

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1
جامعة سعد دحلب البليدة 1
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



كلية العلوم – دائرة الفيزياء
Faculté des Sciences
Département de Physique

**MEMOIRE
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN PHYSIQUE**

Option : NanoPhysique

THÈME

**ETUDE ET SIMULATION PAR ELEMENTS FINIS DE LA
GRAVURE CHIMIQUE HUMIDE DANS UN ECOULEMENT
FORCEE UTILISEE DANS LES PROCEDES DE
MICROFABRICATION DES DISPOSITIFS MEMS**

Par :

ElAichi Elyes et Mammar Lila

Devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------|---------------|-----------|
| Mr. A. Benhaffaf | MAA U. Blida1 | Président |
| Dr. A. Hassein-Bey | MCB U. Blida1 | Examineur |
| Dr. S. Aoudj | MCB U. Blida1 | Promoteur |

Blida, Octobre 2018

Remerciements

Notre premier remerciement va à Allah soubhanou Wa ta hala.

Nous tenait à remercier vivement notre encadreur le Dr.S. Aoudj pour son entière disposition, ses conseils judicieux, sa gentillesse et sa disponibilité.

Nous tenons aussi à remercier notre Dr. A Hassen-Bey qui nous a transféré savoir au long de notre formation de master avec passion et patience sans égal.

Nous souhaiterais également remercier l'équipe de Nanophysique au sein du département de Physique qui a su nous accueillir et nous prodiguer une ambiance studieuse.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail.

Enfin, on tient à remercier tous mes amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation.

Dédicaces

Ce travail est dédié à celles et ceux qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours.

Ma mère

Mon frère : Mohamed

A mes ami(e)s.

Les deux familles Mammar et Ammar

A El Aichi Elyes

Lila

Ce travail est dédié à celles et ceux qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours.

Ma mère

Mon père

Mes frères et mes sœurs : Alla, Mohamed, Nawal, Meriem

A mes ami(e)s.

La famille El Aichi

A Mammar Lila

Elyes

ملخص:

إن عمليات التصنيع متناهي الصغر لأجهزة (MEMS) أو (NEMS) هي المفتاح لتحقيق أفكار وإمكانيات أجهزة الاستشعار و المحركات متناهية الصغر. وبالفعل، فإن اجتماع عمليات تصنيع الأجهزة الالكترونية الدقيقة و الجانب الميكانيكي لأجهزة MEMS يجعل إتقان عمليات التصنيع المتناهية الصغر و بالتحديد عملية الحفر على السليكون أو الطبقات الدقيقة المودعة مهما جدا للتطوير مستقبلا أو حتى التجسيد المباشر للأجهزة. تستخدم عمليات الحفر الرطب عوامل تستند إلى المحاليل (الرطبة)، حيث يتم غمر الركيزة المراد حفرها في تدفق يسيطر عليه عامل الحفر. وبالتالي فإن هذه العملية تنطوي على تفاعل كيميائي يستهلك الكاشف الأصلي و ينتج كاشفا جديد. يعتمد هذا العمل على نموذج الحفر النحاسي (ثنائي الأبعاد) المتواجد مسبقا والذي قمنا بتكييفه لعمليات حفر السليكون أولا ثنائي الأبعاد ولما لا ثلاثي الأبعاد. لقد أخذنا في الحسبان الجوانب الفيزيائية والكيميائية المختلفة (حركية التفاعل)، من أجل محاكاة و توقع تطور الحفر بدلالة معاملات حمام الحفر (درجة الحرارة، تركيز عوامل الحفر الكيميائية). تعتمد المحاكاة على طريقة العناصر المحددة (FEM) تحت *Comsol Multiphysics V5.3*.

Résumé:

Les procédés de microfabrication des dispositifs MEMS et NEMS est la clé de la matérialisation des idées et des possibilités des microcapteurs et microactionneur. Les procédés de gravure humide utilisent des agents de gravure à base de solutions ("humides"), où le substrat à graver est immergé dans un écoulement contrôlé d'agent de gravure. Ainsi ce procédé implique une réaction chimique qui consomme le réactif d'origine et produit un nouveau réactif.

Ce travail est parti d'un modèle de gravure (2D) de cuivre isotrope préexistant que nous avons adapté pour les procédés de gravure du silicium d'abords 2D et pourquoi pas en 3D. Nous avons pris en compte les différents aspects physiques et chimiques (cinétique réactionnel), afin de simuler et prévoir l'évolution de gravure en fonction des paramètres du bain de gravure (température, concentration des agents chimique de gravures). Notre simulation est basée sur la méthode des éléments finis (FEM) sous *Comsol Multiphysics V5.3*.

Abstract:

The processes of microfabrication MEMS and NEMS devices are the key to materializing the ideas and possibilities of microsensors and microactuator. Wet etching processes use solution-based ("wet") etching agents, where the substrate to be etched is immersed in a controlled flow of etchant. Thus this process involves a chemical reaction that consumes the original reagent and produces a new reagent.

This work is based on a pre-existing isotropic copper (2D) engraving model that we adapted for silicon etching processes around 2D and why not in 3D. We have taken into account the different physical and chemical aspects (reaction kinetics), in order to simulate and predict the etching evolution as a function of the etching bath parameters (temperature, concentration of chemical etchant). Our simulation is based on the Finite Element Method (FEM) under Comsol Multiphysics V5.3.

Sommaire

Introduction général

Partie 1: Synthèse bibliographie

| | |
|--|----|
| Chapitre 1: Etat de l'art sur le MEMS | 1 |
| 1.1 Introduction | 2 |
| 1.2 MEMS (Système Micro-électro-mécanique) | 2 |
| 1.2.1 Définition | 2 |
| 1.2.2 Historique | 3 |
| 1.3 Marché et l'avenir des MEMS | 4 |
| 1.4 Domaine d'application des MEMS | 6 |
| 1.5 Les secteurs des MEMS | 7 |
| 1.5.1 BioMEMS | 7 |
| 1.5.2 Capteur MEMS | 8 |
| 1.5.3 RF MEMS | 10 |
| 1.5.4 MEOMS | 12 |
| 1.6 Généralité sur la fabrication de MEMS | 13 |
| 1.6.1 Technique de microfabrication « dures » | 13 |
| 1.6.2 Technique de microfabrication « douces » | 16 |
| 1.7 Conclusion | 18 |
| Chapitre 2: Les procédés de microfabrication | 19 |
| 2.1 Introduction | 20 |
| 2.2 Généralité sur les matériaux utilisés dans la microfabrication | 20 |
| 2.3 Le silicium | 20 |
| 2.3.1 Propriétés du silicium | 21 |
| 2.3.2 Le dopage de silicium | 22 |
| 2.3.3 Le silicium monocristallin | 23 |
| 2.3.4 Oxyde de silicium | 24 |
| 2.3.5 Nitrure de silicium | 24 |
| 2.4 La gravure | 25 |

| | |
|---|----|
| 2.4.1 La gravure chimique humide | 25 |
| 2.5 Le microfabrication en surface | 26 |
| 2.6 Le microfabrication en volume | 27 |
| 2.7 La gravure isotrope | 29 |
| 2.8 La gravure anisotrope | 30 |
| 2.9 Conclusion | 32 |
| Partie 2: Modélisation et simulation de la gravure chimique humide dans | |
| un écoulement forcé | |
| Chapitre 3: Etude sur Comsol Multiphysiques et conditions limites | |
| de notre modèle | 34 |
| 3.1 Introduction | 35 |
| 3.2 L'outil Comsol Multiphysiques | 35 |
| 3.2.1 Méthode des éléments finis | 36 |
| 3.2.1 Principe de la méthode des éléments finis | 36 |
| 3.2.3 Organigramme du logiciel élément finis | 37 |
| 3.3 L'ancienne modèle de la gravure chimique humide | 38 |
| 3.4 Notre amélioration sur l'ancienne conception | 39 |
| 3.5 Différentes étapes de la modélisation de la gravure chimique humide | |
| dans un écoulement forcé | 39 |
| 3.5.1 Définition du modèle | 39 |
| 3.5.2 Choix du physique | 40 |
| 3.5.3 Géométrie | 41 |
| 3.5.4 Paramètres | 42 |
| 3.5.5 Variables | 42 |
| 3.5.6 Propriétés des matériaux et conditions aux limites | 43 |
| 3.5.7 Le maillage du modèle | 45 |
| 3.6 Conclusion | 46 |
| Chapitre 4: Résultats et discussion | 47 |

| | |
|--|----|
| 4.1 Introduction | 48 |
| 4.2 Comparaison entre le modèle existant et notre modèle | 48 |
| 4.3 Les résultats de la gravure isotrope | 49 |
| 4.3.1 La gravure avec une concentration d'HF 48% | 49 |
| 4.3.2 La gravure avec une concentration d'HF 0.61% | 55 |
| 4.3.3 Notre modèle en 3D | 60 |
| 4.4 La gravure anisotrope (KOH) | 61 |
| 4.5 Conclusion | 66 |
| Conclusion générale | 67 |
| Référence | 68 |

*LISTE DES ILLUSTRATIONS
GRAPHIQUES ET TABLEAUX*

Chapitre 1

| | |
|--|----|
| Figure 1.1: Illustration schématique des composants MEMS | 3 |
| Figure1. 2: Marché des MEMS par application | 5 |
| Figure 1.3: Valeur du marché des MEMS pour 2014-2020 (en M \$)..... | 5 |
| Figure 1.4: des dispositifs qui peuvent être injectés dans les liquides corporels | 8 |
| Figure 1.5 : Composants MEMS RF: commutateurs de type cantilever (à gauche) et de type pont (à droite)..... | 11 |
| Figure 1.6: Microcommutateurs ohmiques de type « pont » et de type « poutre» | 11 |
| Figure 1.7: Principe de fonctionnement d'un microcommutateur capacitif | 12 |
| Figure 1.8: miroir MEMS | 13 |
| Figure 1.9: Principe de la lithographie | 14 |
| Figure 1.10: Principe de la gravure DRIE par bombardement ionique | 15 |
| Figure 1.11: Description générale de la méthode de moulage par injection | 16 |
| Figure1.12: Principales étapes de la micro-structuration d'un réseau microfluidique par une méthode d'emboutissage à chaud..... | 17 |
| Figure 1.13: Procédé de report de SU-8 par laminage : (a) laminage d'une Couche de PET ; (b, c) enduction et photolithographie des premiers niveaux de SU-8 ;(d) laminage de couche flexible de SU-8 encore photosensible | 18 |
| Tableau 1.1: Grandeurs d'entrée et de sortie et effet utilisé pour les capteurs actifs..... | 9 |
| Tableau 1.2: Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs | 10 |

Chapitre 2

| | |
|---|----|
| Figure 2.1: Structure du silicium cristallin | 21 |
| Figure2. 2: Comportement dopant du bore (B) et du phosphore (P) dans le silicium | 23 |
| Figure 2.3: Structure cristalline des configurations α et β du Si_3N_4 | 24 |
| Figure 2.4: Procédure de Microusinage en surface | 26 |
| Figure 2.5: Schéma en coupe d'une technologie de microfabrication en surface (a)avant et (b) après gravure des oxydes sacrificiels | 27 |
| Figure2. 6: Micro-usinage en volume | 28 |
| Figure 2.7: Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en volume face avant compatible CMOS | 29 |
| Figure 2.8: Schéma représente la gravure isotrope en réalité | 29 |
| Figure 2.9: Profils obtenus par gravure isotrope | 30 |
| Figure 2.10: Schéma représente la gravure anisotrope en réalité | 30 |
| Figure 2.11: Profils obtenus par gravure anisotrope | 31 |
| Tableau 2.1: Paramètres de base du silicium | 21 |
| Tableau 2.2: Les éléments dopants du silicium | 23 |

Chapitre3

| | |
|--|----|
| Figure 3.1: Organigramme d'un logiciel éléments finis | 36 |
| Figure 3.2: La géométrie utilisée dans l'ancienne modèle | 37 |
| Figure 3.3: Schéma du système de gravure étudié | 38 |
| Figure 3.4: La physique de transport d'espèces chimique | 39 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.5: La physique de l'écoulement laminaire dans les sélections physiques | 39 |
| Figure 3.6: La géométrie déformée | 40 |
| Figure 3.7: Les dimensions de notre géométrie | 41 |
| Figure 3.8: Conditions aux limites (pour l'interface de transport des espèces diluées) et géométrie utilisées pour décrire le processus de gravure chimique | 44 |
| Figure 3.9: Le maillage direct de notre structure modélisée | 45 |
| Tableau 3.1: Le paramètre utilisé dans notre modèle | 41 |
| Tableau 3. 1: Les variables | 42 |
| <u>Chapitre 4 :</u> | |
| Figure 4.1: Schéma présente la comparaison entre l'ancienne model et notre modèle | 47 |
| Figure 4.2: Variation de la viscosité en fonction de la température | 48 |
| Figure 4.3: Variation de la densité en fonction de la température | 49 |
| Figure 4.4: Profil de concentration (48%) du décapant HF à t = 2986s sur la cavité de silicium non masquée | 50 |
| Figure 4.5: La phase initiale de la gravure | 51 |
| Figure 4.6 : Tracé de la surface de la flèche représentant le profil de vitesse du décapant HF après t = 2986s sur la géométrie déformée de la cavité de silicium | 52 |
| Figure 4.7: Le profil de vitesse au début de la gravure | 53 |

| | |
|---|-----------|
| Figure 4.8: Déformation du maillage après $t = 2986s$ sur la gravure de la cavité de silicium non masquée | 54 |
| Figure 4.9: Variation de la viscosité en fonction de la température | 55 |
| Figure 4.10: Variation de la densité en fonction de la température | 55 |
| Figure 4.11: Profil de concentration (0.61%) du décapant HF à $t = 32638s$ | 56 |
| Figure 4.12: Tracé de la surface de la flèche représentant le profil de vitesse du décapant HF après $t = 32638s$ sur la géométrie déformée de la cavité de silicium | 57 |
| Figure 4.13: Déformation du maillage après $t = 6519h\ 30min\ 57s$ sur la gravure de la cavité de silicium non masquée | 58 |
| Figure 4.14: Le modèle de la gravure en 3D | 59 |
| Figure 4.15: La géométrie avant la déformation | 60 |
| Figure 4.16: Variation de la viscosité en fonction de la température | 61 |
| Figure 4.17: Variation de la densité en fonction de la température | 61 |
| Figure 4.18: Après la déformation | 62 |
| Figure 4.19: La vitesse de la gravure (100) en fonction de la concentration et la température | 63 |
| Figure 4.20: La vitesse de la gravure (110) en fonction de la concentration et la température..... | 63 |
| Figure 4.21: Tracé de la surface de la flèche représentant le profil de vitesse du décapant KOH après $t = 36570s$ sur la géométrie déformée de la cavité de silicium | 64 |
| Tableau 4.1: la viscosité en fonction de la température | 48 |

| | |
|--|-----------|
| Tableau 4.2: La densité en fonction de la température | 49 |
| Tableau 4.3: la viscosité en fonction de la température | 54 |
| Tableau 4.4: la densité en fonction de la température | 55 |
| Tableau 4.5: Les paramètres utilisé dans notre modèle..... | 59 |
| Tableau 4.6: Variation de la viscosité en fonction de la température | 60 |
| Tableau 4.7: Variation de la densité en fonction de la température | 61 |

Liste des abréviations

MEMS: *Micro-Electro-Mécanique Système*

Md \$: *Milliard dollar*

MST: *Système micro-Technologie*

RF-MEMS: *Radio frequency Micro-Electro-Mechanical Systems*

PDMS : *PolyDiMethylSiloxane*

SU8 : *Résine Photolithographique Négative*

FEM: *Finite Element Method*

MOEMS: *Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*

μ-TAS : *Micro-Total-Analysis-System*

BioMEMS: *Biologic Micro-Electro-Mechanical Systems*

CMOS: *Complementary metal oxide semi-conductor*

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

La micro technologie est un ensemble de techniques de fabrication permettant de réaliser des structures et des systèmes de petites dimensions de l'ordre du micromètre et qui accomplissent des fonctions de précision [1].

C'est typiquement le cas des MEMS (*Micro-électro-mechanical-système*) qui se rapporte à la technologie de microfabrication ainsi touchés par l'engouement des industriels pour la miniaturisation.

Les MEMS ont une particularité de pouvoir intégrer sur un même substrat des parties aussi différentes que des éléments mécaniques, des capteurs, des actionneurs ou une partie microélectronique de commande et de traitement de l'information.

La partie électronique se rapporte sur des procédés de fabrication des circuits intégrés (*CMOS, Bipolaire, BICMOS*), tandis que les parties mécaniques sont fabriquées à l'aide de procédés qui éliminent certaines parties du wafer cela se fait par la gravure ou ajoutent de nouvelles couches structurales pour former le dispositif mécanique et cette méthode s'appelle le dépôt [2].

Le principal avantage est la réduction de l'encombrement et de la masse du dispositif, ce qui est très important pour de nombreuses applications médicales ou spatiales ou autres.

Ces technologies de fabrication de microsystèmes sont dérivées de celles de fabrication de la micro électronique utilisant les mêmes techniques des générations de masque (*la photolithographie, le micro-usinage en volume et le micro-usinage en surface, etc*) [3].

L'objectif de ce travail est d'étudier la gravure chimique humide dans un écoulement forcé dans les procédés de microfabrication des dispositifs.

Le premier chapitre présent plus de détails sur le concept et les techniques de fabrication des MEMS et donne un aperçu de son avenir.

Le deuxième chapitre concerne le procédé de la microfabrication. Il contient une présentation générale sur les matériaux utilisés dans la microfabrication, et survolera le concept de la technique de la gravure chimique humide en détail.

Dans le troisième chapitre nous allons présenter les connaissances nécessaires à l'outil de notre travail (*Comsol Multiphysics*) et la définition de la méthode des éléments finis. Nous avons présenté l'étude sur un modèle de la gravure chimique humide dans un écoulement forcé, et nous avons illustré différentes étapes de la modélisation de la gravure chimique humide dans un écoulement forcé.

Le dernier chapitre concerne la présentation des résultats de simulation par la méthode des éléments finis (*FEM*) implémentées dans le logiciel Comsol Multiphysics.

Partie 1 : Synthèse bibliographie

CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART SUR
LE MEMS

1.1 Introduction

L'acronyme **MEMS** désigne un micro dispositif électromécanique, il englobe tout système disposant d'une partie électronique et intégrant une fonction mécanique dont l'ensemble est à l'échelle micrométrique de l'ordre [cm, 0.1µm]. L'idée de réalisation de dispositif à petit échelle, est attribuée au physicien et prix Nobel (1965) Richard Feynman. Avec sa célèbre phrase prononcée dans une conférence en 1959 "There is a Plenty of Room at the Bottom" ; Il y a tout un monde en bas [4].

Cette discipline est relativement jeune apparue à la fin des années soixante-dix. Actuellement, l'industrie des microsystèmes est en forte expansion avec des prévisions de marchés et de retombés économiques importantes dans de multitudes secteurs (automobile, IT périphériques, process control, médicale, aérospatiale, environnementale, etc...). Le marché a atteint 11,5 **Md\$** en 2004 et devrait atteindre 24 Md\$ en 2009. Soit une croissance de 16 % par an selon Sean Neylon [5].

