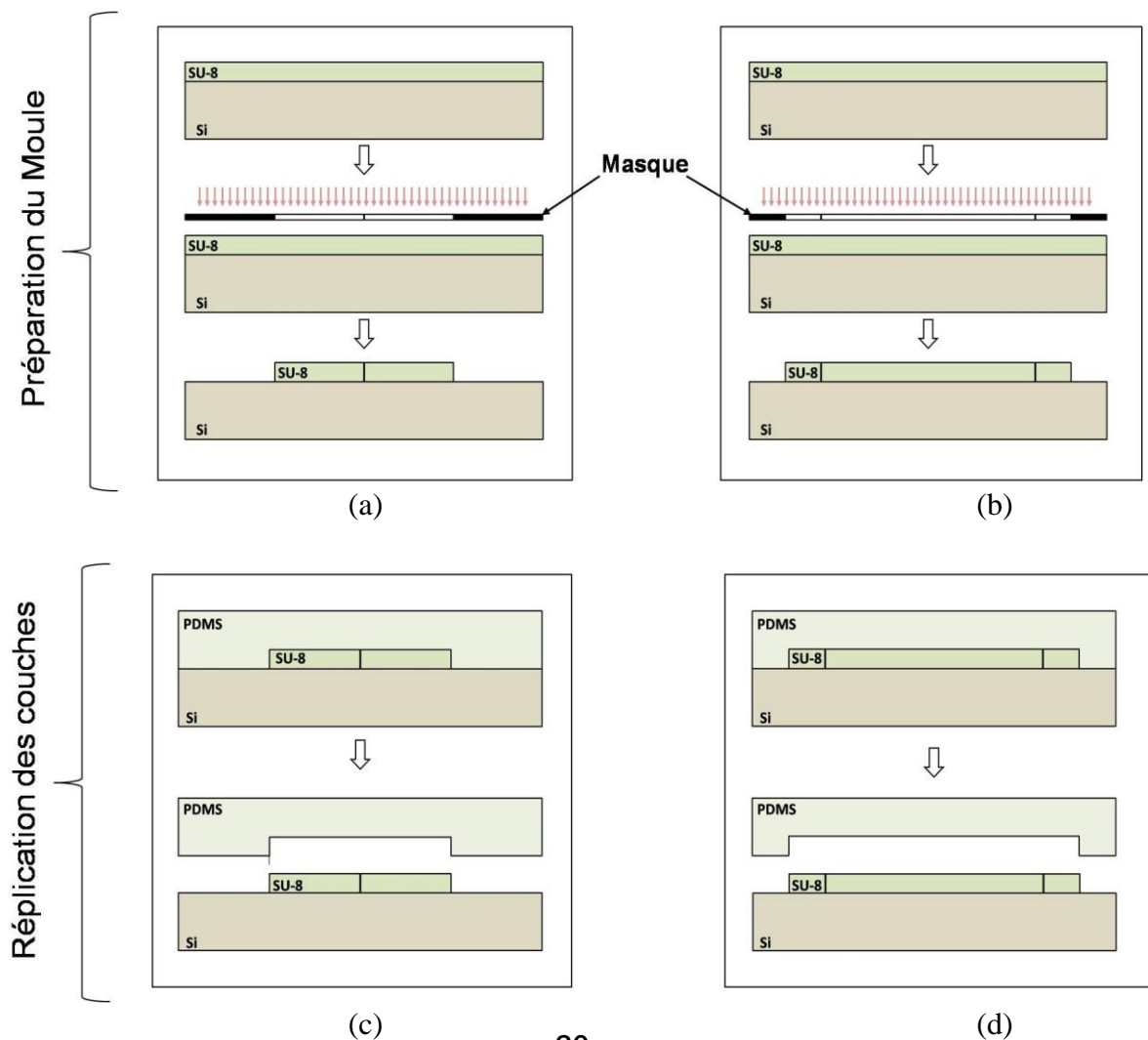
Le mot flot de conception a été hérité des procédés de réalisation des circuits microélectronique et nanoélectronique. Il résume la combinaison explicite des outils de conception assistée par ordinateur (CAO) pour réaliser la conception d'un système MEMS ou d'un circuit intégré. Il présente la première étape est avant tout l'élaboration et fabrication. Il s'agit d'un kit regroupant toutes les informations relatives à la technologie en question :

- ✓ La liste des couches ou layers utilisées ;
- ✓ Des modèles pour effectuer des simulations ;
- ✓ Une liste de règles de dessin ;
- ✓ Souvent, quelques briques de base.

Grâce à lui, les concepteurs peuvent créer les éléments dans les outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et procéder à leur microfabrication. En se basant sur la conception du modèle précédent (figure 2. 5), un flot de procédé de fabrication est proposé et illustré à la figure 3.4. Ce flot de conception utilise la technique de lithographie douce, qui implique la technique de multicouche et la technique du moulage en PDMS. Notre microdispositif sera fabriqué avec deux couches. Il comprend une couche mince en PDMS supérieure avec la structure géométrique en H et quatre orifices circulaires d'interconnexions à l'extrémité du microcanal. et aussi une couche mince inférieure aussi en PDMS est prise comme une plateforme support pour le microcanal. Le processus de fabrication devra être divisé en trois étapes : étape de préparation, étape de réplication et l'étape de collage des structures.

La première étape de notre flot de conception décrit la réalisation des moules (figure 2. 6.a-b). Deux moules devront être fabriqués séparément à l'aide d'une résine photosensible négative SU-8 (Micro Chem Corp.). Cette dernière peut être structurée sur un substrat de silicium miroir ou du verre poli afin d'obtenir le moule à l'aide de la technique photo lithographique standard. Les étapes de préparation des moules pour les couches supérieur et inférieur sont montrée dans la figure 2. 7.a, ainsi que celle de préparation du moule pour la couche intermédiaire indiquée dans la figure 2. 8.b.

La deuxième étape consiste en la fabrication de couches en PDMS (figure 2. 9.c-d). Un mélange de PDMS de pré-polymère liquide (Sylgard 184 Dow Corning) avec l'agent durcisseur à un rapport de volume de 10 :1 devra être coulé sur le moule de SU-8, fabriqué précédemment, (figure 2.10.c) pour la réplique des couches supérieures et inférieures. Le mélange ainsi préparé de C-PDMS devra être également coulé sur le moule de SU-8 afin de préparer la couche intermédiaire. Une très fine couche de film plastique devra être ensuite soigneusement placée au-dessus afin d'éviter l'introduction des bulles d'air (figure 2. 11.d).





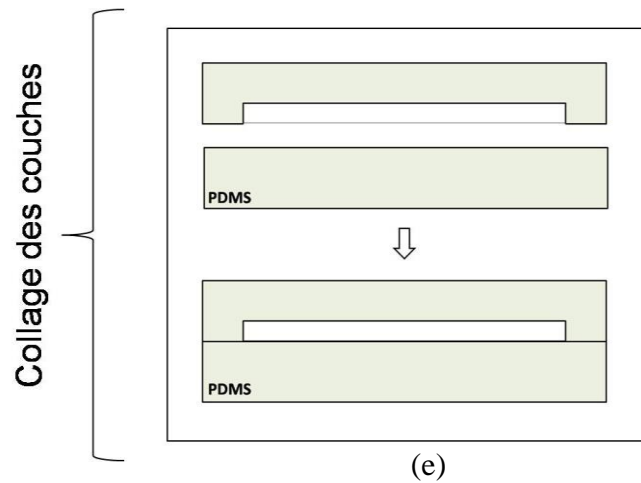


Figure 2. 12: Flot de conception proposé du micromélangeur.

Le collage des trois couches nécessite un alignement. En d'autres termes, un alignement précis doit être réalisé entre la couche inférieure, la couche intermédiaire et la couche supérieure. Dans le cas contraire, la précision de la superposition des trois couches ne peut être assurée. Cependant, en général, les entreprises industrielles ont des systèmes avec un bon contrôle d'alignement. Par conséquent, le capteur de débit proposé est fabricable avec un coût faible en moins de 24 heures en utilisant un équipement classique.