On trouve ces composants au quotidien dans les différents équipements qu'on utilise. Les voitures modernes, utilisent le plus grand nombre de produits incluant des **MEMS** (capteurs de pression, accéléromètres, etc.). Au niveau du volume de composants produits, la première place revient à la production des têtes d'imprimantes à jet d'encre et aux têtes de lecture-écriture. Au niveau médical il existe une panoplie de dispositifs réalisés pour le diagnostic. On peut citer les puces ADN et les puces d'analyses des protéines [6].

En résumé, on peut dire que le **MEMS** concerne tout les domaines et industries, d'où la diversité des dispositifs qu'on trouve dans le marché et l'intérêt que lui porte les différents organismes et laboratoires de recherche.

1.2 MEMS (Systèmes Micro-électro-mécaniques)

1.2.1. Définition

Les MEMS, acronyme de Micro Electro Mechanical Systems, sont une technologie de processus utilisée pour créer des dispositifs miniaturisés ou systèmes intégrés qui combinent des composants mécaniques et électriques. Bien que MEMS soit également appelé MST (est le nom européen les technologies des

microsystèmes), à proprement parler, MEMS est une technologie de processus utilisée pour créer ces minuscules dispositifs ou systèmes mécaniques, et par conséquent, il s'agit d'un sous-ensemble de MST [7].

Et par autre définition « le MEMS est une façon de faire les choses », rapporte le microsysteme technologie Office des Etat-unit DARPA [8]. Ces «choses» fusionnent les fonctions de détection et d'actionnement avec le calcul et la communication pour contrôler localement les paramètres physiques à l'échelle microscopique, tout en provoquant des effets à des échelles beaucoup grandes [9]. Dans la forme la plus générale, les MEMS sont constitués de microstructures mécaniques, de micro capteurs, de micro actionneurs et de microélectronique, tous intégrés sur la même puce de Silicium [7]. Ceci est représenté schématiquement sur la figure 1.1.

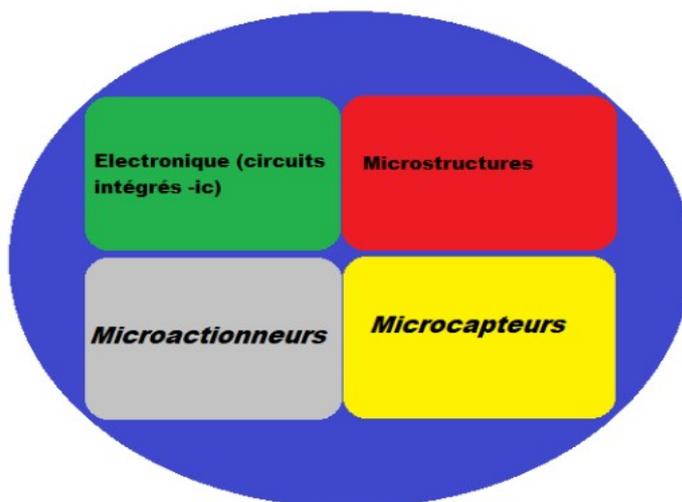


Figure 1.1 : Illustration schématique des composants MEMS.

1.2.2. Historique

Les humains se sont toujours efforcés d'explorer, de construire et de contrôler les extrêmes des échelles de longueur et de temps [10]. L'histoire de MEMS est utile pour illustrer sa diversité, ses défis et ses applications [11]. Cette histoire commence à Caltech en 1959 avec la conférence « *There is plenty of room at the bottom de R.P. Feynman* » qui annonce un nouveau domaine de recherche à l'échelle

microscopique. Le premier microsystème fabriqué est le transistor à grille résonante en 1967 par Nathanson et al coll [12].

Début des années 1980: premières expériences en silicium micro-usiné de surface. Fin des années 1980: le micro-usinage exploite l'industrie de la microélectronique et l'expérimentation généralisée et la documentation augmentent l'intérêt du public. En 1997, grâce à l'expérience acquise dans d'autres secteurs, l'utilisation des MEMS s'est étendue aux communications sans fil et optiques. La déclinaison des MEMS a donné de nouveaux termes, tels que, en matière optique MOEMS, signifiant systèmes opto-électromécaniques, ou en matière médicale biomes. Et 2000 Les composants de réseau optique MEMS deviennent une grande entreprise [7].

Au Temps actuel, il y a une grande diversité de matériaux et d'applications dans tous les domaines, offrant à l'utilisateur plus d'options.

1.3. Marché et l'avenir des MEMS

Les tendances en matière de microfabrication continuent à évoluer dans le sens d'une plus grande miniaturisation et d'une intégration hétérogène des appareils grâce aux nouveaux matériaux, aux nouvelles fonctionnalités et aux nouvelles capacités de fabrication. En 2014, le secteur des MEMS représentait une activité de 11,1 G \$ pour les appareils à base de Si. L'industrie des MEMS a atteint cet objectif grâce à l'industrie des smartphones et des tablettes et il ya encore de la croissance pour les portables et l'Internet des objets (IoT) [13].

MEMS continue de croître de 6,1% en termes de chiffre d'affaires de 2013 à 2017. Les capteurs et les actionneurs MEMS ont augmenté de 2 - de 9,2 milliards en 2013 à 18,3 milliards en 2017 à un prix de 18,8%. Dans le domaine des revenus, le marché des MEMS est passé de 9 milliards de dollars en 2013 à 12 milliards de dollars en 2018 [14].

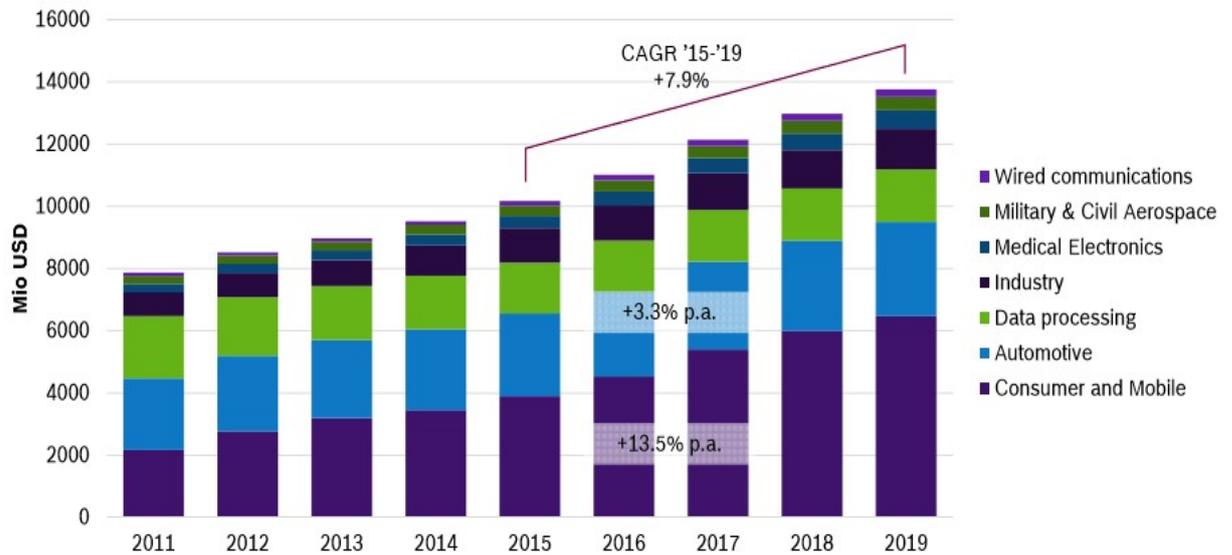


Figure1. 2 : Marché des MEMS par application [14].

Un rapport de Yole Development, qui analyse les revenus de divers appareils MEMS et devrait dépasser 20 000 M \$ d'ici 2020. Montré dans la figure ci-dessous [15] :

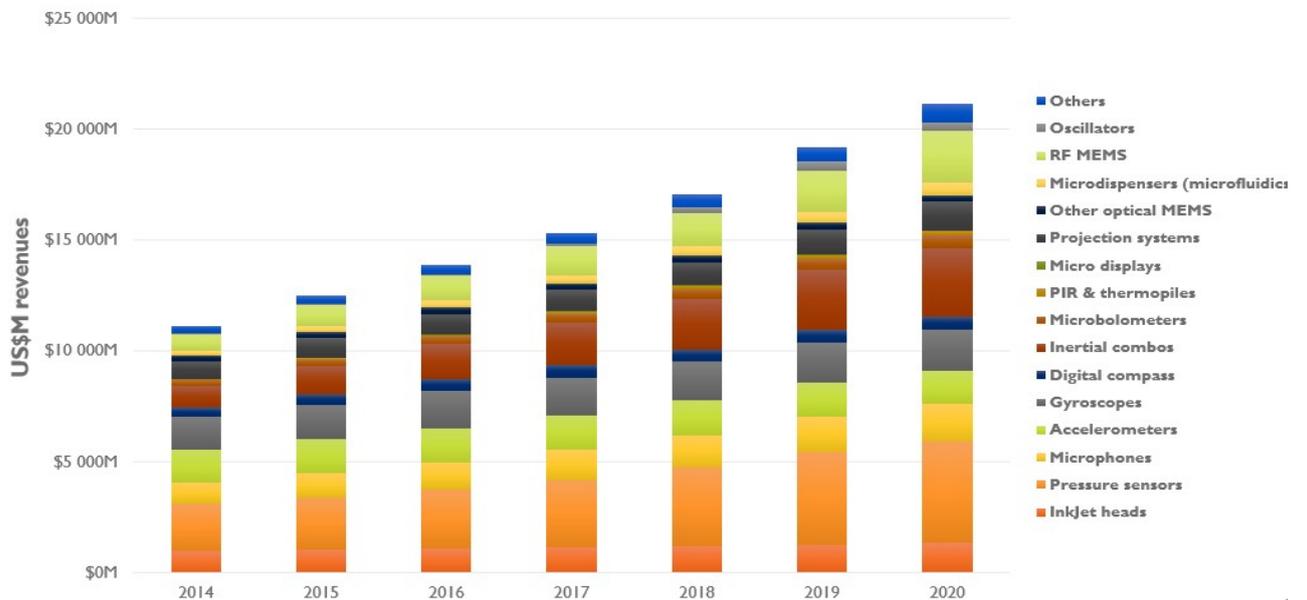


Figure 1.3 : Valeur du marché des MEMS pour 2014-2020 (en M \$) [15].

1.4. Domaine d'applications des MEMS

MEMS offre une large gamme d'applications dans différents domaines, tels que l'électronique. Ainsi que dans d'autres domaines tels que l'environnement, les télécommunications et l'électronique électrique.

➤ **Domaine de l'électronique et des communications**

La microélectronique ou la technologie MEMS se développe rapidement dans les communications et l'électronique, par exemple : Lasers accordables, Têtes d'impression pour imprimantes à jet d'encre et RF MEMS qui a fait un grand pas dans les télécommunications grâce à ses performances accrues [16].

➤ **Domaine médicales et biotechnologies**

Le développement des technologies MEMS est à l'origine de nombreux développements dans le domaine médical et biotechnologies tels que le développement de la biochimie (laboratoires d'analyse de puces ...) et la réalisation de systèmes d'injection des produits dans le corps humain.

➤ **Domaine de l'optique**

L'optique est l'un des domaines les plus courants de la technologie MEMS. Parmi les applications les plus largement utilisées dans ce domaine DMD (*Digital Micro-mirrors Dives*), ce que sont utilisé dans les projecteurs portables, les téléviseurs de projection et les projecteurs de films. DMD est un ensemble rectangulaire de micro miroirs mobiles avec des sources lumineuses, optiques et électroniques pour afficher des images couleur de haute qualité.

➤ **Domaine de l'automobile**

Une multitude de marchés intègrent la technologie MEMS dans de nombreux produits. Parmi ces produits, il y a l'automobile, qui est considérée comme un domaine de MEMS contenant de nombreuses technologies, par exemple: accéléromètre, capteur de pression, infra rouge, contraintes, capteur chimique, capteur de gaz.

1.5. Les secteurs des MEMS

Développements récents dans les systèmes micro électromécaniques la microélectronique, des techniques de microfabrication appelées collectivement MEMS, ont conduit à la division de leurs domaines d'applications. Les MEMS ont été divisés en quatre secteurs: **BioMEMS**, **RF MEMS**, **MOEMS**, **capteur MEMS**, qui sont devenus de nouveaux champs de recherche.

1.5.1. BioMEMS

BioMEMS, ou systèmes micro électromécaniques biomédicaux, a émergé comme un sous-ensemble de dispositifs MEMS pour des applications dans la recherche biomédicale et médicale micro dispositifs. Au cours des dernières décennies, cette technologie a conduit à des avancées significatives dans différents domaines de la médecine et de la biologie à travers le développement d'une variété d'architectures de dispositifs de micro-ingénierie. Cette accélération est principalement due au fait que la technologie de microfabrication permet une miniaturisation des appareils, ainsi qu'une meilleure performance, un coût réduit et une fiabilité plus élevée.

Les termes de bioMEMS et bio-microsystèmes sont de plus en plus utilisés pour désigner, d'une manière générale, la grande panoplie des micro-dispositifs destinés aux sciences de la vie. Ces derniers peuvent être classés en 5 grandes catégories [17]:

- Biocapteurs ou «*Biosensors* »Laboratoire sur puces ou « μ TAS»
- Dispositifs implantables ou «*implantable devices*»
- Les micro/nanomachines : Ce sont des dispositifs qui peuvent être injectés dans les liquides corporels. Comme indiqué dans la figure 1.4 suivante :

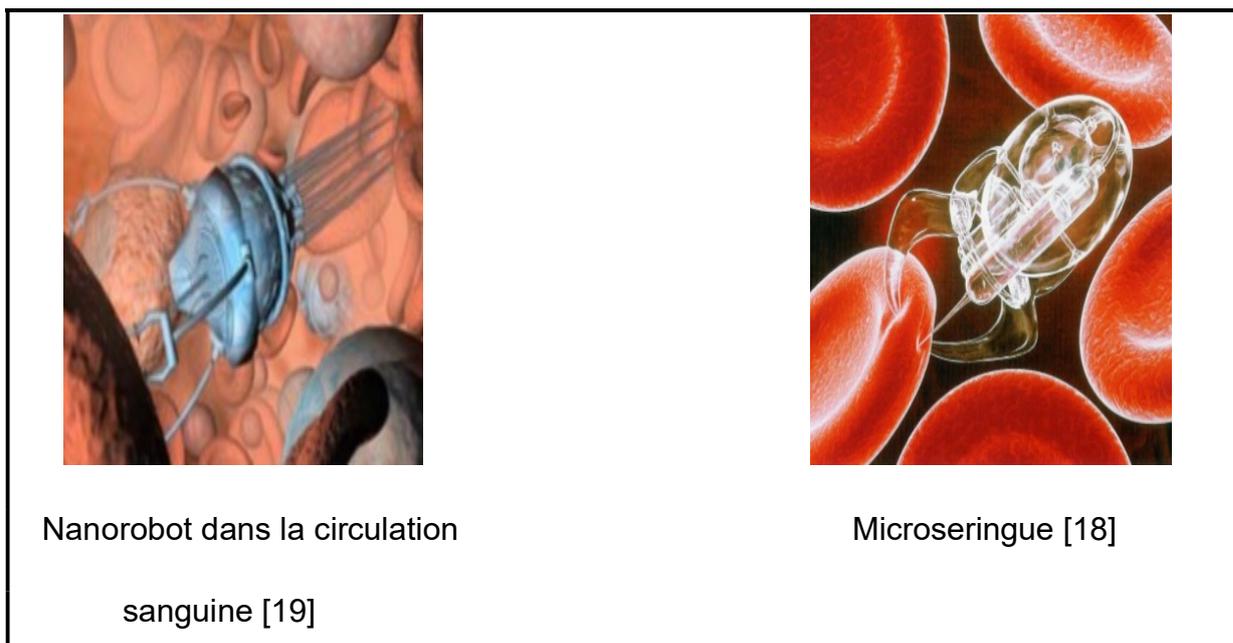


Figure 1.4 : des dispositifs qui peuvent être injectés dans les liquides corporels.

1.5.2. Capteur MEMS

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée appelé mesurande en une grandeur qui généralement électrique (charge, courant, impédance ou tension) appelée réponse. Les capteurs sont classés selon leur principe de fonctionnement :

➤ **Capteurs actifs**

On parle de capteur actif lorsque le phénomène physique qui est utilisé pour la détermination du mesurande effectue directement la transformation en grandeur électrique. C'est la loi physique elle-même qui relie mesurande et grandeur électrique de sortie. Un capteur actif fonctionne assez souvent en électromoteur et dans ce cas, la grandeur de sortie est une différence de potentiel. Ce type de capteur est surtout utilisé pour assurer des mesures continues en temps réel [20].

Tableau 1.1 : Grandeurs d'entrée et de sortie et effet utilisé pour les capteurs actifs [21].

| Grandeur physique mesurée | Effet utilisé | Grandeur de sortie |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Température | Thermoélectricité | Tension |
| Flux de rayonnement optique | Photoémission | Courant |
| | Effet photovoltaïque | Tension |
| | Effet photo-électrique | Tension |
| Force | Piézo-électricité | Charge électrique |
| Pression | | |
| Accélération | Induction électromagnétique | Tension |
| Vitesse | | |
| Position (Aimant) | Effet Hall | Tension |
| Courant | | |

➤ **Capteurs passifs**

Ils sont constitués d'un matériau spécifique dont l'impédance (résistance, capacité ou inductance) est sensible au mesurande. Ils ont besoin dans la plupart des cas d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner (exemples : thermistance, photorésistance, potentiomètre, jauge d'extensomètre appelée aussi jauge de contrainte...). Ce sont des capteurs modélisables par une impédance. Une variation du phénomène physique étudié (mesuré) engendre une variation de l'impédance. Il faut leur appliquer une tension pour obtenir un signal de sortie [22].

Tableau 1.2 : Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs [21].

| Grandeur mesurée | Caractéristique électrique | Type de matériau utilisé |
|-----------------------------|----------------------------|--|
| Température | Résistivité | Métaux : platine, nickel, cuivre ... |
| Très basse température | Constante diélectrique | Verre |
| Flux de rayonnement optique | Résistivité | Semi-conducteur |
| Déformation | Résistivité | Alliage de Nickel, silicium dopé |
| | Perméabilité | Alliage ferromagnétique |
| Position (aimant) | Résistivité | Matériaux magnéto résistants : bismuth, antimoine d'indium |
| Humidité | Résistivité | Chlorure de lithium |

1.5.3. RF MEMS

MEMS RF est l'acronyme de Microelectromechanical Systems pour les Radiofréquences. Ce commutateur adapté à l'électronique haute fréquence se présente sous la forme d'une membrane de plusieurs centaines de micromètres de long suspendue à quelques micromètres du substrat. Quand il n'est pas activé, il isole de manière galvanique l'entrée de la sortie du dispositif (état haut). Lorsqu'une tension est appliquée sur l'électrode d'activation, la poutre métallique est attirée et vient en contact avec la sortie RF en créant un contact électrique idéal avec l'entrée (état bas). Les MEMS RF peuvent être divisés en deux types: les microcommutateurs ohmiques et les microcommutateurs capacitifs [23].