## 2.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre présente une méthodologie complète et détaillée pour la conception, la modélisation et la fabrication d'un micromélangeur utilisant l'effet d'électro-osmose. Les résultats obtenus à partir de la modélisation et des simulations peuvent être utilisés pour optimiser la conception du micromélangeur et améliorer ses performances de mélange.

**CHAPITRE 03**  
**SIMULATION, RESULTATS ET**  
**DISCUSSIONS**

### **3.1. Introduction**

Les micro-mélangeurs à écoulement électro-osmotique, entraînés par des champs électriques, peuvent générer un écoulement osmotique dans les micro-canaux, provoquer des états d'écoulement chaotiques des fluides, déformer les lignes d'écoulement des champs d'écoulement laminaire et générer des champs d'écoulement tourbillonnaires dans les micro-canaux. Ainsi, la zone de contact entre les fluides est augmentée au maximum et l'efficacité de mélange est améliorée. En raison de sa structure simple, de son fonctionnement pratique et de son efficacité de mélange élevée, cette technologie est devenue la plus étudiée et appliquée dans le domaine de la microfluidique et des systèmes d'analyse sur puce.

Ce chapitre est consacré à la simulation, à l'analyse et à la discussion des performances du micromélangeur de fluide utilisant l'effet d'électro-osmose. Nous présenterons d'abord la méthode des éléments finis (MEF) utilisée pour simuler le dispositif, puis nous analyserons les résultats obtenus en fonction de différents paramètres tels que la fréquence du champ électrique, la concentration des fluides, etc. Nous comparerons également les résultats de simulation avec des résultats expérimentaux pour valider notre modèle.

### **3.2 Modélisation pas élément finis**

Vu la complexité des structure set des écoulements utilisées dans les systèmes microfluidique dans une optique de conception, il est inconcevable d'utiliser une approche analytique. En effet, la prise en compte des détails géométrique et physique nous impose de résoudre, par des méthodes numériques, les équations décrivant l'écoulements l'inter action fluide-structure.

Il est important à travers cette modélisation de pouvoir simuler le fonctionnement des microdispositifs à partir de modèles physiques ou multiphysiques dans le cas de couplage de plusieurs modèles physiques [28 ,29, 30,31]. Cette modélisation permet, à moindre frais, de prédire le comportement du microdispositive avant même de passer l'expérience et à la réalisation du composant. Dans une approche de conception, la simulation permet de réaliser un gain considérable en temps et coût, réduisant ainsi, le risque d'erreurs les sur coûts qui s'enengendrent [30]. En technologie microfluidique qui est relativement un domaine nouveau, la simulation numérique est un outil très utile en recherche et développement. En intégrant dans un modèle numérique divers complexités telles que la géométrie du microcanale

du microdispositif , les modèles d'écoulements du fluide ainsi que la mécanique des structures du microdispositif, le comportement du système peut être prédit avec une grande précision. La simulation numérique permet également de faciliter la visualisation des phénomènes d'écoulement complexes. Ceci nous permet de nous concentrer sur l'analyse et la compréhension des phénomènes physiques des interactions fluide-structure, entre autres, mission difficilement réalisable expérimentalement, vu les faibles dimensions des microsystèmes [30].

Ces simulations numériques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant plusieurs méthodes numériques généralement adaptée saux types d'équations à résoudre. Dans notre cas, nous sommes intéressés à l'utilisation de la méthode des éléments finis (Méthode des Elément Finis), capable d'analyser et de résoudre une multitude de problèmes multiphysiques tels que l'interaction fluide-structure, la piézorésistivité, etc ... [28, 26, 31]. Cette méthode des éléments finis est implémentée dans plusieurs logiciels commerciaux d'éléments finis tel que Comsol Multiphysiques, Ansys, Conveter, IntelliSense, etc.... [32]. La plupart de ces logiciels des simulations présentent des interfaces graphiques très conviviales et interactifs ainsi qu'une multitude d'exemples de modèle, permettant à toute utilisateur de commencer facilement. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons utilisé Comsol Multiphysics v5.5a [29].

### 3.2.1 Principe de la modélisation par la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est un outil mathématique qui a été développé pour la résolution numérique d'équations différentielles applicable sur une diversité de problèmes physiques. Cette technique est très utilisée dans la conception et l'analyse des microdispositifs (dans notre cas, il s'agit des dispositifs microfluidiques). Elle est utilisée aussi dans la modélisation et résolution de nombreux problèmes pour les applications industrielles et académiques [32, 30-33]. Le principe d'une telle méthode est relativement simple. Elle est basée sur la discrétisation géométrique du domaine ou sous-ensemble du domaine (sous-domaine) en petit élément continue. La structure est donc subdivisée en un nombre fini d'éléments, nommés "éléments" ou "mailles", possédant des formes géométriques fondamentales (2D ou 3D)

### 3.2.2 Procédure d'introduction d'un modèle pour la méthode des éléments finis (MEF) sous Comsol Multiphysics

Une analyse complète d'un micro dispositif par la méthode des éléments finis sous Comsol Multiphysics doit comporter une série d'étapes séparées. En effet, une interface interactive permet de guider l'utilisateur novice ou même l'utilisateur expérimenté afin de ne rien omettre le long de cette procédure pouvant causer des problèmes de convergence ou des erreurs lors du lancement de l'opération de calcul [29]

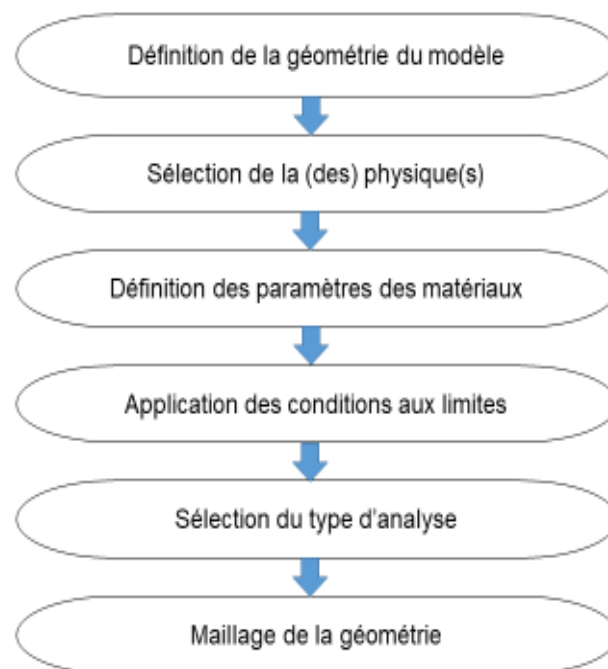


Figure 3. 1:Les procédures et les étapes de la simulation par éléments finis.

La figure 3.1 résume ces étapes qui sont comme suit :

- Définition de la géométrie du microdispositif : On définit, en premier lieu, les formes et grandeurs géométriques constituant le modèle. Nous pouvons même entrer des géométries paramétrées afin de faciliter le balayage d'une large gamme de dimensions possibles à notre géométrie.
- Définition de la physique : Dans cette étape, nous pouvons choisir une physique unique adaptée à notre problème tel que : dynamique des fluides, structures mécanique, électrostatique, électromagnétisme, etc... Mais d'un autre côté, nous pouvons se rapprocher encore plus de la réalité en introduisant plusieurs physiques en même temps. L'exemple typique est celui du FSI où un couplage est nécessaire entre les équations décrivant les écoulements de fluides et le comportement de la structure mécanique. Nous pouvons enrichir notre analyse

par l'adjonction de plusieurs physiques en même temps, nous permettons de prendre en compte tous les aspects du comportement de notre microdispositif, C'est l'approche multiphysique.