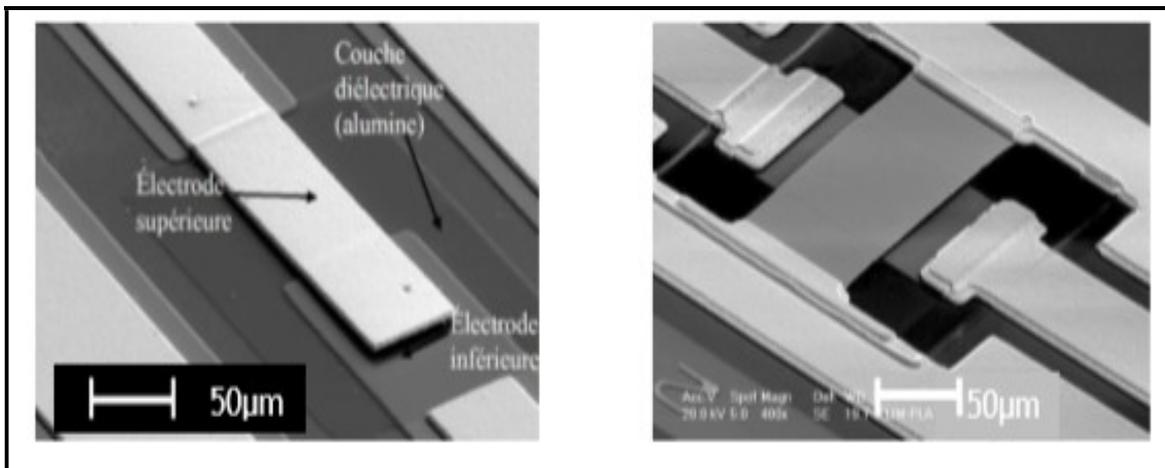


Figure 1.5 : Composants MEMS RF: commutateurs de type cantilever (à gauche) et de type pont (à droite) [24].

➤ **Les microcommutateurs ohmiques**

Les microcommutateurs ohmiques sont les interrupteurs qui utilisent un contact résistif (contact métal-métal) entre la ligne métallique qui transmet le signal et une partie métallique composant l'électrode mobile du microcommutateur [25].

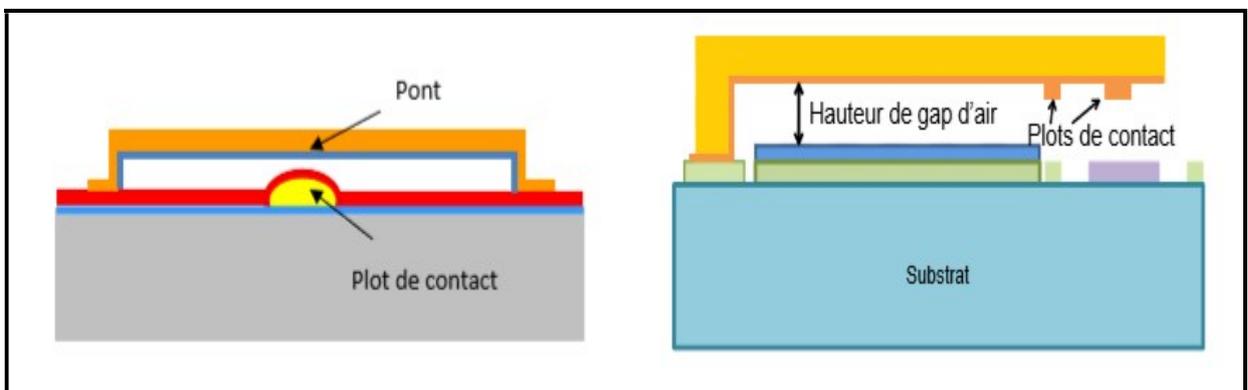


Figure 1.6 : Microcommutateurs ohmiques de type « pont » et de type « poutre » [25].

➤ **Les microcommutateurs capacitifs**

Les commutateurs MEMS RF à contact capacitif fonctionnent sur les mêmes principes que leurs homologues ohmiques. A la différence qu'une fine couche de

diélectrique isolante généralement recouvre l'électrode inférieure, pour former une capacité C_{on} avec l'électrode mobile du composant lorsque le contact est fermé [26].

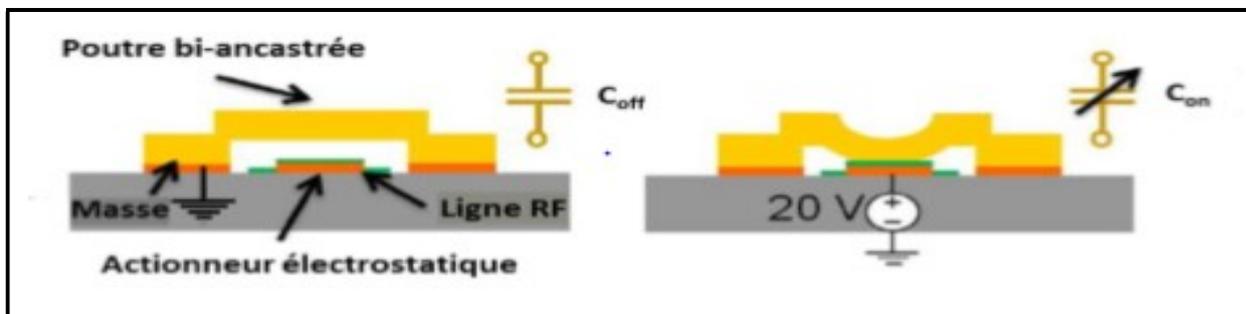


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'un microcommutateur capacitif [27].

1.5.4. MOEMS

Abréviation de Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems, également connu sous le nom de MEMS optique (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) et généralement pris pour inclure les guides d'ondes, les réseaux de diffraction, les miroirs mobiles et les dispositifs à bulles mobiles. L'objectif principal est de doter les systèmes de la capacité d'altérer ou de moduler le trajet d'un faisceau lumineux et, dans certains cas, de modifier temporellement ou spectralement le faisceau lumineux. Les éléments micro-optiques les plus courants sont ceux qui réfléchissent, diffractent ou réfractent la lumière. MOEMS est la manipulation de la lumière dans un espace à un, deux ou trois dimensions [28].

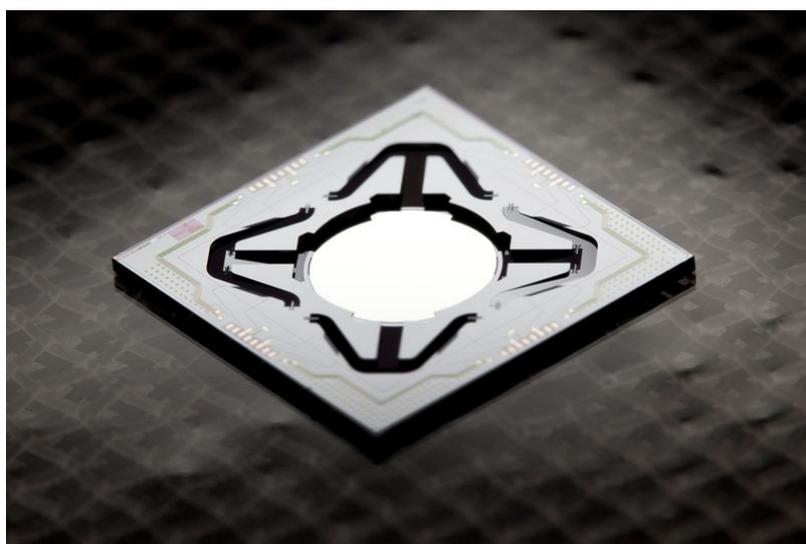


Figure 1.8 : miroir MEMS [29].

1.6. Généralité sur la fabrication de MEMS

La fabrication des MEMS de nos jours utilise des systèmes de fabrication de circuits intégrés par lots et en grande quantité. Il existe plusieurs manières de fabriquer les MEMS, dont la microfabrication de surface, la microfabrication de substrats, le micro-usinage par électroérosion (EDM) et les technologies HARM telles que LIGA (un acronyme allemand signifiant lithographie, électrodéposition par bain d'électrolytes et moulage). La microfabrication en volume repose sur la gravure du substrat (généralement du silicium) par l'intermédiaire de solutions chimique (gravure humide) ou par l'intermédiaire d'ions réactifs (gravure sèche), pour venir libérer des structures autoportantes. La microfabrication en surface est basée sur le dépôt de couches sacrificielles qui sont gravées sélectivement de façon isotrope afin de libérer les structures suspendues. Contrairement à la microfabrication en volume, cette technique ne touche pas le substrat qui n'est plus qu'un support est permet ainsi de simplifier les procédés de fabrication. De plus, avec l'utilisation de substrats SOI (*Silicon ON Insulator*), cette technique de fabrication est adaptée à la fabrication de structures de plus en plus petites avec un contrôle précis des paramètres géométriques [30].

Il existe plusieurs techniques de microfabrication:

1.6.1. Techniques de microfabrication « Dures »

La dénomination “ dures” provient des matériaux utilisés : le verre et surtout le silicium. Dérivant des procédés planaires de la microélectronique les géométries sont principalement bidimensionnels [31].

➤ **La photolithographie**

La photolithographie est le procédé technique permettant de reporter une image sur un substrat, elle consiste à éclairer une résine photosensible à travers un masque. La résine photosensible (positive ou négative) est d'abord déposée sur un substrat.

L'ensemble est bombardé par un faisceau de rayons X, d'électrons ou de photons. Ce faisceau passe au travers d'un masque qui forme le motif à graver sur le substrat. Il y a trois étapes sont nécessaires pour réaliser une lithographie [32] :

1. l'enduction de la résine.
2. l'insolation de la résine aux UV à travers un masque.
3. le développement de la résine.

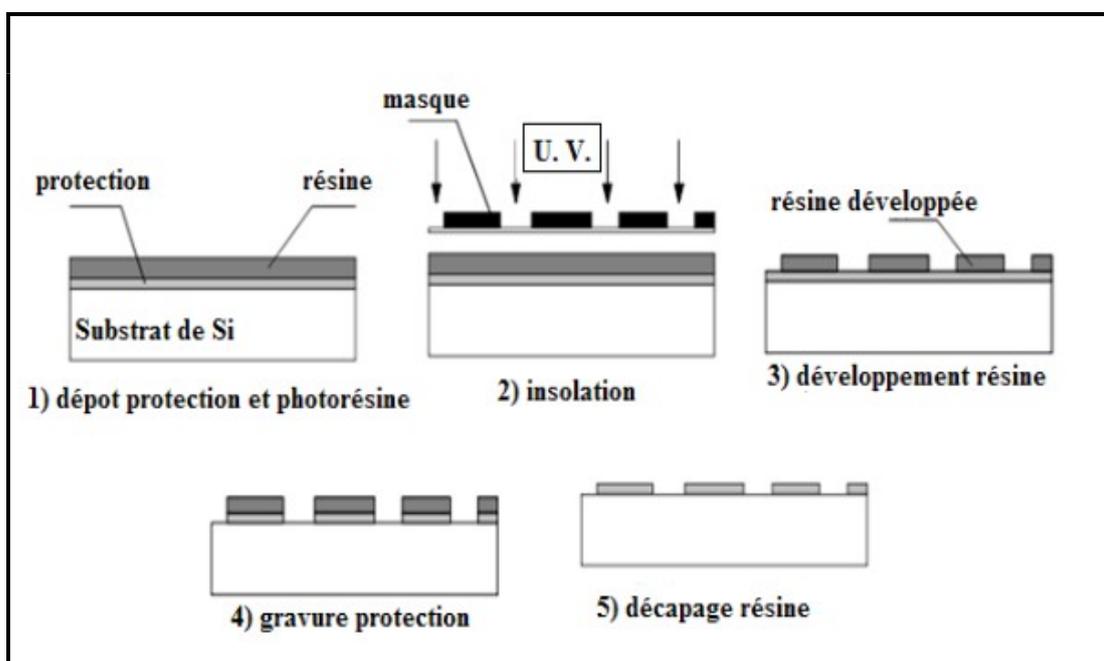


Figure 1.9 : Principe de la lithographie [32].

➤ La gravure

Le principe de toutes les gravures est de “creuser” à l’aide d’une attaque chimique ou physique le substrat à des endroits déterminés par une étape de lithographie [33].

a. La gravure humide :

Par gravure humide on entend tous les procédés d’attaques chimiques en phase liquide. Pour les substrats en verre, le réactif le plus utilisé est l’acide fluorhydrique qui dissout la silice [34].

b. Gravure sèche : DRIE

La Réactive profonde en gravure des ions « *Ion Etching* » est une étape de gravure par bombardement d'un plasma d'hexafluorure de soufre (SF₆) et d'une étape de protection par dépôt d'une fine couche de fluor-carbone (Fig. 9). Cette couche de protection ne résiste pas à l'attaque directe des ions mais est suffisante pour limiter la gravure latérale d'une aux réflexions [35].

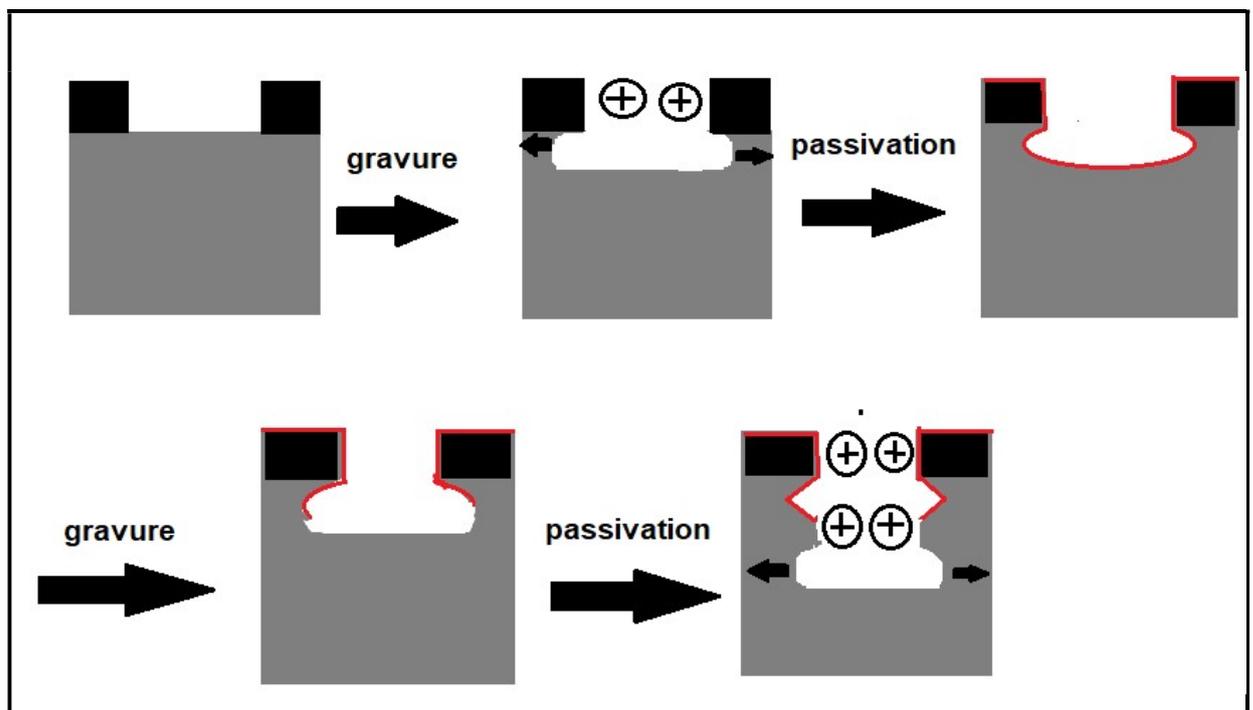


Figure 1.10 : Principe de la gravure DRIE par bombardement ionique.

➤ Collage (*bonding*)

Le dernier aspect des méthodes de fabrication dures est le collage, ou bonding. Le plus souvent la circulation des fluides s'effectuent dans des canaux fermés [36].

Si l'on excepte l'utilisation des colles chimiques, deux techniques sont particulièrement utilisées en microfluidique :

1. le collage anodique.
2. la fusion.

1.6.2 Techniques de microfabrication « douces »

Les techniques de fabrications dites douces sont appliquées spécialement aux matériaux polymères en suivant par la technologie polymères (PDMS, PMMA, SU8, ets...) qui produisent environ des années 90, la microfluidique prend tout son développement par l'adaptation de ces techniques tels que le moulage par injection, emboutissage à chaud du PMMA et par d'autre ce qu'on appelle le minage ou « *bonding* » [34].

➤ Le moulage

La méthode plus largement utilisée au plan industriel est la technique dite de moulage par injection « *injection molding* » présentée sur la Figure 1.11. Dans un premier temps, l'enceinte renfermant la matrice est fermée, chauffée au-dessus de la T_g du polymère et mise sous vide. L'injection du polymère, préalablement chauffé, peut alors débuter, puis l'ensemble est refroidi et enfin la pièce est démoulée [37].

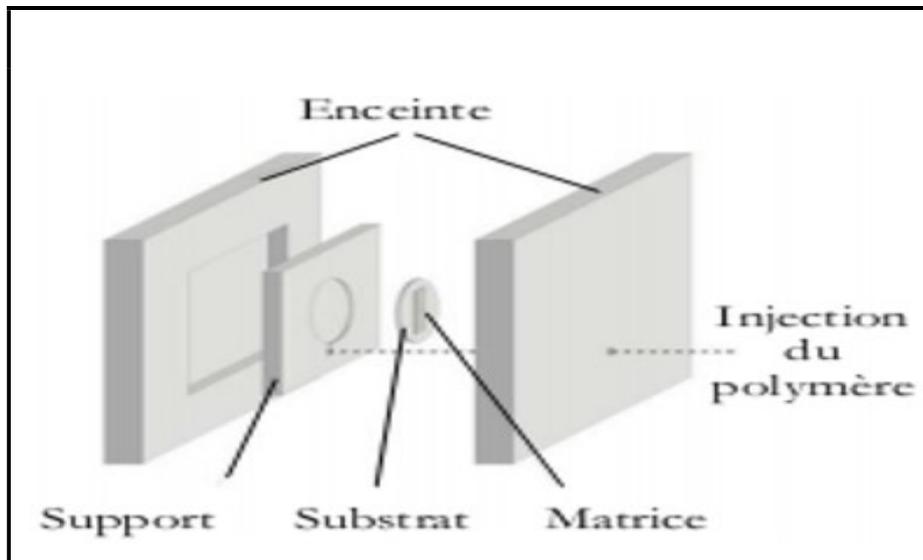


Figure 1.11 : Description générale de la méthode de moulage par injection [37].

➤ Emboutissage

L'emboutissage à chaud est une technique de réplique dans laquelle un film thermoplastique (ici le PMMA) est chauffé par l'outil au-dessus de sa T_g et pressé sous vide. C'est dans le contrôle de la durée des cycles chauffage + vide et

refroidissement + vide que réside la réussite de cette méthode comme illustré sur la Figure 1.12. L'inconvénient de cette technique est la durée des cycles nécessaires pour la microfabrication du système [38].