- Définition des paramètres des matériaux : Selon la ou les physiques Sélectionnées auparavant, la liste des matériaux utilisés et leurs propriétés devront être introduites. Les propriétés d'homogénéité, d'isotropie, orthotropie, d'anisotropie peuvent être introduites. Une base de données conséquente alimente le programme. Si d'autres valeurs sont désirées, elles peuvent être introduites manuellement en remplissant les tenseurs appropriés (tenseurs d'élasticité, de permittivités électriques, de piézoélectricité, etc...).
- Définition des conditions aux limites : Afin de permettre aux simulations d'être le plus près possible de la réalité expérimentale et de limiter le nombre de solutions éventuelles, il est impératif de fixer des conditions aux frontières. Ces conditions peuvent être la valeur d'une grandeur physique imposée sur des surfaces ou des lignes ou même des points tels que le module de la vitesse à l'entrée d'un microcanal, la valeur de la pression appliquée sur une surface, la valeur de la tension électrique sur une face d'un dispositif, etc.
- Par contre, ces conditions peuvent être un type de comportement imposé sur une frontière tel que le mode de fixation d'une poutre (encastree, libre, ressort,), périodicité sur une face propagation d'une pour la vibration (Bloch, continue, semi-infinie), etc ..
- Sélection du type d'analyse : Afin de fixer la méthode numérique de résolution, il est important de définir le type d'analyse demandé. En premier, nous trouvons l'analyse stationnaire qui calcule les solutions indépendantes du temps, autrement dit, les solutions en régime statique. Il y a ensuite le calcul des solutions dépendantes du temps. Finalement, il y a la résolution fréquentielle qui peut demander le calcul des valeurs propres à notre système ou bien le calcul en fonction de la fréquence.
- Maillage de la géométrie : Le maillage de la structure est l'étape la plus critique de la simulation car c'est du choix des dimensions et de la nature des éléments du maillage que peut dépendre la convergence ou pas vers une solution exacte, la mémoire vive nécessaire au sein de l'ordinateur pour calculer sans problème le dépassement, la vitesse de convergence et la précision de calcul.
- La phase du calcul et de l'exploitation des résultats : Une fois les étapes précédentes terminées, on pourra lancer l'étape de calcul qui peut être plus ou

moins lente. Ceci dépend fortement de la complexité de la géométrie du système à étudier, de la puissance de calcul de l'ordinateur (carte mère unique ou plusieurs cartes mères multi-cœurs) et de la capacité de la mémoire vive (RAM). Une fois le calcul terminé, l'interface d'exploitation des résultats est très intéressante. En effet, les résultats de simulations sont stockés en mémoire et n'importe quelle exploitation est possible.

Enfin, la solution est obtenue en résolvant le système discrétisé et les systèmes d'équations des variables du champ aux nœuds du maillage. Cette méthode à élément finis est très sollicitée dans l'utilisation pratique [34-35].

### 3.3 Les étapes des simulations suivies pour le système de séparation par un micromélangeur

#### 3.3.1 Création du modèle de simulation

- Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, sélectionnez Model Wizard. Cette option permet de définir pas à pas les modalités du problème.
- Choisissez ensuite un modèle spatial en 2D.
- Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle laminare flow dans la catégorie le fluid flow et electriccurrent dans la catégorie AC/CD après transport of dilutes (tds) dans la catégorie chemicalspecies transport. Cliquez sur Add puis sur l'icône study.
- Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous PresetStudies, choisissez le cas d'étude en régime permanent (Stationary).
- Puis cliquez sur l'icône DONE et sauvegardez la simulation dans votre répertoire personnel.

#### 3.3.2 Définition des paramètres globaux

Dans le Model Builder, faites apparaître le menu contextuel (clic droit de la souris) de Global Définitions et cliquez sur Paramètres. Lorsque vous définissez une nouvelle variable, il est possible et fortement conseillé de lui associer une unité. Les unités doivent être mises entre crochets. Par exemple, pour spécifier une pression P0 de 2 [Pa] écrire sous Name « p0 » et sous Expression « 2 [pascal] ». Vous pouvez maintenant entrer les différentes variables relatives au problème, les expressions des unités suggérées sont retranscrites à la Figure 3.2 :

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
omega	$2\pi[\text{rad}]\cdot 8[\text{Hz}]$	50.265 Hz	Angular frequency of the AC potential
sigma_w	0.11845[S/m]	0.11845 S/m	Conductivity of the ionic solution
D	$1\text{e-}11[\text{m}^2/\text{s}]$	$1\text{E-}11 \text{ m}^2/\text{s}$	Diffusion coefficient of the solution
c0	$1[\text{mol}/\text{m}^3]$	$1 \text{ mol}/\text{m}^3$	Initial concentration
V0	0.1[V]	0.1 V	Maximum value of the AC potential
U0	0.1[mm/s]	$1\text{E-}4 \text{ m}/\text{s}$	Mean inflow velocity
eps_r	80.2	80.2	Relative permittivity of the fluid
t	0[s]	0 s	Start time
zeta	-0.1[V]	-0.1 V	Zeta potential

Figure 3. 2:Les paramètres du modèle.

### 3.3.3Création de la géométrie

Pour construire la géométrie souhaitée on doit suivre les instructions suivantes :

- Faites un clic droit sur *Geometry* dans le *Model Builder*
- Choisissez un rectangle.
- Sous l'onglet Size and Shape, entrez les variables définies dans depth, Width et dans Height, associée à de la longueur et la largeur la hauteur du rictangle1.
- Sous l'onglet Position, centrez le rectangle1 en (0, 0).
- Cliquez chaque fois sur build All pour voir la nouvelle géométrie.
- Cliquez sur Mirror afin de faire une forme symétrique
- Cliquez sur union afin de fusion la forme supérieure avec le fond sans une barrière entre eux

### 3.3.4. Ajout des propriétés du matériau

Pour ajouter un matériau dans le micromélangeurfaut :

- Cliquez droit sur le sous-menu Matériel disponible dans Component 1.
- Sélectionnez AddMaterial, une nouvellefenêtre apparait à droite pour choisir parmi une liste de matériaux.
- Ajoutez-le au modèle. Water, liquide est maintenant sous l'onglet Matériaux,

### 3.5 Sélection de la physique d'étude

La prolifération des cellules dans les canaux qui combinent le liquide dans le cadre d'un écoulement laminaire ont été réalisées en choisissant les physiques d'études « laminaire flow », et « Transport of Dilutedspecies » aussi que « electrical Current ».



### 3.3.6 Écoulement laminaire

L'interface de l'écoulement laminaire est utilisée pour calculer les champs de vitesse et de pression pour l'écoulement d'un fluide monophasé dans le régime d'écoulement laminaire. Un flux restera laminaire tant que le nombre de Reynolds est inférieur à une certaine valeur critique. À des nombres de Reynolds supérieurs, les perturbations ont tendance à croître et provoquent une transition vers la turbulence.

- Transport d'espèces diluées :

L'interface Transport d'espèces diluées est utilisée pour calculer le champ de concentration d'un soluté dilué dans un solvant. Le transport et les réactions des espèces dissoutes dans un gaz, un liquide ou un solide peuvent être calculés.

Les forces motrices du transport peuvent être la diffusion par la loi de Fick, la convection, lorsqu'elle est couplée à un écoulement de fluide, et la migration, lorsqu'elle est couplée à un champ électrique.

### 3.3.7 Les condition aux limites du model pour les deux études

Aux entrées et aux sorties, les conditions de pression s'appliquent avec une contrainte visqueuse qui disparaît. En réglant la pression sur les enveloppes à zéro, la pression aux entrées représente la chute de pression sur le canal. Ces conditions d'entrée et de sortie sont conformes au microfiltre en H faisant partie d'un système de canaux de largeur constante, ce qui justifie l'hypothèse d'un écoulement développé.

Aux murs, aucune condition de glissement n'indique que la vitesse est nulle.

Au niveau du plan de symétrie, l'utilisation de la condition de limite de symétrie définit la composante de vitesse dans la direction normale de la surface à zéro.

Pour le transport d'espèces diluées (Transport of Diluted species):

Aux entrées, utilisez la condition de limite de concentration pour régler la concentration. Aux admissions A et B, la concentration est respectivement de 1 mol / m<sup>3</sup> et 0 mol / m<sup>3</sup>.

Au niveau des enveloppes, appliquer la condition d'écoulement de convection à travers la condition aux limites Outflow, en indiquant que le transport diffusif perpendiculaire à la normale de limite est négligeable. Cette condition éliminera ainsi les gradients de concentration dans la direction de l'écoulement.