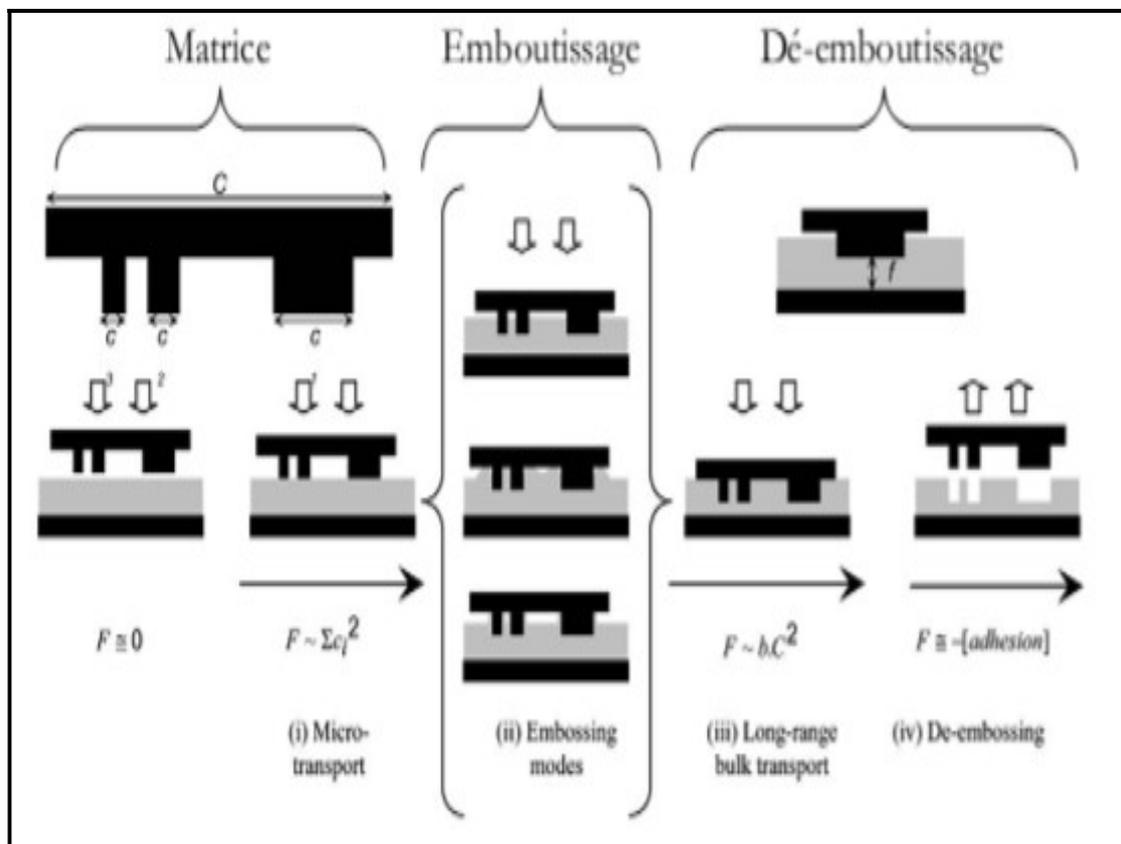


Figure 1.12 : Principales étapes de la micro-structuration d'un réseau microfluidique par une méthode d'emboutissage à chaud [38].

➤ Laminage

Une autre technique consiste à reporter des couches secs de SU-8 ce qu'on appelle laminage. Dans tous les cas, la canalisation microfluidique ouverte (sans capot) est dans un premier temps micro-structurée à l'aide d'une méthode de photolithographie classique. La SU-8 étant une résine photosensible, les possibilités de design, de géométrie et de dimension des canalisations sont grandes. Un exemple utilisant la méthode de laminage de films secs photosensibles de SU-8 est présenté sur la Figure 1.13 [39].

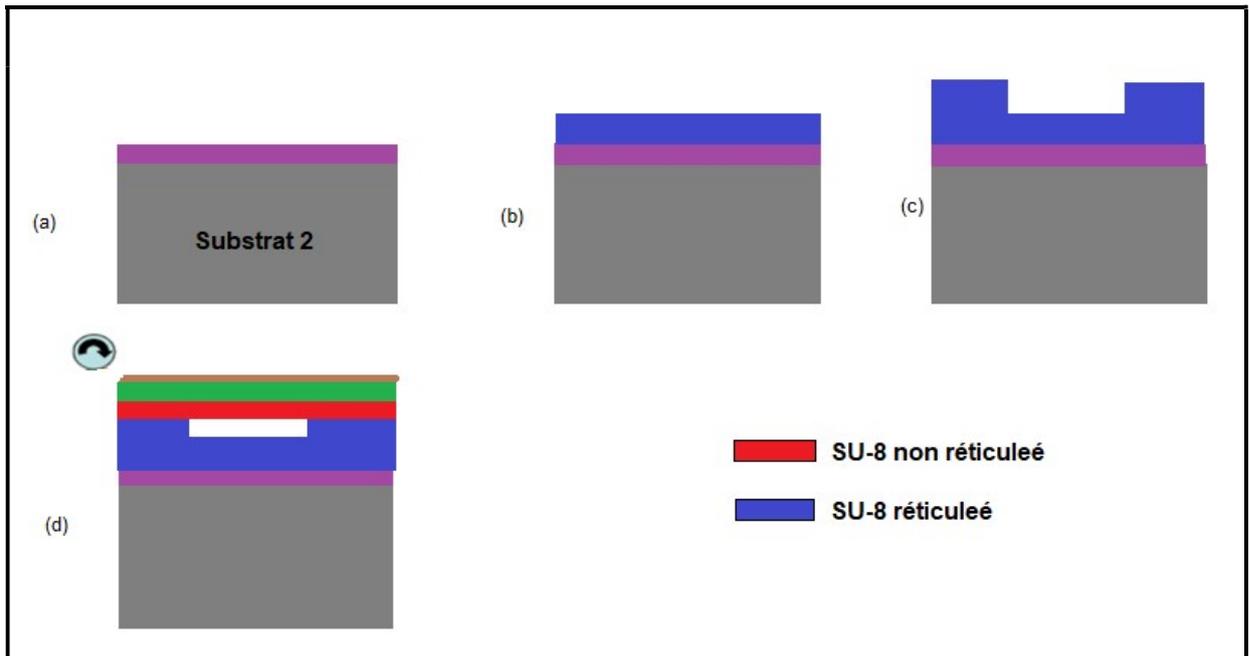


Figure 1.13 : Procédé de report de SU-8 par laminage : (a) laminage d'une couche de PET ; (b, c) enduction et photolithographie des premiers niveaux de SU-8 ; (d) laminage de couche flexible de SU-8 encore photosensible.

1.7. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de définir la technologie MEMS et la méthode de fabrication de ses systèmes. Les MEMS offrent la possibilité de miniaturiser les appareils, de les intégrer à l'électronique et de réaliser des économies grâce à la fabrication par lots. La technologie MEMS a amélioré de nombreuses applications importantes et elle est très prometteuse pour continuer à apporter des contributions à l'avenir.

CHAPITRE 2 : LES PROCEDES DE MICROFABRICATION

2.1 Introduction

Dès les années 60, la gravure du silicium était un sujet d'étude à la fois pour la mise en évidence des défauts dans un cristal de silicium et pour la possibilité de graver un cristal de manière isotrope. Ce n'est que dans les années 75 que la mise en évidence du caractère anisotrope est apparue comme un élément permettant la réalisation de formes tridimensionnelles par l'usinage sélectif du substrat [30]. Ce chapitre donne un aperçu détaillé des différentes technologies de fabrication des microsystèmes.

2.2 Généralité sur les matériaux utilisés dans la micro fabrication

Si nous considérons la technologie de microfabrication comme un ensemble d'outils génériques, il n'y a aucune raison de limiter son utilisation à un seul matériau. En effet, la microfabrication a été démontrée en utilisant du silicium, du verre, des céramiques, des polymères et des semi-conducteurs composés d'éléments des groupes III et V, ainsi qu'une variété de métaux incluant le titane et le tungstène. Le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé dans la microfabrication du fait de son abondance naturelle et son faible coût de production comparé à d'autres semi-conducteurs, en raison de ses propriétés; son traitement peut être facilement contrôlé pour obtenir un niveau élevé de précision et de reproductibilité et beaucoup de dispositifs micro-usinés peuvent être fabriqués à partir d'une seule plaquette [11].

2.3 Le silicium

Le silicium est un élément chimique, de symbole Si et de numéro atomique 14. C'est l'élément le plus abondant sur la terre après l'oxygène (27,6%). Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde de silice (dans le sable, le quartz, la cristobalite, etc) ou de silicates (dans le feldspath, la kaolinite, etc). Le silicium a fondamentalement une cellule unitaire cubique à faces centrées (FCC) (comme le montre la figure 2.1), et la distance du réseau est asymétrique et non uniforme présente des caractéristiques thermo-physiques et mécaniques anisotropes [30].

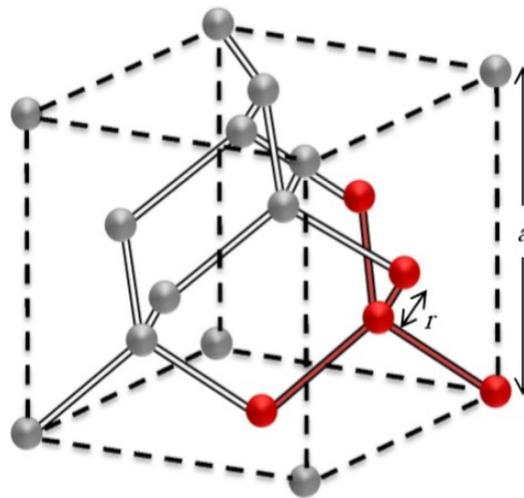


Figure 2.1 : Structure du silicium cristallin [30].

2.3.1 Propriétés du silicium

Outre ses propriétés électroniques, la demande croissante de silicium est due à ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques exceptionnelles :

Tableau 2.1 : Paramètres de base du silicium [11].

| | |
|--|---|
| Structure en cristal | Diamant |
| Point de fusion | 1687 K |
| Densité spécifique | 2.329 g/cm ³ à 298 K |
| Conductivité thermique | 149 W/m·K |
| Coefficient de dilatation Thermique | 2.56*10 ⁻⁶ m ⁻¹ K ⁻¹ (à298K) |
| La capacité thermique spécifique | 19.79 J/mol·K |
| Module d'Young | 150 Gpa |
| Vitesse du son | 8433 m/s |
| Dureté | 850 kg/mm |
| Indice de réfraction (varie avec T et λ) | ~ 3.54 λ 1.1 μm, RT |

- C'est presque un matériau structural idéal. Il à peu près le même module d'Young que l'acier, mais il est aussi léger que l'aluminium.

- Il a une conductivité thermique comparable aux métaux. Son coefficient de dilatation thermique est faible par rapport à la plupart des métaux, ce qui le rend insensible aux chocs thermiques et à la fatigue.
- Il est assez inerte dans un environnement normal, il ne réagit pas avec la plupart des composés acides, mais il réagit avec les alcalis dilués et les halogènes.
- En raison de sa cristallographie, une attaque chimique à la fois isotrope et anisotrope peut être utilisée pour créer des microstructures de manière contrôlée.
- Sa conductivité électrique peut être ajustée en ajoutant de petites quantités d'impuretés.
- Propriétés piezorésistives (jauges d'extensiométrie), (100 fois plus importantes que dans les métaux).

2.3.2 Le dopage de silicium

Le dopage des semi-conducteurs est un élément clef pour la fabrication des composants électroniques. En effet, un semi-conducteur pur (intrinsèque) est quasiment un isolant à la température ambiante, avec une bande de valence presque entièrement pleine, et une bande de conduction presque entièrement vide. Compte tenu des propriétés électroniques intéressantes des semi-conducteurs, ils ne sont pas utilisables en cet état. C'est pourquoi on a recours à une étape technologique indispensable à la conception des composants électroniques : le dopage. Le procédé de dopage consiste en l'introduction contrôlée au mieux, d'impuretés (les éléments dopants) dans le silicium (ou dans tout autre semi-conducteur en général). Les dopants sont de deux natures [31] :

- Donneurs : ils sont alors responsables de l'apparition de charges négatives.
- Accepteurs : ils sont alors responsables de l'apparition de charges positives.

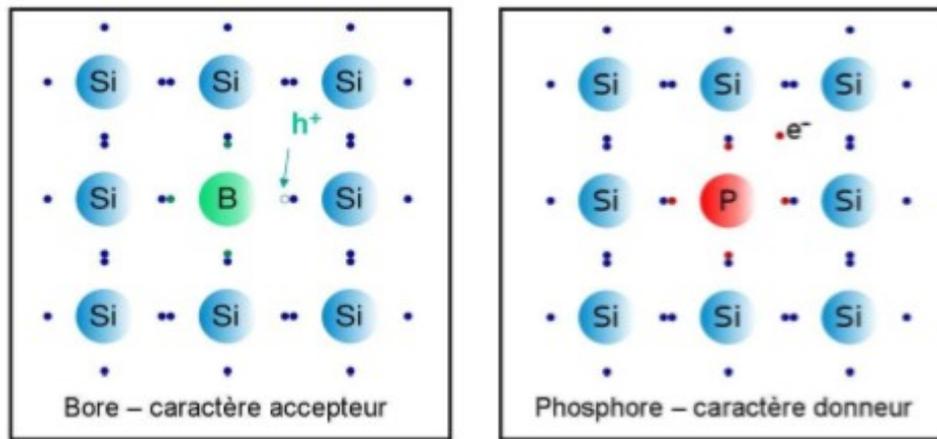


Figure 2. 2 : Comportement dopant du bore (B) et du phosphore (P) dans le silicium [30].

Le silicium est situé dans la colonne IV de la classification périodique des éléments. Les éléments dopants du silicium les plus utilisés sont donnés dans le Tableau 1 [30].

Tableau 2.2: Les éléments dopants du silicium [30].

| Type | Accepteurs | Donneurs |
|-------------------|------------|---------------------|
| Colonne | III | V |
| Les plus utilisés | Bore | Phosphore & Arsenic |

2.3.3 Le silicium monocristallin

La structure cristallographique du silicium monocristallin est une structure cubique diamant dans laquelle deux réseaux cubiques à faces centrées s'interpénètrent. Chaque atome d'un des réseaux est entouré par 4 proches voisins équidistants de l'autre réseau formant un tétraèdre. Les liaisons entre les atomes sont de type covalent avec une distance interatomique de 2.35 Å et un paramètre de maille $a=5.43 \text{ \AA}$ [31].

2.3.4 Oxyde de silicium SiO₂

L'oxyde de silicium est arrangement tétraédrique avec un silicium lié à quatre atomes d'oxygène. La plupart des atomes d'oxygène seront liés à deux atomes de silicium, de sorte que deux tétraèdres sont réunis dans un coin. L'orientation peut être aléatoire, conduisant à une structure amorphe. Certains atomes d'oxygène seront liés à un seul atome de silicium (atomes non-pontant). Les quantités relatives de pontage à non-pontage déterminent la «qualité» de l'oxyde. Si tous les atomes d'oxygène sont pontage, alors une structure cristalline régulière résulte – quartz [32].

2.3.5 Nitrure de silicium

Le nitrure de silicium Si₃N₄ est un matériau covalent qui a des propriétés intéressantes, comme une large bande interdite, une température de fusion importante (1900°C), une grande résistance mécanique. Sous sa forme cristalline, il est ainsi utilisé dans la fabrication d'outils de découpe ou de turbines. Il est également largement développé sous sa forme amorphe dans le domaine de la microélectronique, où il est employé pour diverses applications (couche de protection, de passivation, isolant pour des transistors à films minces...). Son grand gap ainsi que son indice de réfraction ($n \sim 2$) lui confèrent, de plus, des propriétés intéressantes pour l'optique intégrée. Les technologies traditionnellement employées utilisent des procédés hautes températures de manière à développer des couches les plus denses et pures possibles [33].

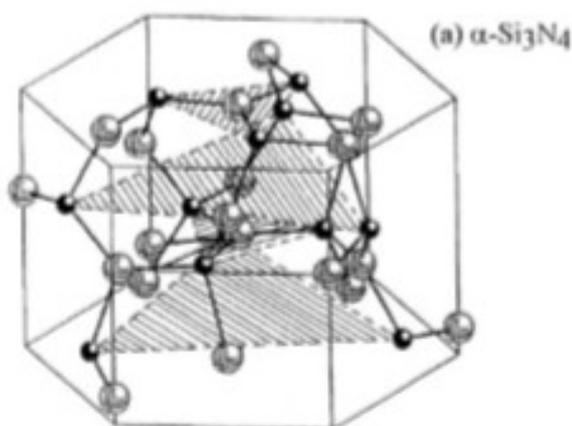


Figure 2.3 : Structure cristalline des configurations α et β du Si₃N₄ [33].

2.4 La gravure

La gravure est un procédé qui consiste à enlever partiellement ou totalement la matière dans les régions du substrat non protégées par le masque.

Deux techniques sont couramment utilisées ; la gravure dite par voie humide et la gravure sèche, chacune ayant ses propriétés, avantages et inconvénients. Ces deux types de gravure interviennent de nombreuses fois au cours des procédés modernes. Elles permettent de graver des couches ou des films afin de créer des motifs [30].

2.4.1 La gravure chimique humide

La gravure par voie humide (*chemical wet etching*) se fait par attaque chimique en solution aqueuse. Dans ce cas le substrat est plongé dans une solution qui va attaquer chimiquement la surface non protégée. Il s'agit en général d'un acide : acide fluorhydrique (HF) ou l'acide hydroxyde de potassium (KOH) pour un substrat en silicium [4].

Cette technique présente plusieurs avantages :

- Elle est relativement facile à mettre en œuvre, et peut être facilement industrialisée
- La gravure est rapide, et permet ainsi d'éviter de détruire la couche protectrice
- Elle présente une bonne sélectivité des matériaux dans le cas des substrats composés de différentes couches, ce qui est souvent le cas.

Ainsi que des inconvénients :

- Parfois moins contrôlable (agitation, consommation de réactifs, adhérence du masque)
- Contaminations
- Inapproprié pour les faibles dimensions

Elle présente un inconvénient majeur : cette gravure est fortement isotrope, c'est-à-dire que l'acide va attaquer le substrat dans toutes les directions, qui crée des attaques latérales notamment dans les zones protégées par la résine [5].

2.5 Le microfabrication en surface

Ce type de procédé est en fait dédié à l'usinage des couches minces déposées sur un substrat de silicium (polysilicium, oxyde de silicium, nitrures...). Il est clair que le déplacement mécanique de la structure est utile pour le fonctionnement de tout actionneur qui nécessite quelques degrés de liberté. Pour cela, des couches sacrificielles (oxyde de silicium, polymère...) sont déposées entre les différentes couches minces puis dissoutes à la fin de la fabrication à l'aide d'un solvant sélectif. Des mouvements d'une couche par rapport à une autre deviennent alors possibles.

En utilisant cette technique, un transistor à porte à faux résonnante (Resonant Gate Transistor, RGT) a été réalisé en 1967. Ce sont les premiers dispositifs utilisant une couche sacrificielle pour suspendre leurs bras de levier.

Le micro-usinage de surface repose sur la présence de deux types de matériaux au dessus du substrat : structurels et sacrificiels. Ces derniers sont dissous à la fin du procédé de fabrication libérant ainsi les couches structurales. Les couches sacrificielles sont souvent des oxydes ou des résines, des couches structurales du polysilicium, des métaux ou des isolants non oxydés [34], tels que le nitrure de silicium figure 2.4.