Modéliser le plan de symétrie et les parois cellulaires avec la condition Pas de flux. Cette équation indique que le flux des espèces perpendiculaires à l'équivalent limite est nul.

### 3.3.8 Le maillage (meshing)

La méthode des éléments finis repose sur un découpage de l'espace selon un maillage. D'habitude l'on choisit un maillage carré ou triangulaire pour un espace 2D et tétraèdre en 3D. Il est nécessaire que le maillage soit régulier et adapté à la dimension de dispositifs. Pour cette simulation, nous avons sélectionné un maillage prédéfini grossier pour la géométrie entière.

## 3.4. Résultats et discussion

Cette section présente le processus de mélange en utilisant un tracé de surface de concentration, des lignes de courant fluides et des lignes de potentiel électrique pour notre géométrie avec et sans champ électrique. De plus, on analyse l'effet de l'intensité du champ électrique alternatif ainsi que la variation de la fréquence sur l'efficacité de mélange du micromélangeur en fonction du potentiel et de la vitesse moyenne d'entrée afin de mettre en évidence l'influence de ces deux paramètres.

### 3.4.1 Vérification du modèle numérique

Après avoir terminé le processus de modélisation, nous pouvons utiliser le logiciel de calcul fourni avec le logiciel COMSOL Multiphysics pour effectuer la simulation. En utilisant le solveur pour calculer la concentration, la pression, le champ de vitesse et le potentiel dans le modèle à l'aide d'équations différentielles ordinaires, les résultats de simulation de l'écoulement des fluides dans le micromélangeur en régime permanent et en conditions transitoires peuvent être obtenus.

À  $t = 0$ , le potentiel du champ électrique appliqué est nul, c'est-à-dire qu'aucun champ électrique n'est appliqué. À ce moment-là, le fluide dans le micromélangeur présente un écoulement laminaire entièrement développé, et le mode de diffusion est uniquement la diffusion moléculaire. En raison du caractère laminaire du fluide et de la faible valeur du coefficient de diffusion, les deux fluides ne sont pas bien mélangés à la sortie, et l'efficacité de mélange est très faible. La Figure 2 montre la concentration en régime permanent lorsqu'aucun champ électrique n'est appliqué.

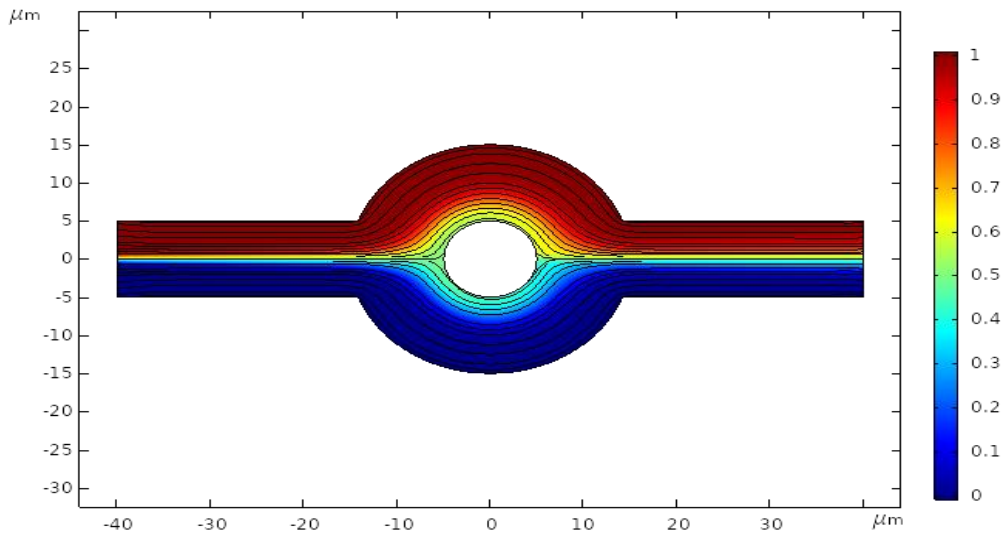


Figure 3. 3: Concentration en régime permanent lorsque aucun champ électrique n'est appliqué.

Afin de garantir l'exactitude de notre modèle numérique, les résultats numériques obtenus sans champ électrique sont comparés avec des études existantes dans la littérature. Cela valide notre modèle numérique, qui sera utilisé pour décrire les caractéristiques d'écoulement des microfluides dans un mélangeur à écoulement électroosmotique.

### 3.4.2 Caractéristiques d'écoulement dans les dispositifs hybrides

La Figure 3.4 montre les lignes de potentiel d'un micromélangeur à écoulement électroosmotique, où les lignes de contour représentent la distribution de potentiel lorsque le dispositif utilise le potentiel maximum ( $\pm V_0$ ). En raison de la polarité opposée des électrodes adjacentes, le fluide peut avoir un effet perturbateur plus fort et former un champ d'écoulement tourbillonnaire.

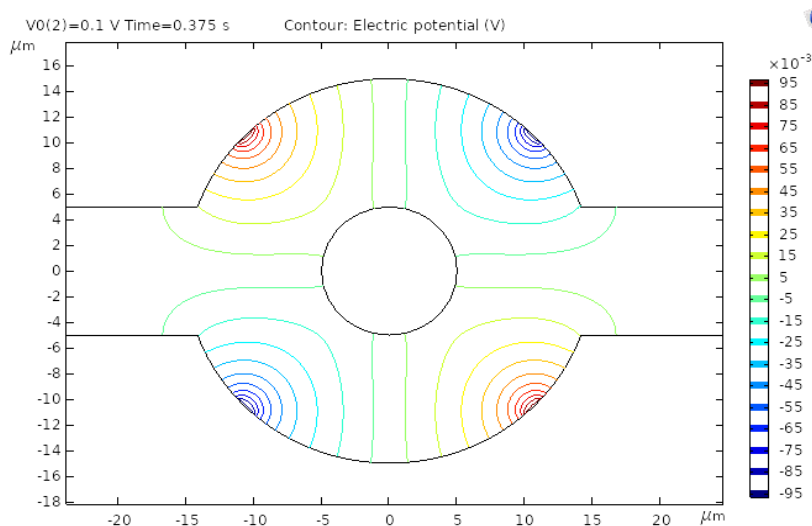


Figure 3. 4: Lignes de potentiel d'un micromélangeur à électroosmotique

La Figure 3.5 montre les lignes d'écoulement du fluide dans le micromélangeur à écoulement électroosmotique à  $t = 0,0375$  s. La figure montre un mode typique de lignes d'écoulement transitoires. On peut constater qu'après l'application d'un champ électrique alternatif, le fluide forme un tourbillon tourbillonnant près des quatre électrodes dans le micromélangeur. Le processus de mélange efficace comprend un étirement et un pliage répétés des éléments du fluide et une diffusion à petite échelle. En raison de l'application d'un champ électrique alternatif dans le système, l'écoulement électroosmotique résultant perturbe l'écoulement laminaire qui était initialement entraîné par la pression, ce qui fait que le fluide à partir du mélangeur se déplace de haut en bas, provoquant un pliage et un étirement importants des lignes de courant, ce qui améliore considérablement l'efficacité de mélange du micromélangeur.

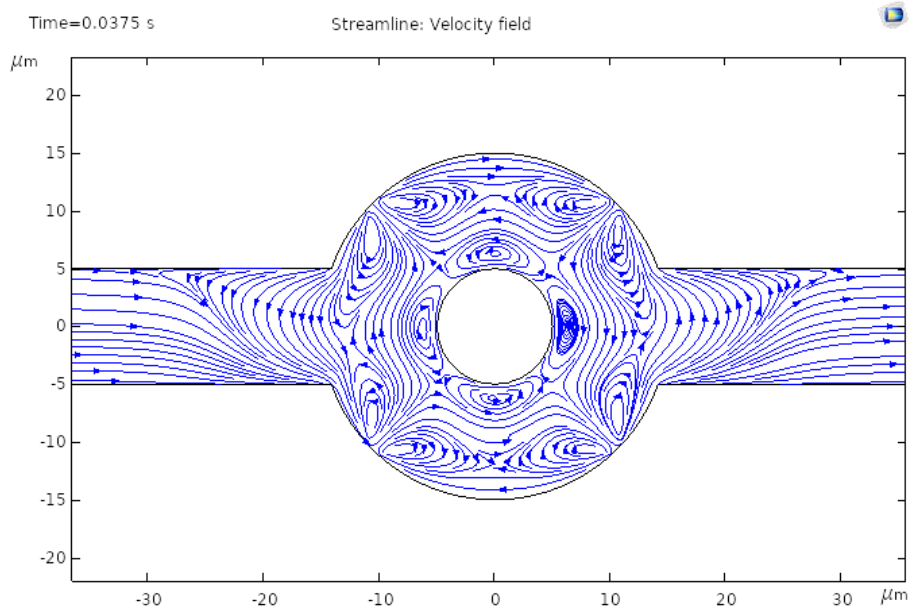


Figure 3. 5:Lignes d'écoulement du fluide dans un micromélangeur à écoulement électroosmotique à  $t = 0,0375$  s.

La Figure 3.6 montre les résultats de calcul du champ d'écoulement et du champ de concentration lorsque le champ électrique et la vitesse électroosmotique dans le micromélangeur sont à leur maximum. Comparé à la Figure 3.5 lorsqu'aucun champ électrique alternatif n'est appliqué, on peut clairement constater que l'efficacité de mélange est nettement améliorée en raison de la perturbation du tourbillon alternatif dans l'écoulement après l'application du champ électrique alternatif.

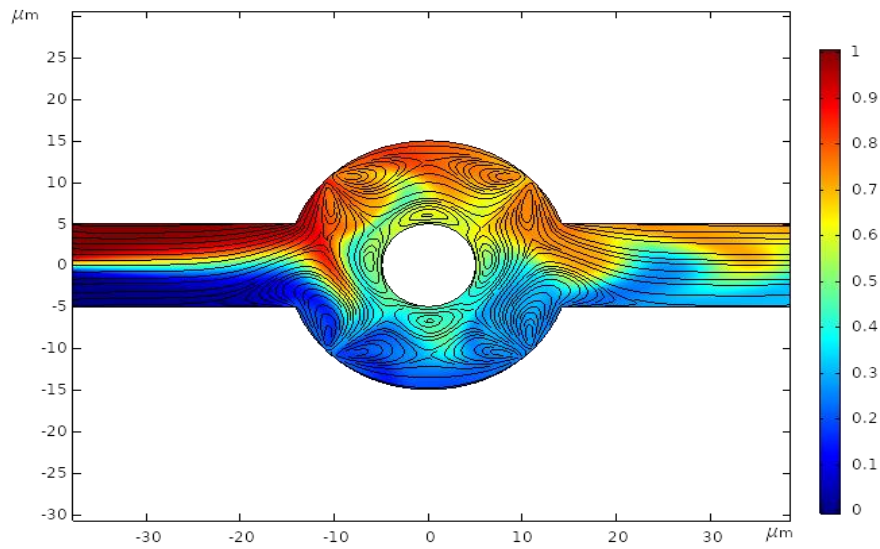


Figure 3. 6: Champ de concentration du micromélangeur

### 3.4.3. Effet de l'intensité du champ électrique alternatif sur l'efficacité de mélange du micromélangeur.

Sur la base du modèle numérique du micromélangeur à écoulement électroosmotique établi dans la section 2 et en réglant à nouveau le potentiel appliqué à 0,15 V et 0,3 V sans changer les autres valeurs de paramètres, deux séries de simulations ont été réalisées. Les résultats sont présentés dans les figures 6 et 7.

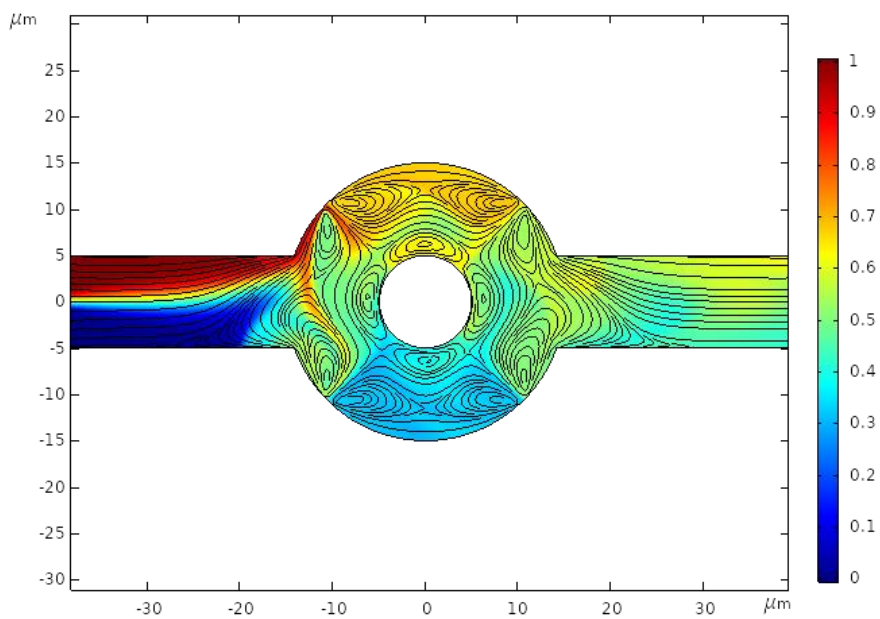


Figure 3. 7: Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 0,1 V.

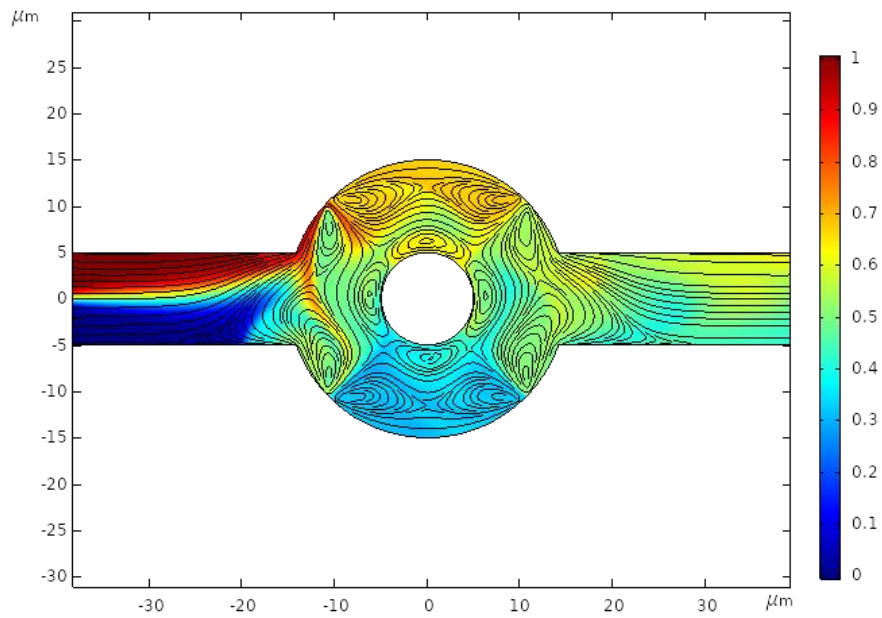


Figure 3. 8: Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 0,3 V.