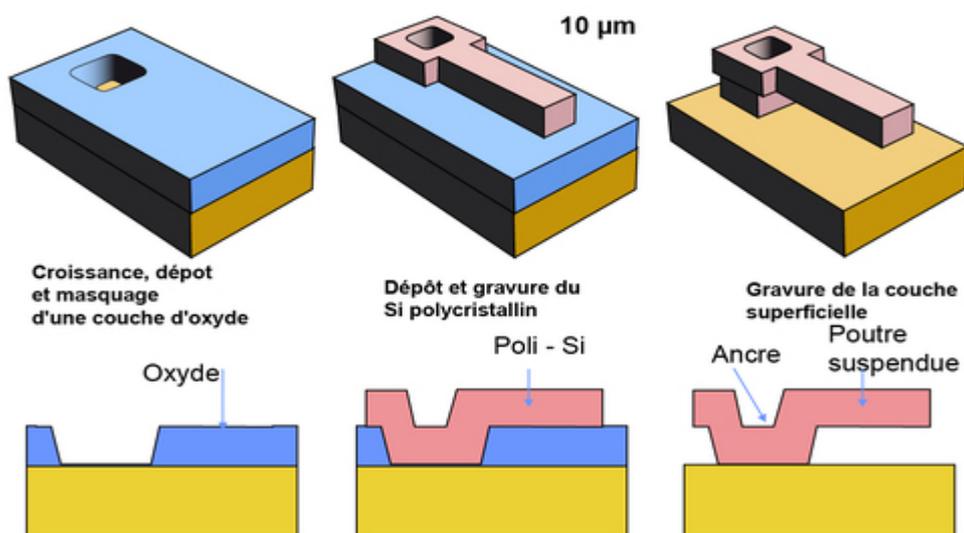


Figure 2.4 : Procédure de Microusinage en surface [35].

Le micro-usinage en surface est basé sur l'emploi de couches sacrificielles. Ces couches vont être gravées entièrement à la fin du processus par une étape de gravure sélective et isotrope. Le terme micro-usinage en surface vient par opposition à l'expression micro-usinage en volume car ici la gravure n'attaque pas le silicium du substrat (bulk). Pendant ce procédé les couches déposées vont être une succession de couches sacrificielles de dioxyde de silicium et de couches structurales de polysilicium.

Au cours du procédé les couches d'oxydes sacrificielles sont gravées de manière à définir les zones d'ancrage des structures en polysilicium sur le substrat ou sur le niveau inférieur. La figure 2.2 montre un schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface avant (a) et après (b) gravure des oxydes sacrificiels. On peut remarquer au passage la couche de nitrure sur tout le substrat, les trois couches structurales de polysilicium ainsi que les couches d'oxydes sacrificielles et les zones d'ancrage. La gravure des oxydes sacrificiels est généralement opérée par de l'acide fluorhydrique à 49%, suivie par une étape de séchage au CO₂ supercritique pour éviter les problèmes de collage [36].

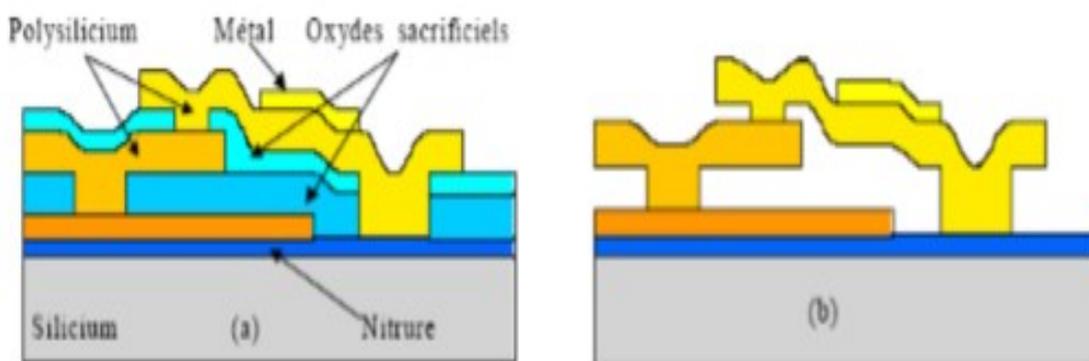


Figure 2.5 : Schéma en coupe d'une technologie de microfabrication en surface (a) avant et (b) après gravure des oxydes sacrificiels [36].

2.6 Le microfabrication en volume

Le micro-usinage en volume permet d'obtenir les formes recherchées pour un MEMS en travaillant le substrat brut. Cela peut se faire avec de différentes manières (gravures sèches ou humides, etc.). Dans le cas d'une gravure anisotrope

fréquemment utilisée, la vitesse de gravure varie suivant l'orientation des plans attaqués et la sélectivité de la solution de gravure (KOH ; TMAH (hydroxyde de tétraméthyle ammonium)...). Ces caractéristiques donnent sa forme finale à la topologie du substrat (figure2.6) [1].

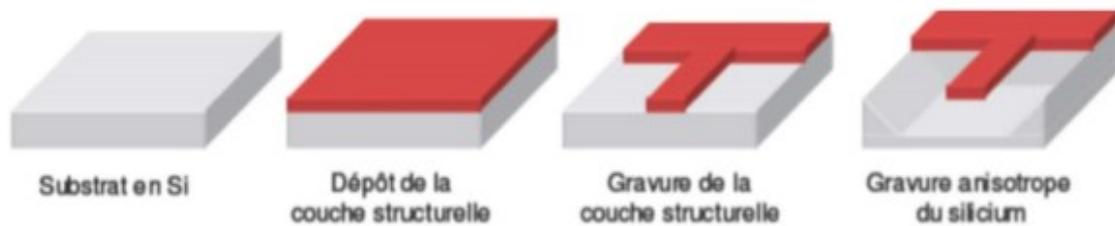


Figure2. 6 : Microusinage en volume [1].

Le micro-usinage en volume est une technique qui permet l'obtention de microstructures suspendues par gravure chimique du substrat d'un circuit intégré. Le terme en volume est utilisé ici puisque l'attaque chimique forme une cavité dans le volume du substrat sous les couches déposées. Les structures suspendues étant obtenues après le post processus spécifique.

Dans le cas du micro-usinage en volume face avant, le post processus ne nécessite qu'une étape de gravure anisotrope.

La définition des zones à graver se fait simplement en empilant les ouvertures dans les différents oxydes au niveau layout de manière à laisser une zone où le matériau du substrat à nu. La figure 7 montre un schéma représentant une coupe verticale d'un processus CMOS micro usiné en volume [3].

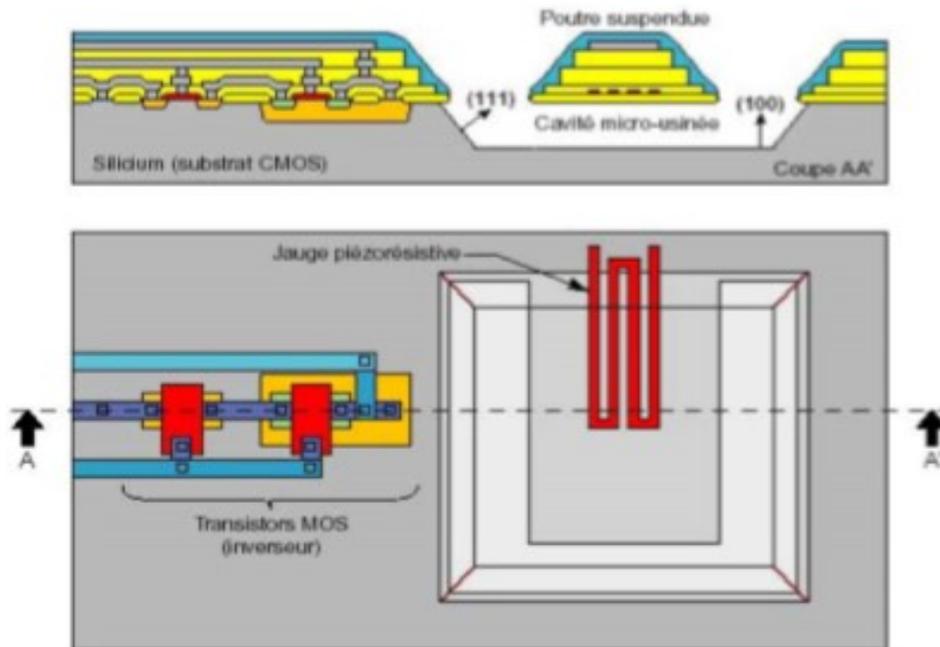


Figure 2.7 : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en volume face avant compatible CMOS [37].

2.7. Gravure isotrope

Les agents acides (par exemple, une solution d'acide chlorhydrique, fluorhydrique et acétique) réagissent sur le substrat (silicium) de la même façon dans toutes les directions à la même vitesse, formant des cavités dont les contours sont arrondis. L'inconvénient d'une telle technique est la difficulté de contrôler exactement le profil. En effet, une partie du substrat étant sous le masque peut être gravée et selon que le bain est agité ou non, les formes peuvent être légèrement différentes (voir figure 8 et 9) [38].

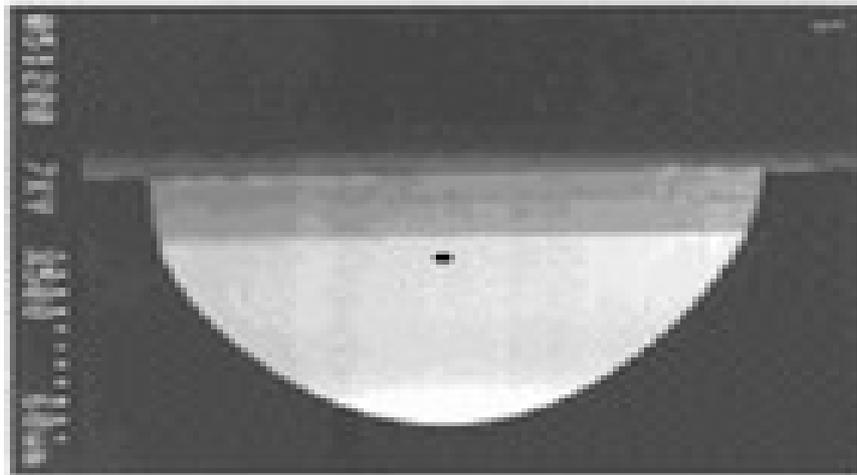


Figure 2.8 : Schéma représente la gravure isotrope en réalité [35].

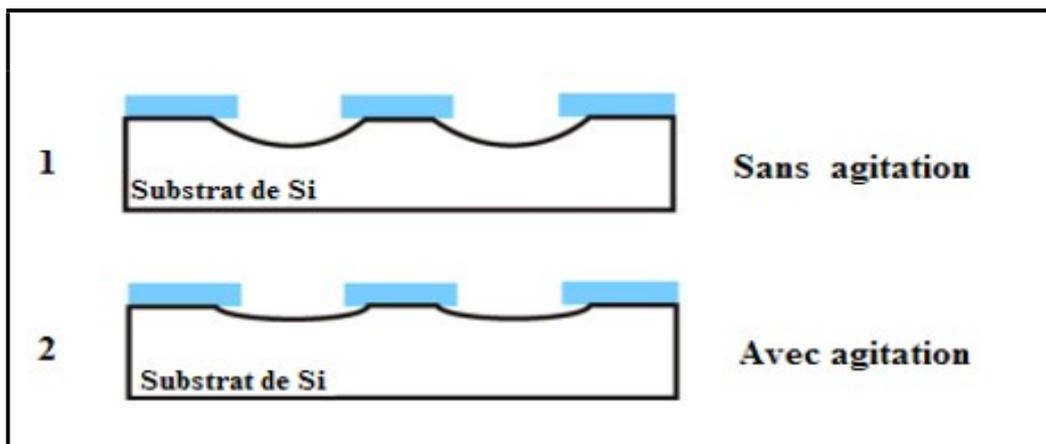


Figure 2.9 : Profils obtenus par gravure isotrope [38].

2.8. Gravure anisotrope

La solution d'attaque est généralement de l'hydroxyde de potassium (KOH). On parle d'anisotropie car la forme du canal dépend du plan d'orientation du substrat de silicium (cristal cubique à face centrée). Grâce à ce procédé, il est possible de contrôler des profils (voir figure 10 et 11) [38].

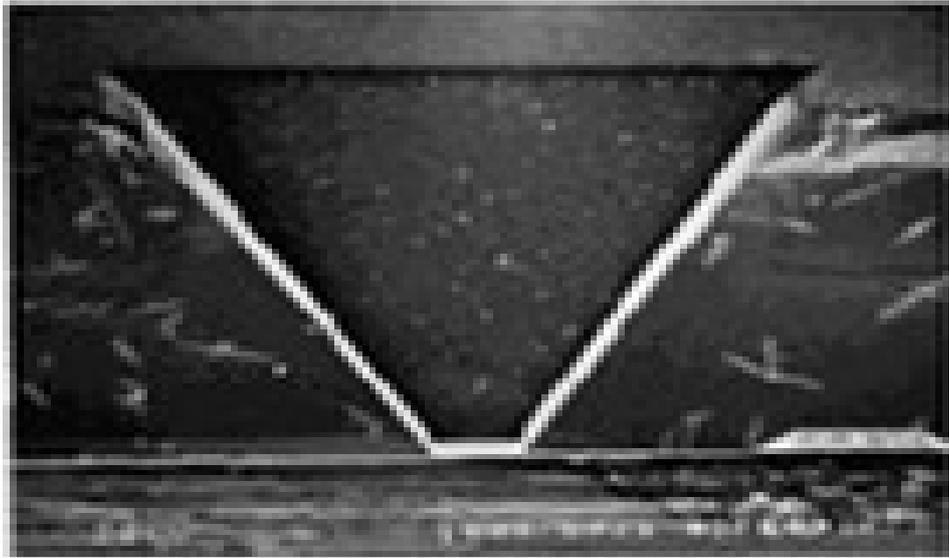


Figure 2.10 : Schéma représente la gravure anisotrope en réalité [35].

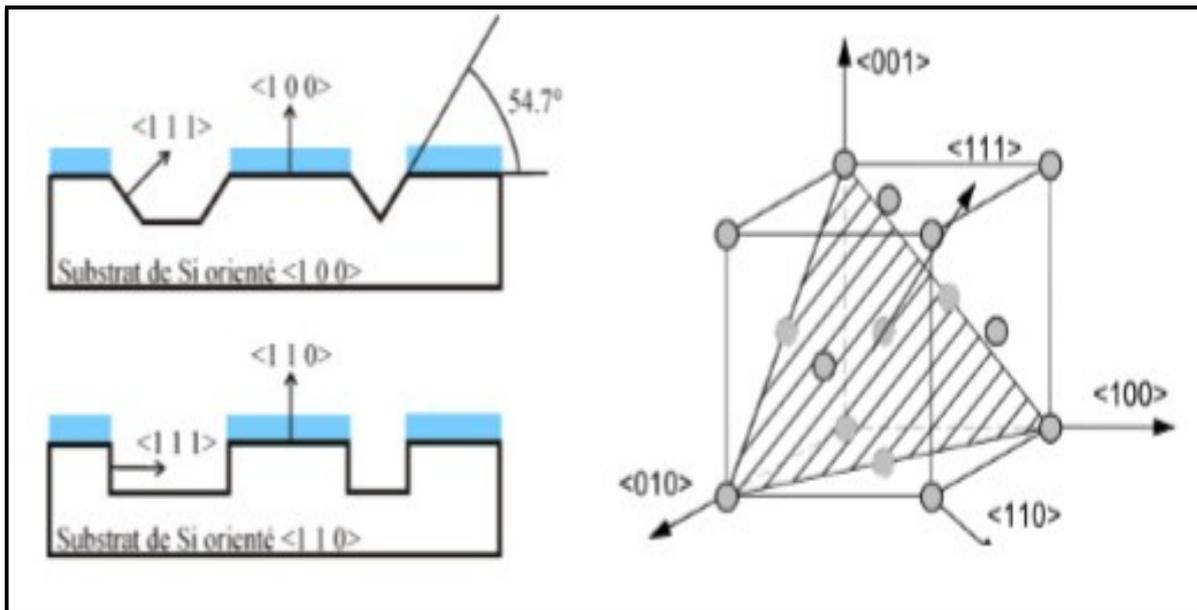


Figure 2.11 : Profils obtenus par gravure anisotrope [38].

2.9. Conclusion

L'objectif de ce chapitre, est de définir la technologie et la méthode de fabrication des microsystèmes dédiés à la gravure chimique humide.

On a montré qu'il existe plusieurs procédés pour la fabrication des parties mécaniques des microsystèmes.

Nous avons présenté deux types de technologies qui s'avèrent nécessaires pour la fabrication des microsystèmes MEMS:

- micro usinage de surface.
- micro usinage de volume.

Partie 2 :

**Modélisation et
simulation de la gravure
chimique humide dans un
écoulement forcée.**

Chapitre 3
Etude sur Comsol
Multiphysics et conditions
limites

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons simuler la gravure chimique humide dans un écoulement forcé par la Méthode des Eléments Finis sous le logiciel COMSOL Multiphysiques. Et enfin nous donnerons les résultats obtenus.

3.2 L'outil Comsol Multiphysiques

COMSOL Multiphysics TM est un outil de modélisation et d'analyse pour le prototypage virtuel de phénomènes physiques. COMSOL Multiphysics peut modéliser virtuellement n'importe quel phénomène physique qu'un ingénieur ou un scientifique peut décrire avec des équations aux dérivées partielles (PDE), incluant le transfert de chaleur, le mouvement des fluides, l'électromagnétisme et la mécanique structurelle.

Les fonctionnalités multi physiques intégrées dans COMSOL Multiphysics permettent à l'utilisateur de modéliser simultanément n'importe quelle combinaison de phénomènes. Grâce à ces fonctionnalités, COMSOL Multiphysics intègre les deux modes de modélisation possibles (via des applications prédéfinies permettant de créer le modèle en fixant les grandeurs physiques qui caractérisent le problème, et à travers les équations modélisant le problème) et permet de les combiner.

COMSOL Mph. simplifie le développement d'applications grâce à l'utilisation du modèle Library, qui comprend des exemples de différents domaines d'application. Grâce à eux, les utilisateurs sans connaissances approfondies en mathématiques ou en analyse numérique, peuvent construire leurs modèles.

Avantages de modélisation et de simulation COMSOL, ainsi que les bibliothèques disponibles pour elle, en font un outil applicable dans un large éventail de domaines, parmi lesquels nous mettons en évidence:

- Acoustiques, électromagnétisme, des systèmes micro-électromécaniques (MEMS), techniques de micro-ondes, les composants de fréquence radio, les dispositifs à semi-conducteurs, propagation des ondes.
- réactions chimiques, la diffusion, la dynamique des fluides, des fluides en milieux poreux, transfert de chaleur, les phénomènes de transport.

- Mécanique des structures
- Physique, géophysique, optique, photonique, mécanique quantique.
- Systèmes de contrôle
- Modélisation des composants.
- Mathématiques appliquées [39].

3.2.1 Méthode des éléments finis

La modélisation en éléments finis est une méthode de simulation qui est très employée. Cette méthode a été des lors employée pour la modélisation et la simulation des microsystèmes du fait de sa capacité à simuler des systèmes en 3 dimensions dans différents domaines d'énergies, que ce soit la mécanique, la thermique, l'électrostatique, l'électromagnétisme, la mécanique des fluides, etc.