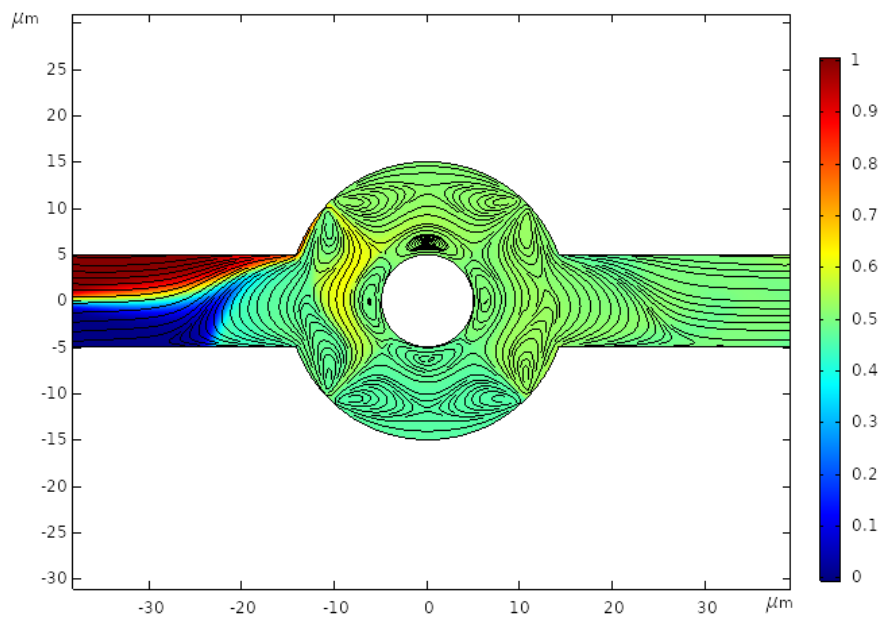


Figure 3. 9: Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 1 V.

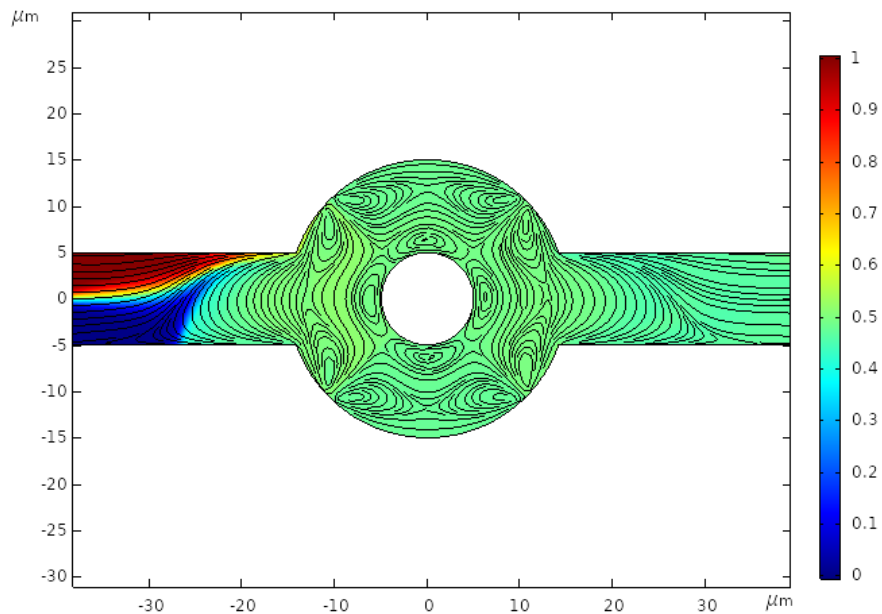


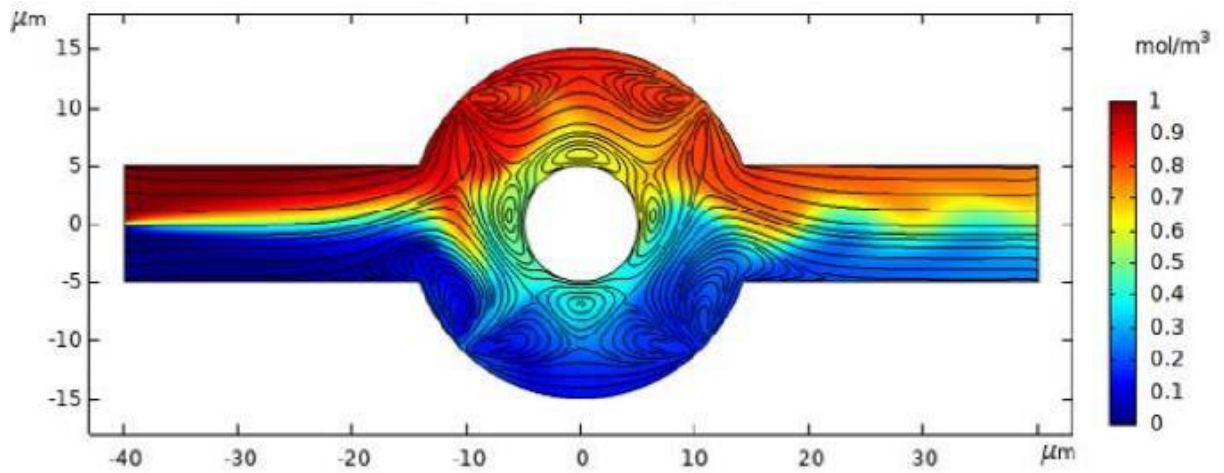
Figure 3. 10: Champ de concentration avec un potentiel de champ électrique de 3 V.

Il ressort des figures 6 -9 qu'avec l'augmentation du potentiel du champ électrique appliqué, l'efficacité de mélange du micromélangeur s'améliore également de manière significative. L'effet de l'augmentation du potentiel du champ électrique appliqué sur le micromélangeur est similaire à celui de l'augmentation du potentiel zêta. Il est possible de déduire de l'équation (12) que l'électroosmose due au champ électrique appliqué est également un facteur important qui affecte la vitesse de glissement de l'électroosmose. Le potentiel du champ électrique appliqué augmente. En même temps, dans l'équation gouvernant le champ électrique, le potentiel du champ électrique appliqué est également un paramètre important. Selon l'équation de Nernst-Planck, on peut constater que le champ électrique appliqué contrôle également la migration électrique des ions par la force du champ électrique. Cependant, la migration du champ électrique n'est pas prise en compte dans le mécanisme de transfert de ce modèle.

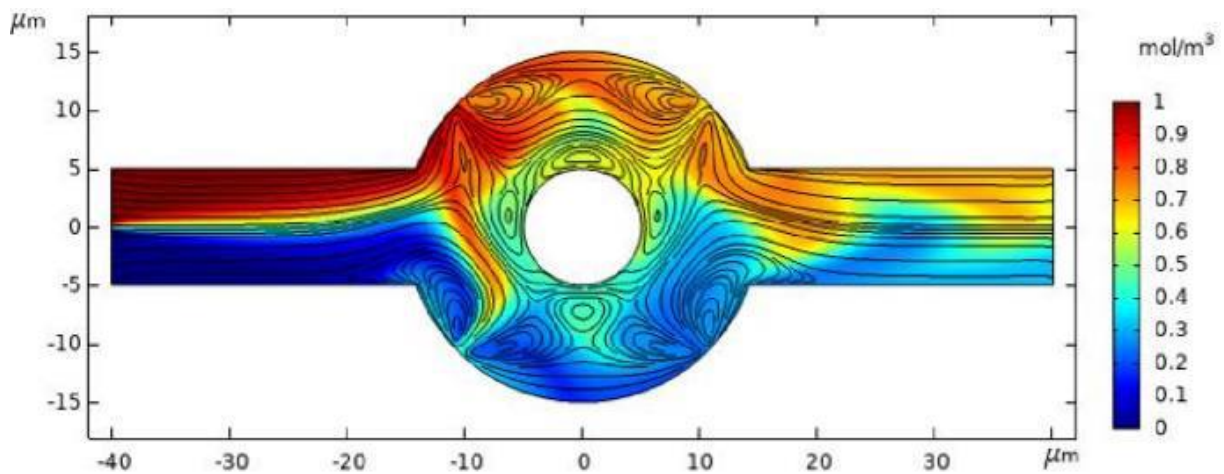
#### 3.4.4. Effet de la fréquence du champ électrique alternatif sur l'efficacité de mélange du micromélangeur

Sur la base du modèle numérique du micromélangeur à écoulement électroosmotique déjà établi dans la section 2, la fréquence du champ électrique externe a été réglée à 12 Hz, 16 Hz, 20 Hz et 24 Hz sans changer les autres valeurs de paramètres. Quatre séries de simulations ont été réalisées. Les résultats sont présentés dans la figure 8. On peut constater dans la figure 8 qu'avec l'augmentation progressive de la fréquence du champ électrique, l'efficacité de mélange du