La résolution exacte d'un système différentiel modélisant une problématique physique n'est pas toujours accessible. Lorsqu'il s'agit de modèles à géométries complexes, le recours à des méthodes numériques de calcul et, plus précisément, la méthode des éléments finis (MEF) est donc recommandé. La MEF est un outil mathématique très puissant et largement adopté en ingénierie {électromagnétisme, mécanique, transfert de chaleur...} parce qu'elle offre la possibilité d'obtenir des solutions approximatives décrivant la réponse d'un système physique soumis à des mécanismes externes (une tension, une sollicitation, etc.). L'évolution technologique connue en informatique a mis à notre disposition de nombreux logiciels d'éléments finis dédiés à plusieurs secteurs de recherche (COMSOL Multiphysics, Efel, GİD, etc.). Tout fois, il est indispensable de maîtriser les fondements de la MEF pour pouvoir résoudre adéquatement les problématiques rencontrées [40].

3.2.2 Principe de la méthode des éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, sont les suivantes [8] :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines.
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine.
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème.

- Assemblage des matrices élémentaires.
- Prise en compte des conditions aux limites.
- Résolution du système d'équations.

3.2.3 Organigramme du logiciel élément finis

Tout logiciel de calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristiques ou blocs fonctionnels décrits sur la figure 3.1.

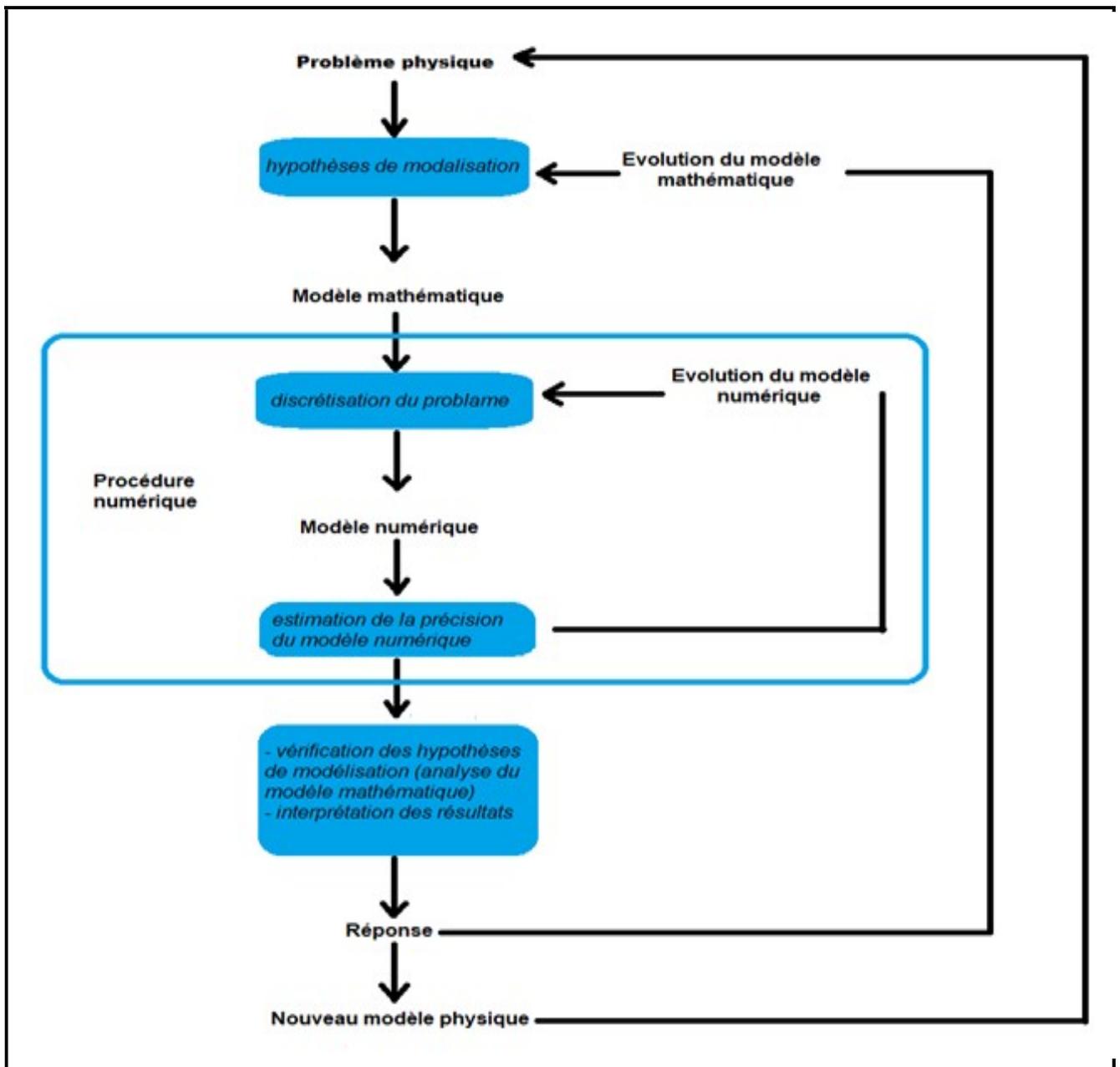


Figure 3.1 : Organigramme d'un logiciel éléments finis.

Le logiciel COMSOL contient différents types des modules qui sont classés comme suit :

- Module d'AC/DC
- Module d'acoustique
- Module de génie chimique
- Module de science de la terre
- Module de transfert de chaleur
- Module de MEMS
- Module de RF
- Module de mécanique structurale

3.3 Le modèle existant de gravure chimique humide

Le modèle 2D simule la gravure d'une rainure dans une surface de cuivre exposée à une solution de CuCl_2 . Le solvant est supposé être de l'eau liquide, en utilisant les données de viscosité dynamique et de densité de la bibliothèque de matériaux intégrée dans COMSOL Multiphysics. Le transport de masse de CuCl_2 est décrit en couplant une interface de flux laminaire avec une interface de transport d'espèces diluées. Ce faisant, on simule le transport convectif et diffusif de l'agent d'attaque CuCl_2 .

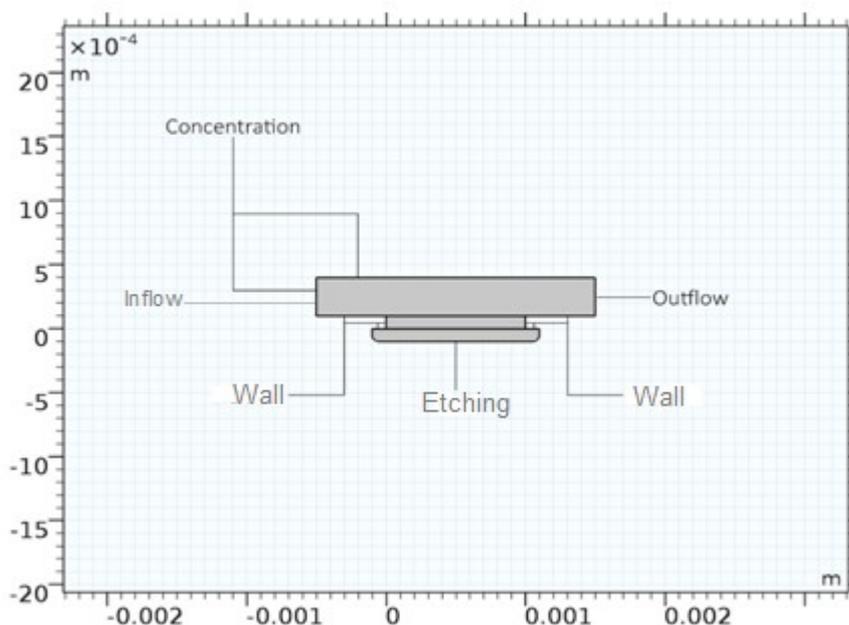


Figure 3.2 : La géométrie utilisée dans l'ancien modèle.

3.4 Notre amélioration sur le modèle existant

La modification que nous avons apportée consistait à changer le matériau à graver, dans l'ancien modèle la surface était en cuivre exposée à une solution de CuCl_2 , et nous avons remplacé le matériau par du silicium et la solution de gravure avec KOH et HF.

3.5 Différentes étapes de la modélisation de la gravure chimique humide dans un écoulement forcé

On résume les différentes étapes sur la modélisation de la gravure chimique humide comme suit :

3.5.1 Définition du modèle

Un schéma du système étudié est illustré à la figure 3.3. Un film solide partiellement protégé par un masque inerte est placé dans une solution qui passe devant le film exposé. Au temps zéro, lorsque la position de la surface du film est à $\Gamma_6(0)$, la solution pénétrant dans la région de la cavité par la gauche est supposée contenir une espèce de décapant, capable de réagir avec le film mais inerte contre le masque de gravure. L'agent de gravure est transporté par convection et diffusés à la surface du film où elles réagissent, gravant ainsi le film.

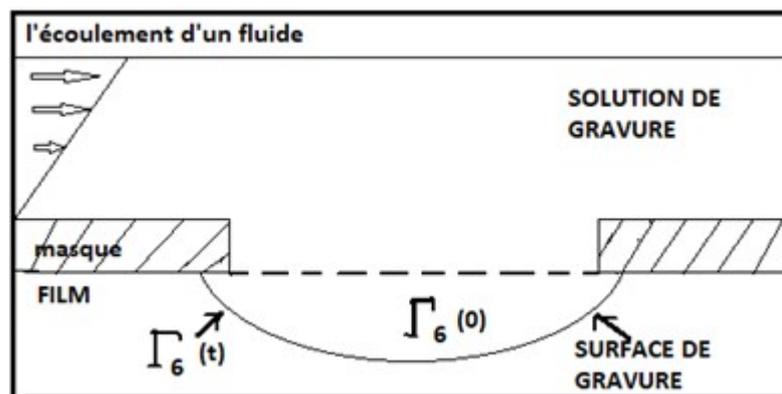


Figure 3.3 : Schéma du système de gravure étudié.

Au fur et à mesure de la gravure du film, la forme de la cavité évolue avec le temps en fonction de la distribution de la vitesse de gravure le long des parois de la cavité. La déformation de la cavité affecte les distributions de flux de fluide local et de

concentration en agent de gravure, ce qui affecte à son tour l'évolution de la forme de la cavité.

Sur la figure 1, la surface de gravure mobile $F6(t)$ est représentée à un certain moment t pendant la gravure. Comme la solution de gravure est capable de graver dans toutes les directions, une dépression caractéristique du masque se développe. Le but du processus de gravure est de minimiser ou d'éliminer totalement le dégazage du masque tout en maintenant un taux de gravure élevé.

3.5.2 Choix du physique

Dans cette étape nous avons fait un mélange de trois physiques :

1. Transport des espèces diluées dans le domaine de Transport d'espèces chimiques.
(voire figure 2)

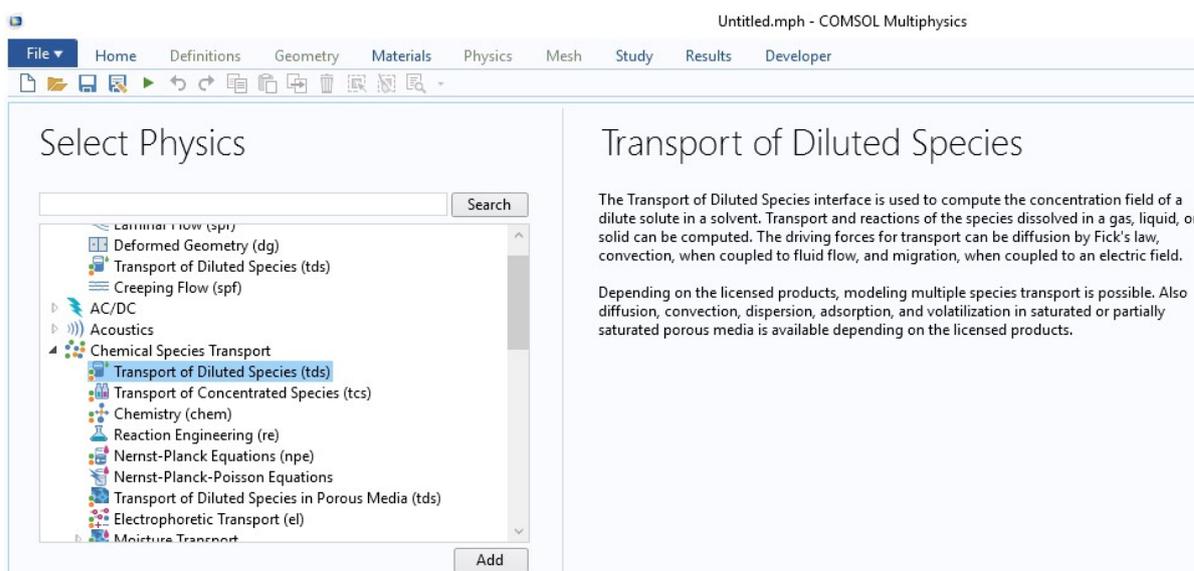


Figure 3.4 : La physique de transport d'espèces chimique.

2. L'écoulement laminaire dans le domaine de l'écoulement de fluide.

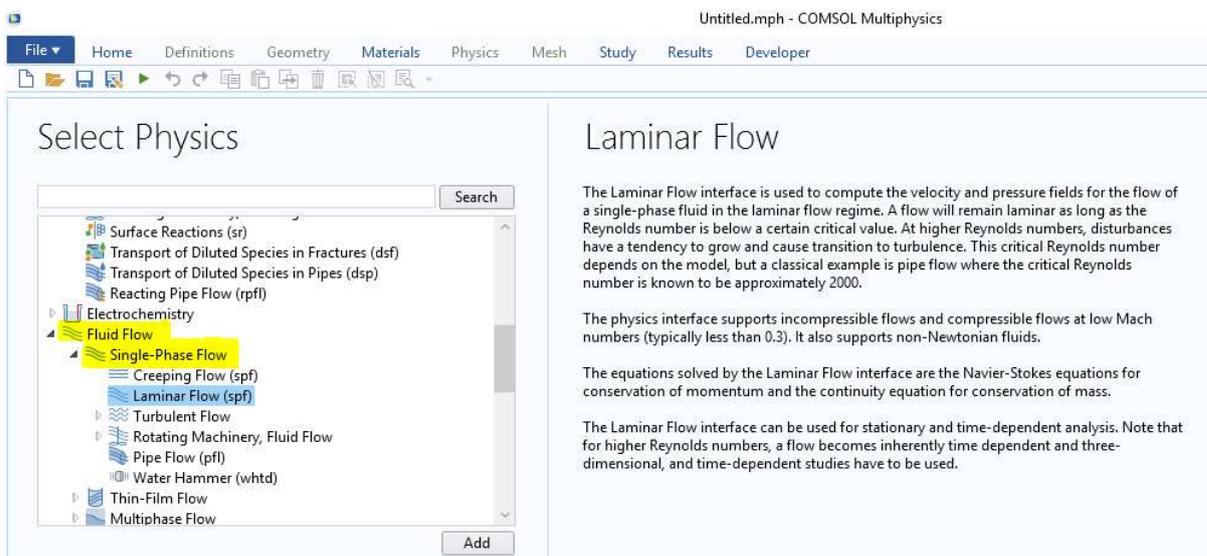


Figure 3.5 : la physique de l'écoulement laminaire dans les sélections physiques.

3. La géométrie déformée dans le domaine mathématique.

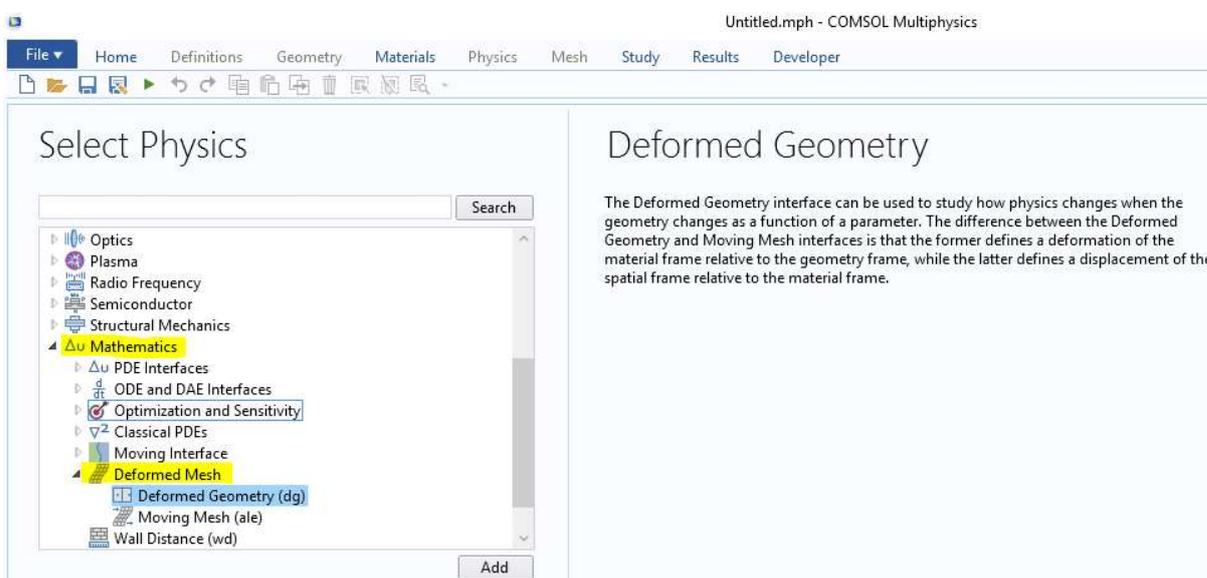


Figure 3.6 : La géométrie déformée.

3.5.3 Géométrie

Nous proposons une géométrie de forme de trois rectangles :

- Le premier rectangle (R1) qui est une plaque de silicium qui sera gravée, ses données comme suit :

Largeur : 0.1 [mm].

La longueur : 1.2 [mm].

- Le deuxième rectangle (R2) est l'ouverture du masque :

Largeur : 0.1 [mm].

La longueur : 1[mm].

- Le troisième rectangle (R3) est le canal par lequel passe le fluide responsable de la gravure :

Largeur : 0.3 [mm].

La longueur : 2[mm].

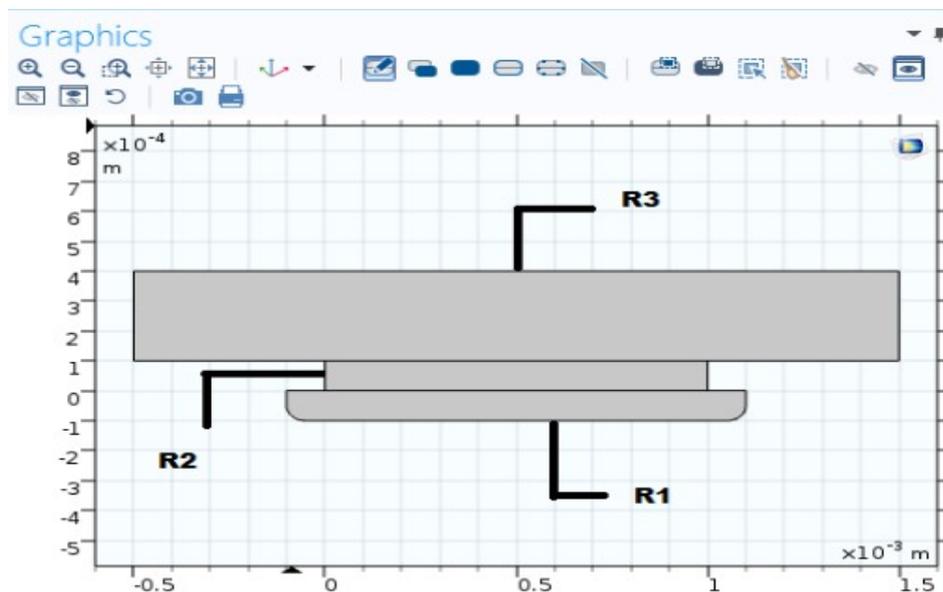


Figure 3.7 : Les dimensions de notre géométrie.

3.5.4 Paramètres

Nous portons dans le tableau 3.1 les valeurs utilisées dans la simulation

Tableau 3.1 : Le paramètre utilisé dans notre modèle.

| Nom | Expression | Description |
|------------------|---|-----------------------------|
| cSi_bulk | 1[mol/dm ³] | Concentration en masse, cSi |
| Kf | 80[um/min] | Constante de vitesse sens 1 |
| M_Si | 28.0855 [g/mol] | Masse molaire, Si |
| rho_Si | 2.32*10 ³ [kg/m ³] | Densité, Si |
| h_mask | 0.1 [mm] | Hauteur masque |
| h_seed_cavity | 0.2 [mm] | Hauteur de cavité |
| d_mask | 1[mm] | Longueur de masque |
| h_boundary_layer | 1[mm] +2*h_seed_cavity | Hauteur de couche limite |
| D | 1e-9[m ² /s] | Diffusion de réactif |

3.5.5 Variables

Nous donnons dans le tableau les variables.

Tableau 3. 1 : Les variables.

| Nom | Expression | Unité | Description |
|-----------|------------------------|--------------------------|----------------|
| v_surface | -r_surface*M_Si/rho_Si | m/s | Vitesse normal |
| r_surface | -kf*cSi | Mol/ (m ² .s) | |

3.5.6 Propriétés des matériaux et conditions aux limites

En utilisant COMSOL Multiphysics, les processus physiques clés impliqués dans la gravure chimique humide peuvent être décrits quantitativement:

- Transport de masse de l'agent de gravure vers la surface
- Hydrodynamique de la solution de gravure.
- Réactions de surface entraînant la croissance de rainures
- Changement de géométrie dû à la gravure de processus

Le modèle de tutoriel de gravure chimique se concentre particulièrement sur le transport de masse et décrit la réaction de surface comme un flux de l'agent de gravure dans la surface, où il est consommé lors de la réaction de gravure. Le modèle 2D simule la gravure d'une rainure dans une surface de silicium exposée à une solution de KOH ou Hf. Le solvant est supposé être de l'eau liquide, en utilisant les données de viscosité dynamique et de densité de la bibliothèque de matériaux intégrée dans COMSOL Multiphysics. Le transport de masse de HF et KOH est décrit en couplant une interface de flux laminaire avec une interface de transport d'espèces diluées. Ce faisant, on simule le transport convectif et diffusif de l'agent d'attaque KOH et HF. Ceci est réalisé en résolvant les équations suivantes:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla c) \quad (1)$$

Où \mathbf{u} est obtenu en résolvant les équations de Navier-Stokes pour l'écoulement laminaire:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F} \quad (2)$$

Avec l'équation de continuité:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

La vitesse de réaction de la surface est couplée à une interface de géométrie déformée, de sorte que la réaction provoque un changement de géométrie. La connexion se fait en convertissant la vitesse de réaction en une vitesse de maille normale en utilisant l'équation suivante:

$$V_n = -N_{surface} M_{Si} / \rho_{Si} \quad (4)$$

Où le rapport de la masse molaire de Si à sa densité convertit la vitesse de réaction molaire en une vitesse de récession pour la surface gravée à mesure qu'elle se dissout. Le taux de réaction de surface $N_{surface}$ est le premier ordre:

$$N_{surface} = -k_f c_{Si} \quad (5)$$

La condition de limite de flux pour la concentration en agent de gravure à la surface est la suivante :

$$D\nabla c \cdot \mathbf{n} = -k_f c \quad (6)$$

Le modèle suppose une concentration en vrac constante de l'agent de gravure au bord gauche et supérieur de la géométrie, correspondant respectivement à la solution d'entrée et à la solution en vrac. Le processus de gravure consomme l'agent de gravure dans la rainure incurvée, ce qui indique la partie de la géométrie qui n'est pas protégée contre la gravure. En raison du gradient de concentration, il existe un flux diffusant d'agent de gravure à partir de la masse vers la surface attaquée, fournissant davantage d'agent de gravure à la surface, de sorte que le processus de gravure peut se poursuivre.

La géométrie et les conditions aux limites du système sont décrites dans la figure suivante. Seules les conditions limites pour l'interface de transport des espèces diluées sont affichées. Les conditions aux limites correspondantes pour l'interface d'écoulement laminaire ne sont pas des conditions de paroi de glissement sur toutes les limites, à l'exception des limites gauche (concentration constante) et droite (sortie).

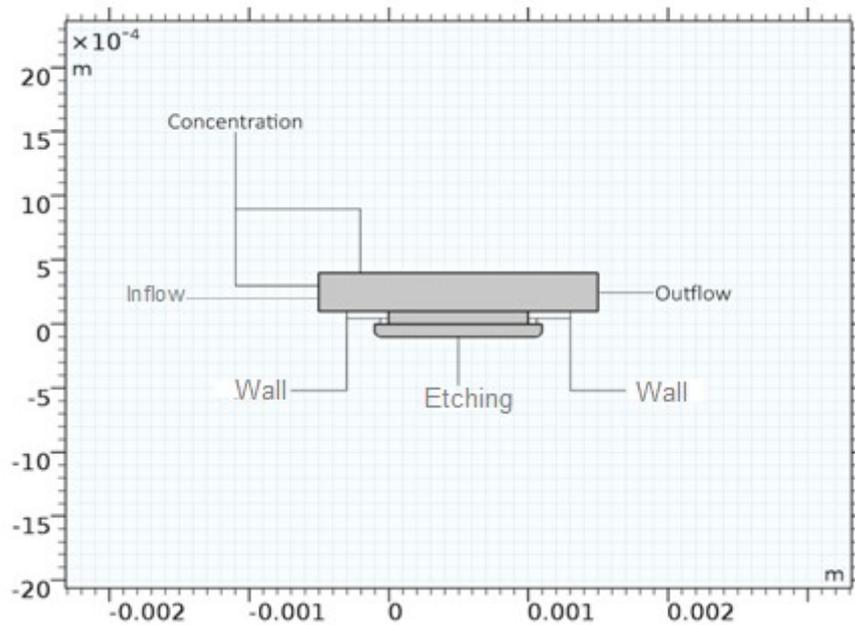


Figure 3.8 : Conditions aux limites (pour l'interface de transport des espèces diluées) et géométrie utilisées pour décrire le processus de gravure chimique.

En combinant ces interfaces, la déformation de la surface en cours de gravure peut être simulée au fil du temps.

3.5.7 Le maillage du modèle

Pour réaliser cette étape, différents types de maillage prédéfinis tels que : encore fin, plus fin, encore plus fin, normal, grossier, plus grossier, encore plus grossier, extrêmement grossier.

Pour notre structure le maillage « normal » est suffisant pour obtenir des résultats corrects. La Figure 3.9 illustre le maillage direct de notre structure modélisée.

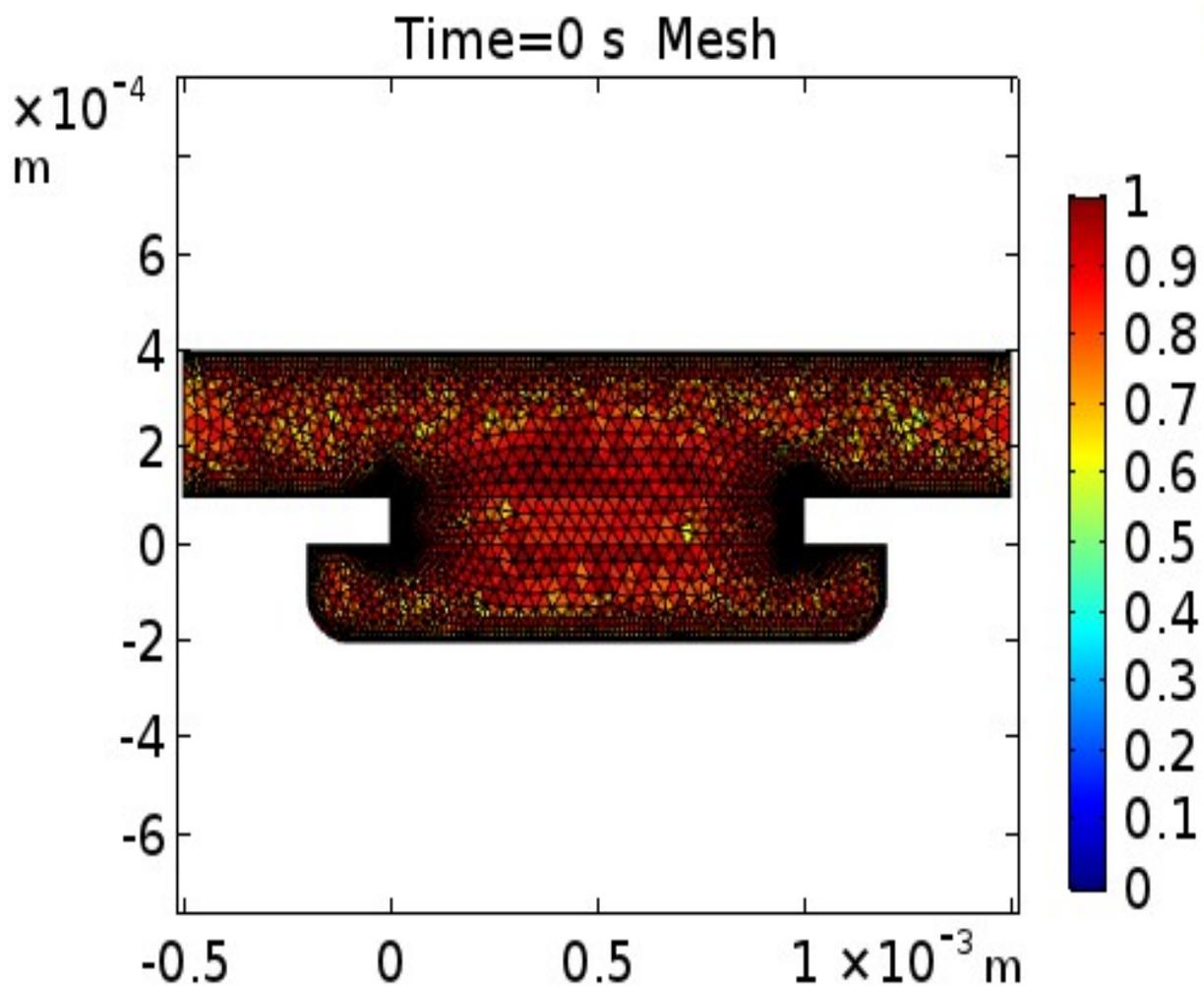


Figure 3.9 : Le maillage direct de notre structure modélisée.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes appliqués à décrire les différentes étapes de modélisation de la gravure chimique humide dans un écoulement forcé : la construction de la géométrie, définition de physique, propriété des matériaux et des conditions aux limites, le maillage du modèle et la simulation de la gravure chimique humide modélisée par un outil puissant « *COMSOL Multiphysiques* ». Cette étude nous a permis de mieux comprendre le comportement gravure de notre structure.

Chapitre 4

RESULTATS ET DISCUSSION

4.3 Les résultats de la gravure isotrope

Dans la gravure isotrope, nous avons utilisé l'acide fluorhydrique avec deux concentrations pour étudier son impact sur la gravure.

4.3.1 La gravure avec une concentration de 48%

Pour travailler avec cette concentration, nous saisissons ses données à partir de viscosité et densité dans le logiciel Comsol Multiphysics (voir les tableaux 1,2 et graphes 2,3), avec la vitesse de gravure (35 [$\mu\text{m}/\text{min}$]).

Tableau 4.1 : la viscosité en fonction de la température.

| Température (k°) | Viscosité |
|------------------|----------------|
| 278,15 | 1,2630 [mPa*s] |
| 283,15 | 1,1590 [mPa*s] |
| 288,15 | 1,0630 [mPa*s] |
| 293,15 | 0,9810 [mPa*s] |
| 298,15 | 0,8440 [mPa*s] |
| 303,15 | 0,7880 [mPa*s] |
| 308,15 | 0,7320 [mPa*s] |
| 318,15 | 0,6830 [mPa*s] |
| 323,15 | 0,6410 [mPa*s] |

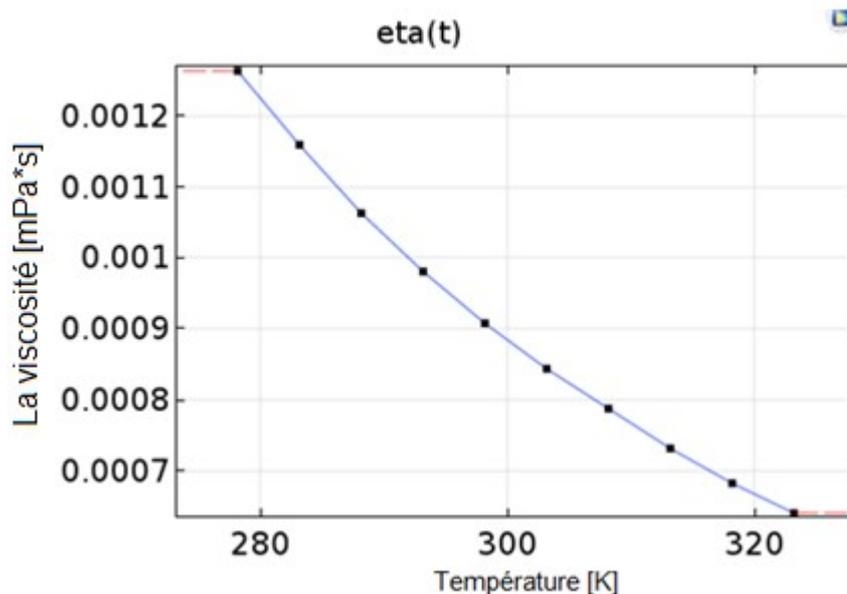


Figure 4.2 : Variation de la viscosité en fonction de la température.

Tableau 4.2 : La densité en fonction de la température.

| Température (K°) | Densité |
|------------------|-----------------------------|
| 278,15 | 1,187[g/cm ³] |
| 283,15 | 1,182[g/cm ³] |
| 288,15 | 1,175[g/cm ³] |
| 293,15 | 1,170[g/cm ³] |
| 298,15 | 1,165[g/cm ³] |
| 303,15 | 1,159[g/cm ³] |
| 308,15 | 1,148[g/cm ³] |
| 318,15 | 1,1425 [g/cm ³] |
| 323,15 | 1,1365 [g/cm ³] |

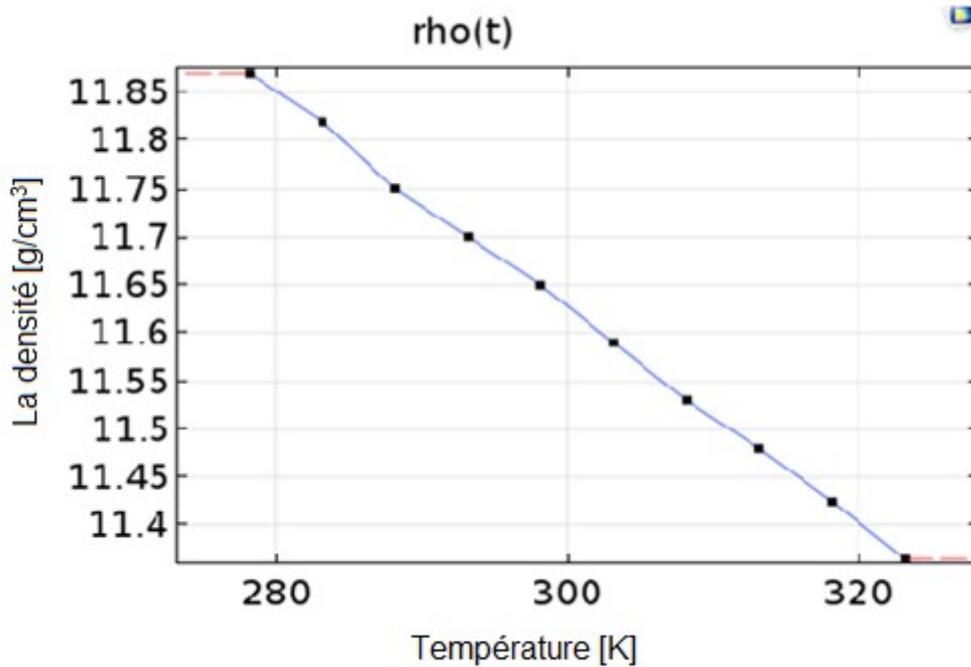


Figure 4.3 : Variation de la densité en fonction de la température.

➤ Résultat

La figure 4.4 montre la concentration de l'agent de gravure HF à un temps $t = 2986$ s pour un rayon de cavité initial de 1.2 mm. Le profil de gravure est symétrique. La vitesse de gravure est plus élevée autour de la zone où le flux laminaire rencontre d'abord la couche limite dans la direction du fluide. La concentration devient plus profonde dans la cavité car l'écoulement laminaire ne peut plus transporter le réactif vers la couche limite en raison de la tolérance.