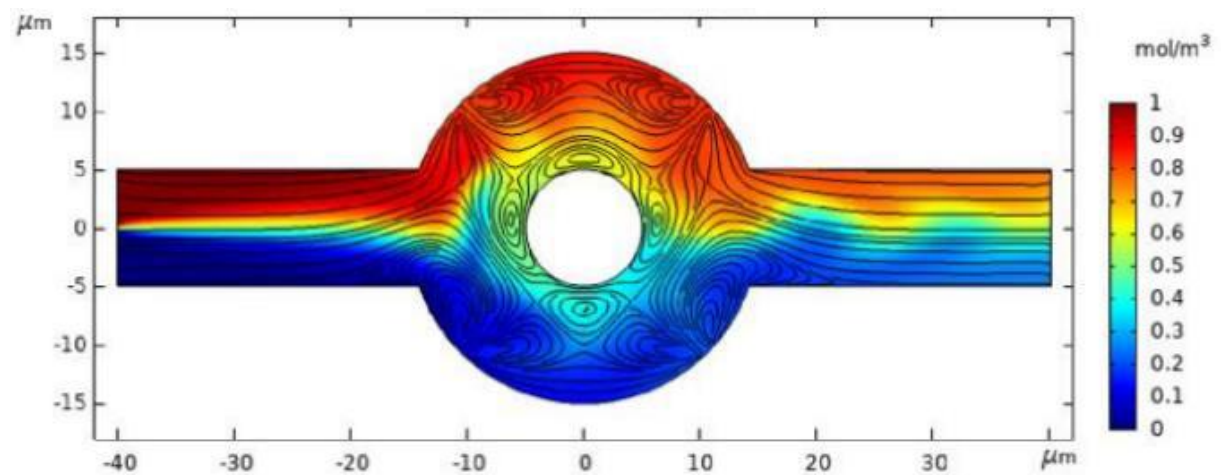
micromélangeur augmente d'abord puis diminue. Lorsque la fréquence est de 16 Hz, l'efficacité de mélange du micromélangeur atteint une valeur plus élevée. Lorsque la fréquence atteint 24 Hz, l'efficacité de mélange du micromélangeur devient très faible.



(a)  $f = 12\text{Hz}$

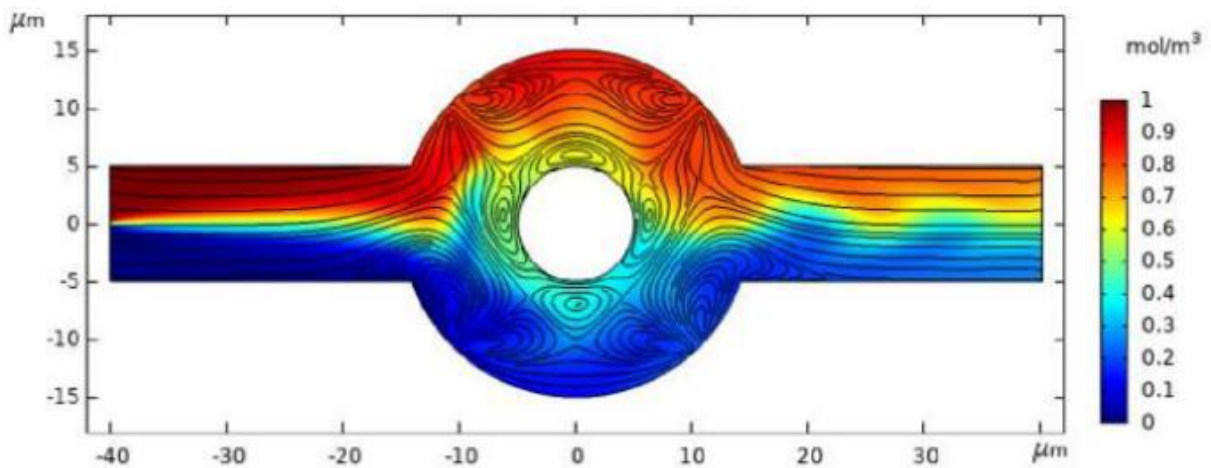


(b)  $f = 16\text{Hz}$



(c)  $f = 20\text{Hz}$





(d)  $f = 24\text{Hz}$

Figure 3. 11: Résultats de simulation à différentes fréquences du champ électrique appliqué.

En analysant l'équation gouvernant le micromélangeur, on peut constater que la fréquence ne contrôle pas directement la taille de l'écoulement électroosmotique à grande échelle de temps. Cependant, étant donné que la fréquence du champ électrique alternatif externe peut être contrôlée par le changement périodique du champ électrique, le fluide sera perturbé et les lignes de courant seront étirées et pliées, ce qui renforce l'effet de mélange. À petite échelle de temps, la fréquence du champ électrique alternatif appliqué contrôlera la magnitude du potentiel du champ électrique dans la direction tangentielle, de sorte que la taille de la vitesse électroosmotique changera périodiquement.

Lorsque la fréquence du champ électrique appliqué se situe dans une plage plus basse, en augmentant la fréquence du champ électrique, la fréquence de changement de direction de l'écoulement électroosmotique peut être accélérée, ce qui renforce l'effet perturbateur de l'écoulement électroosmotique sur le fluide, ce qui augmente l'efficacité de mélange du micromélangeur.

Cependant, lorsque la fréquence du champ électrique appliqué est déjà à un niveau plus élevé, l'augmentation de la fréquence du champ électrique entraînera une diminution de l'efficacité de mélange. Cela est dû au fait que lorsque la fréquence du champ électrique est trop élevée, étant donné que la durée de chaque cycle est trop courte, l'écoulement électroosmotique n'affecte le fluide que dans les environs immédiats pendant une courte période, et l'effet ne s'est pas propagé à des distances plus éloignées. Le fluide ne peut pas être perturbé. Dans ce cas, l'effet

perturbateur de l'écoulement électroosmotique sur l'ensemble du fluide est réduit et l'efficacité de mélange est réduite.

En analysant davantage la relation entre la fréquence du champ électrique et l'efficacité de mélange du micromélangeur, on a constaté que plus la force visqueuse du fluide est importante, plus la taille du microcanal est petite, et plus la valeur de fréquence à laquelle cette efficacité de mélange est maximale est grande. Dans ce modèle, lorsque la fréquence du champ électrique appliqué est proche de 16 Hz, l'efficacité de mélange du micromélangeur peut atteindre une valeur maximale.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation par la méthode des éléments finis pour simuler le comportement des micromélangeurs à écoulement électroosmotique. La simulation numérique offre une approche pratique et économique pour prédire les performances des micromélangeurs avant de procéder à des expériences coûteuses. Les résultats obtenus à partir de la simulation ont été comparés avec des données expérimentales pour valider notre modèle.

En conclusion, la simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis est une méthode efficace pour modéliser et analyser les performances des micromélangeurs à écoulement électroosmotique. Elle permet de prédire avec précision le comportement des dispositifs avant leur fabrication et d'optimiser leur conception. Cette approche offre un gain de temps et de coûts considérable par rapport aux méthodes traditionnelles basées uniquement sur des expérimentations. Les résultats obtenus à partir de la simulation peuvent être utilisés pour guider la conception et l'optimisation des micromélangeurs à écoulement électroosmotique, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités dans le domaine de la microfluidique et des systèmes d'analyse sur puce.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail mené dans ce mémoire a permis de mettre en évidence l'importance et les avantages de la modélisation et de la simulation dans le domaine des micromélangeurs utilisant l'effet d'écoulement électroosmotique. Les résultats obtenus ont contribué à une meilleure compréhension des phénomènes physiques impliqués dans ces dispositifs et ont ouvert la voie à des améliorations potentielles pour les applications dans différents domaines.

Dans une première étape, nous avons fait un état de l'art sur le domaine de la microfluidique. Ensuite, nous avons présenté une idée générale sur la technologie des micromélangeurs, ainsi que les principaux avantages, applications et les types de ces dispositifs. Par la suite nous avons proposé et présenté la description détaillée du concept de modèle, de son principe de fonctionnement du dispositif, des matériaux utilisés, de la géométrie du système de mélange ainsi que son flot de conception pour la possibilité de réalisation de ce dispositif.

La dernière partie a fourni des résultats de simulation détaillés et des analyses approfondies de la performance du micromélangeur basé sur l'effet d'écoulement électroosmotique. Cette simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis est une méthode efficace pour modéliser et analyser les performances des micromélangeurs à écoulement électroosmotique. Elle permet de prédire avec précision le comportement des dispositifs avant leur fabrication et d'optimiser leur conception. Cette approche offre un gain de temps et de coûts considérable par rapport aux méthodes traditionnelles basées uniquement sur des expérimentations.

Les résultats obtenus à partir de la simulation peuvent être utilisés pour guider la conception et l'optimisation des micromélangeurs à écoulement électroosmotique, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités dans le domaine de la microfluidique.

D'immenses perspectives dans le domaine des microdispositifs de mélange de réactions chimiques ou autre sont utilisées dans l'ingénierie et les laboratoires. Nous prévoyons de pousser l'exploration sur l'aspect de conception de ce système et la possibilité d'améliorer son rendement. Aussi, l'étape à venir sera la réalisation d'un prototype expérimental de ce microréacteur de géométrie sinueuse afin de procéder à sa caractérisation et sa validation finale pour son utilisation.

## REFERENCES

- [1] S.D. Senturia., « Microsystem Design, » Kluwer Academic Publishers, (2001).
- [2] O. Reynolds., «An Experiment allInvestigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous and of the Law of Resistance in Parallel Channels»; Philosophical Transactions: Royal Society, vol.174, (1883),935-982.
- [3] C. Garcia, «Biosensing for the analysis of raw milk", PhD Thesis, University of Bremen, Germany, (July2014).
- [4] J. P Brody., Yager P., «Diffusion-based extraction in a microfabricated device »Sensors and Actuators A: Physical, vol.58, n°.1, (1997),13-18.
- [5] A. Hatch., Kamholz A. E., Hawkins K. R., Munson M. S., Schilling E. A., Weigl B.H., Yager P., A« rapid diffusion immunoassay in a t-sensor, »Nature Biotechnology, vol.19, n°.5, (2001),461-465.
- [6] S. Bee by En sell G.,Kraft M., WhiteN., »MEMS Mechanical Sensors,» ARTECHHOUSE,(2004).
- [7] M. Aumeerally, R. Sitte., L« ayered fluid model and flow simulation for microchannels using electrical networks » Simulation Modeling Practice and Theory, vol.14, (2006),82-94.
- [8] S .Sathe., R. Benney, R. Charles., E .Doucette., J. Miletti., M. Senga., K .Stein., T. ET ezduyar., « Fluid–structure interaction modeling of complex parachute designs with the space–time finite element techniques »Computers & Fluids, vol. 36, (2007), 127-135.
- [9] K.R. Stein., R.J. Benney., T.E. Tezduyar., J.W. Leonard., M.L, Accorsi., «Fluid Structure Interactions of a Round Parachute: Modeling and Simulation Techniques, » Journal of Aircraft, vol. 38, n°.5, (2001),800-808.
- [10] N. Lorber, « Acquisition de données en conditions non-conventionnelles par l'utilisation de gouttes comme. Microréacteur de polymérisation dans un réseau millifluidique, » Thèse de doctorat, Université de Bordeaux1 ,France, Octobre2011.

- [11] T.R. Dietrich, A. Freitag., R. Scholz production and characteristic of micro reactors made from glass »; Chemical Engineering Technology, vol.28, (2005),477-483.
- [12] M. Anduze., « Etude expérimentale et numérique de microécoulements liquides dans les microsystemes fluidiques » Thèse doctorat, INSAT, Université de Toulouse, France, Février 2000.
- [13] S. Shoji., Esashi M., Van Der Schoot B., De Rooij N., A« study of a high-pressure micropump for integrated chemical analysis systems »Sensors and Actuators A, vol.32,(1992),335-339.
- [14] R.Rapp., W. K. Schomburg., D. Maas., J. Schulz., W Stark., «LIGA micropump for gases and liquids, »Sensor and Actuators A,vol.40,(1994),57-61
- [15]. This model is courtesy of H. Chen, Y. T. Zhang, I. Mezic , C. D. Meinhart, and L. Petzold of the University of California, Santa Barbara (Ref. 1 and Ref. 2
- [16] Biswajit Gayen a ,b , Nirmal K. Manna a , Nirmalendu Biswas c,\*
- [17] Z. Kazemi, S. Rashidi, J.A. Esfahani, Effect of flap installation on improving the homogeneity of the mixture in an induced-charge electro kinetic micro-mixer, Chem. Eng. Process. Process Intensif. 121 (2017) 188–197
- [18] R. Ellahi, S.M. Sait, N. Shehzad, N. Mobin, Numerical simulation and mathematical modeling of electro-osmotic Couette–Poiseuille flow of MHD power-law nanofluid with entropy of generation, Symmetry (Basel) 11 (8) (2019) 1038.
- [19]O.Reynolds. ,«An Experimentally investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous and of the Law of Resistance in Parallel Channels»; Philosophical Transactions: Royal Society, vol.174,(1883),935-982.
- [20] N.Lorber,«Acquisition de données en conditions non-conventionnelles par l'utilisation de gouttes comme. Microréacteur de polymérisation dans un réseau multifluidique,»Thèse de doctorat, Université de Bordeaux1,France,Octobre2011.
- [21]T.Ohnstein.,T.Fukiura.,J.Ridley.,U.Bonne.,«Micromachinedsiliconmicrovalve,»IEEE E,(1990),95-98.
- [22]T.R. Dietrich, A. Freitag.,R.Scholz., Production and characteristic of micro

- reactors made from glass »; *Chemical Engineering Technology*, vol.28,(2005),477-483.
- [23] T. Ohnstein., T. Fukiura., J. Ridley., U. Bonne., «Micromachine de silicium microvalve,» *IEEE*,(1990),95-98.
- [24] K.R. Stein., R.J. Benney., T.E. Tezduyar., J.W. Leonard., M.L. Accorsi., «Fluid Structure Interaction of a Parachute : Modeling and Simulation Techniques,» *Journal of Aircraft*, vol. 38,n°.5,(2001),800-808.
- [25] M. Anduze., «Etude expérimentale et numérique de micro écoulements liquides dans les microsystèmes fluidiques »Thèse doctorat ,INSAT, Université de Toulouse, France, Février 2000.
- [26] Reuse, P. (2003). Production d'hydrogène dans un microréacteur micro structuré : Couplage thermique entre les réacteurs pour l'oxydation totale du méthanol. Thèse de doctorat .École Polytechnique Fédérale de Lausanne .Suisse.
- [27] K.J. Land., M.B. Mbanjwa., K. Govindasamy., J.G. Korvink., «Low Cost fabrication and assembly process for re-usable 3D poly dimethylsiloxane (PDMS) microfluidic networks»; *Biomedical Microfluidics*, vol.5,(2011),036502
- [28] Sathe S., Benney R., Charles R., Doucette E., Milette J., Senga M., Stein K., Tezduyar T.E., "Fluid-structure interaction modeling of complex parachutes with the space-time finite element techniques", *Computers & Fluids*, vol.36,(2007),127-135.
- [29] COMSOL Multiphysics 4.3a User's Guide, Copyright.(1998-2012) ,COMSOL <http://www.mscs.dal.ca/cluster/manuals/comsol/modeling.pdf>
- [30] Cheng L.L., "Simulation of fluid flow and fluid-structure interaction in microdevices", B.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore ,Singapore,(2007).
- [31] Ardila Rodriguez G.A., " Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique", Thèse de doctorat ,Université Toulouse III ,France,(Janvier 2008).
- [32] Beeby S., Ensell G., Kraft M., White N., "MEMS Mechanical Sensors", ARTECHHOUSE,(2004).

[33]JuneidiZ., "Outils CA Opour les microsystèmes",Thèse de doctorat ,INPG, Université de Grenoble ,France,(Mai2003)

[34].Liu G.R.,QuekS.S.,"Finite Element Method-AP ractical Course",Butterworth Heinemann,(2003).

[35]Grandin Jr .H., "Fundamentals of the Finite Element Method", Mac Millan Publishing Company, New York,(1986).