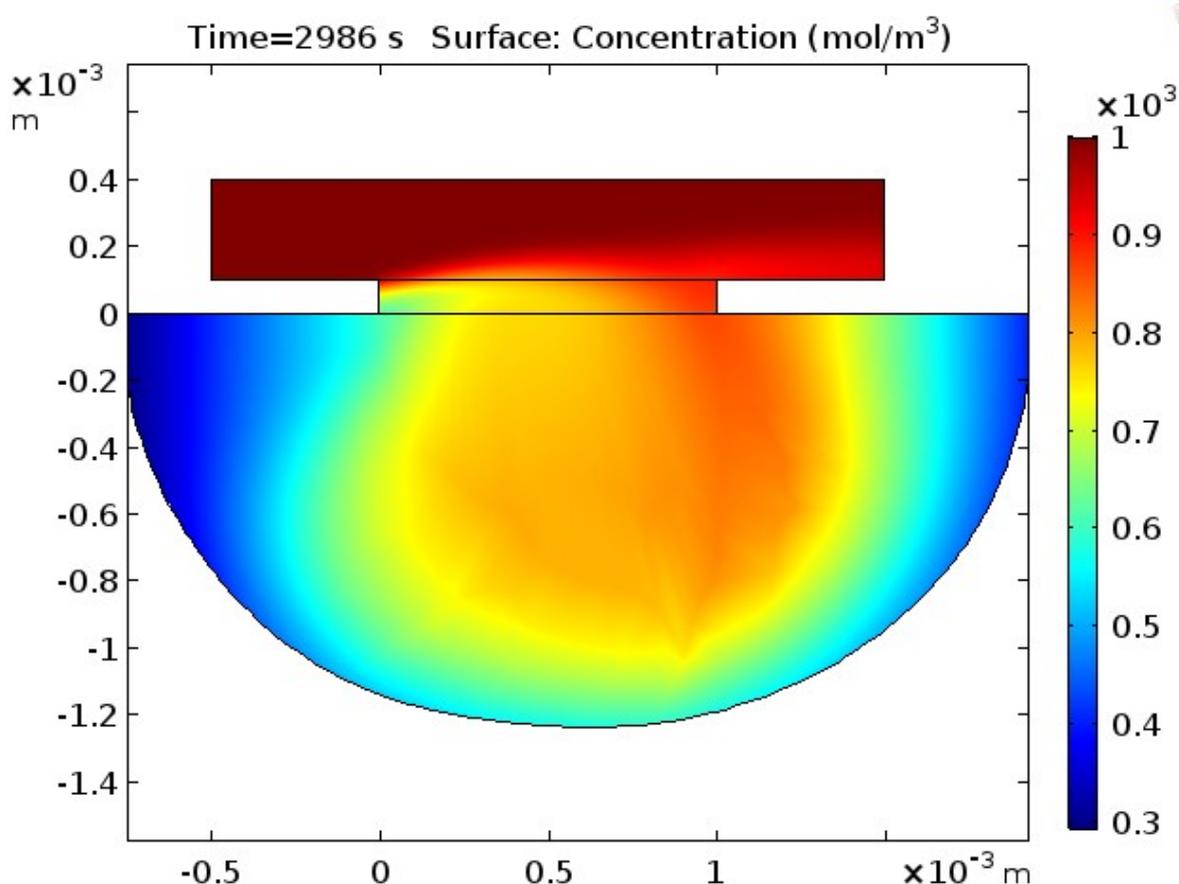


Figure 4.4 : Profil de concentration (48%) du décapant HF à $t = 2986$ s sur la cavité de silicium non masquée.

Dans la phase initiale de la gravure, l'effet de gonflement est beaucoup moins visible. Ceci est dû à la plus grande longueur de diffusion du réactif de la zone au-dessus du masque à la surface de gravure (voire la figure 4.5).

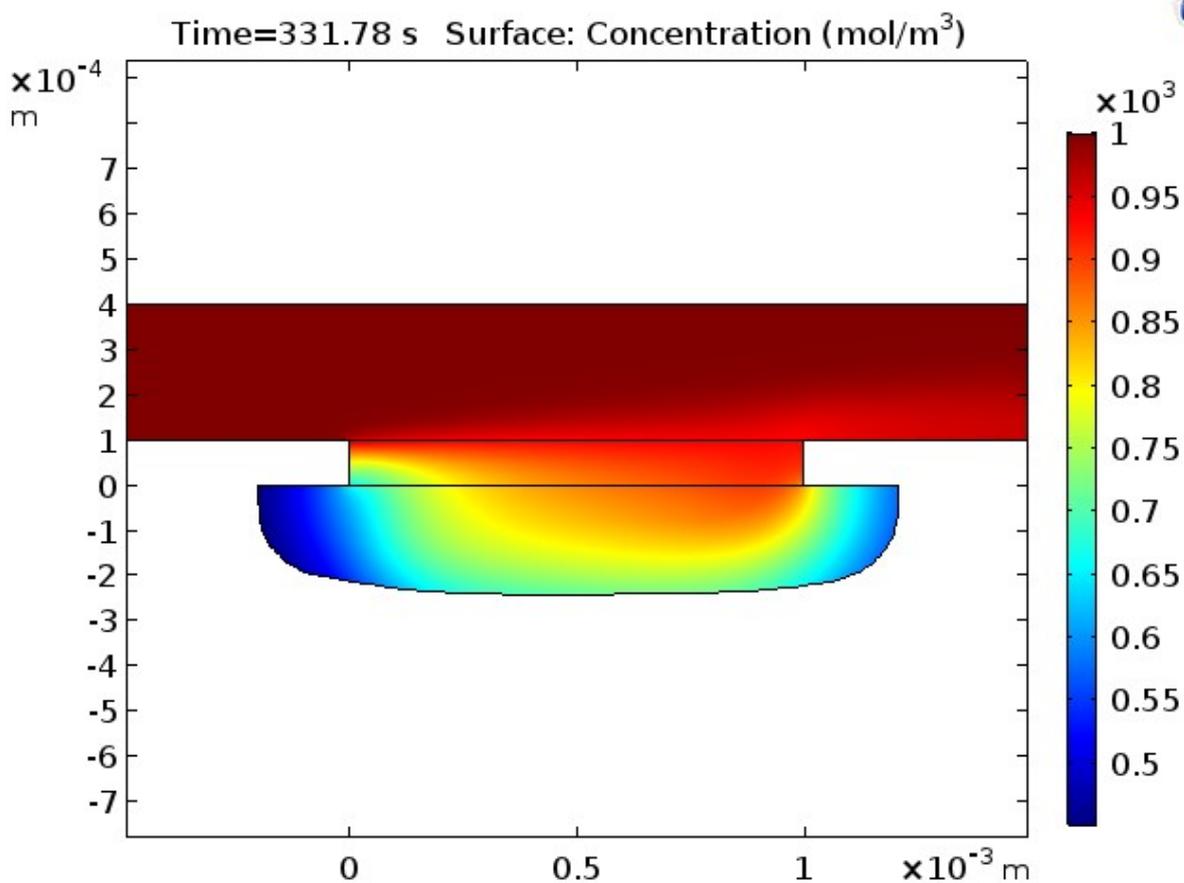


Figure 4.5 : La phase initiale de la gravure.

Figure 4.6 montrent le profil de vitesse pour le flux de l'agent de gravure à $t = 2986s$. La vitesse est nulle près de la limite en mouvement. Le fluide devient plus faible à mesure que le rapport d'aspect de la cavité augmente avec le temps.

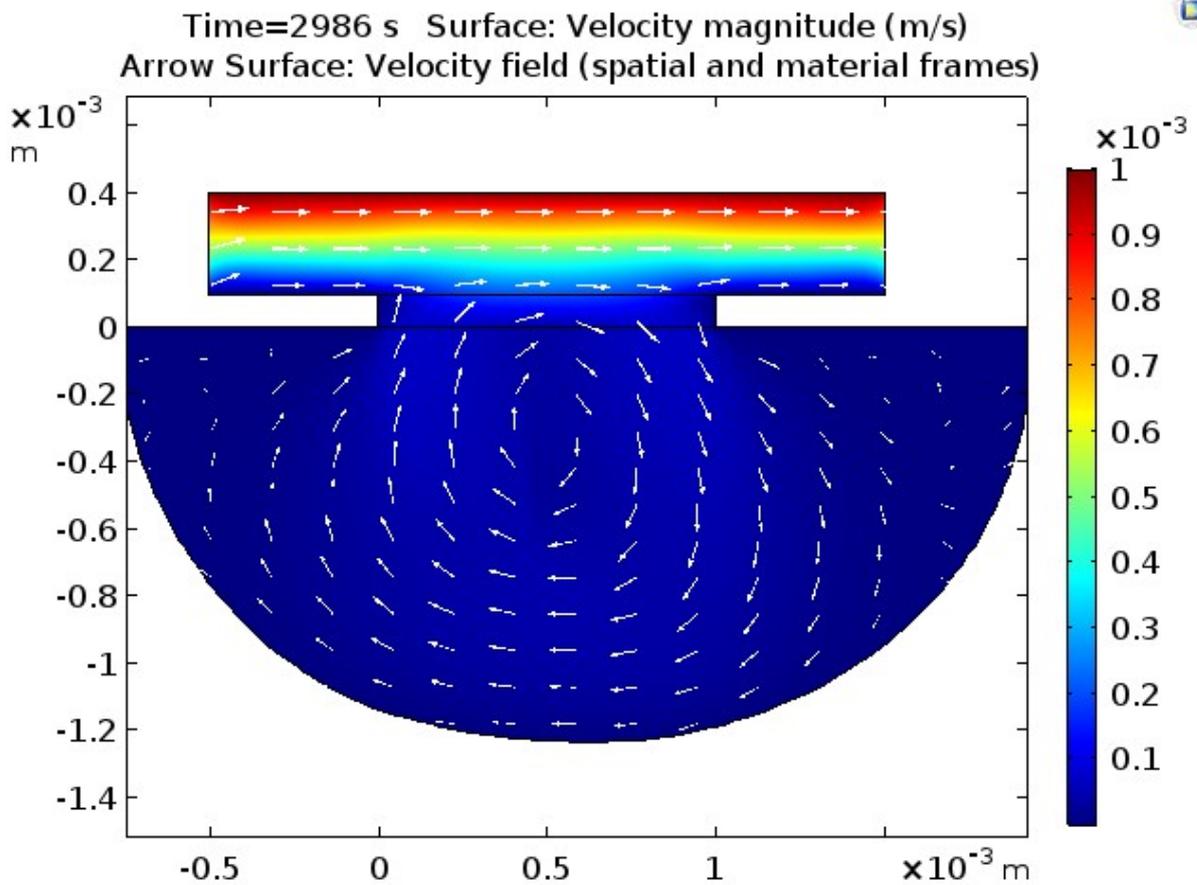


Figure 4.6 : Tracé de la surface de la flèche représentant le profil de vitesse du décapant HF après $t = 2986$ s sur la géométrie déformée de la cavité de silicium.

De plus, au début (la figure 4.7), la gravure est plus rapide à gauche de la ligne médiane et le masque gauche est plus réduit que le masque droit. Cependant, la situation s'inverse plus tard et le taux de gravure et le dégagement du masque sont plus élevés à droite de la ligne médiane. Ces observations sont en outre étayées par la figure 4.6 qui montre la distribution du flux le long des parois de la cavité de gravure. A mesure que le rapport d'aspect de la cavité change pendant la gravure.

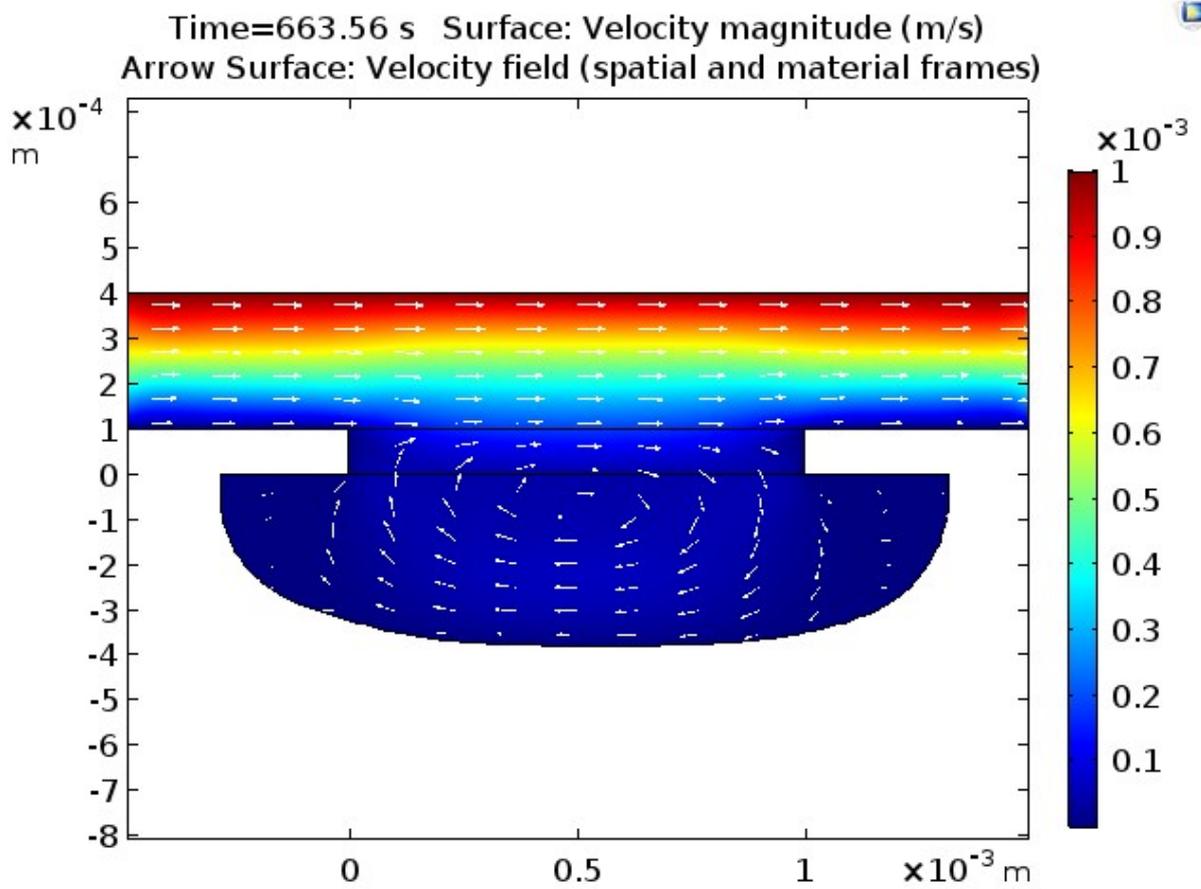


Figure 4.7 : Le profil de vitesse au début de la gravure.

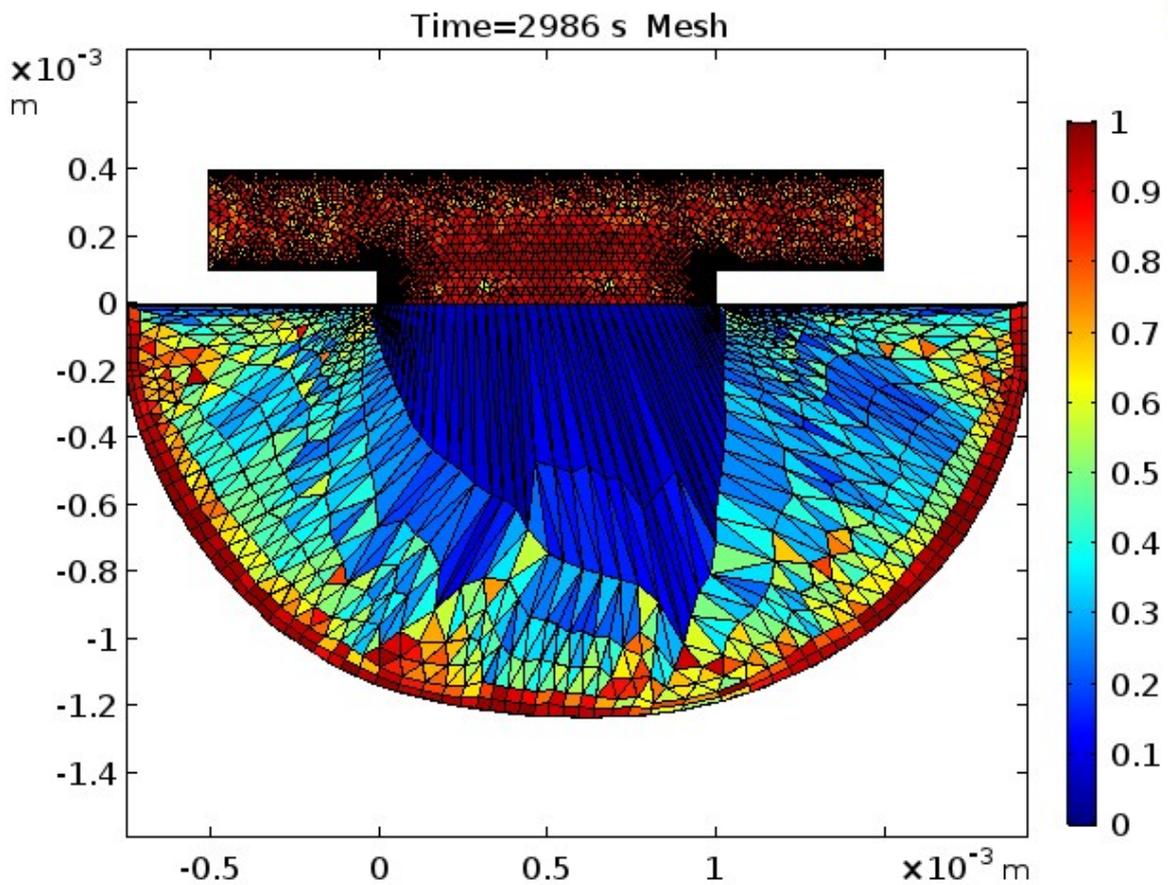


Figure 4.8 : Déformation du maillage après $t = 2986s$ sur la gravure de la cavité de silicium non masquée.

Cette figure montre la déformation du maillage pour déformer la géométrie à $t = 2986s$.

4.3.2 La gravure avec une concentration d'HF (0.61%)

Les paramètres de la viscosité et la densité à différentes températures (les tableaux 4.3 et 4.4 et les figures 4.9 et 4.10).

Tableau 4.3 : la viscosité en fonction de la température.

| Température (k°) | Viscosité |
|------------------|-----------|
| 273,15 | 1,78 |
| 298,15 | 0,89 |

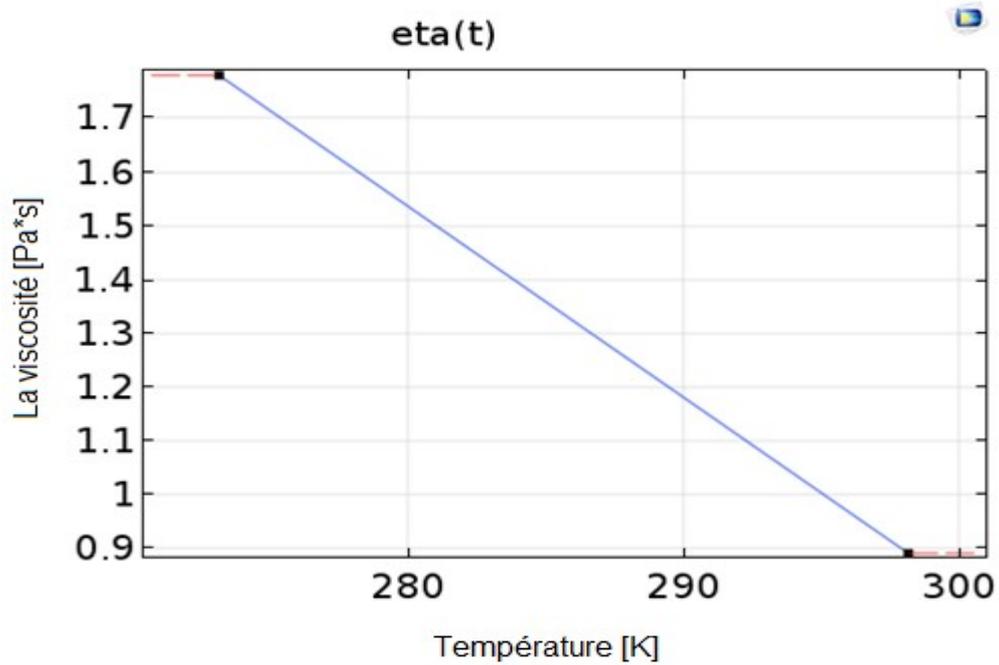


Figure 4.9 : Variation de la viscosité en fonction de la température.

Tableau 4.4 : la densité en fonction de la température.

| Température (k°) | Densité |
|------------------|---------|
| 278,15 | 1,125 |
| 298,15 | 0,95 |

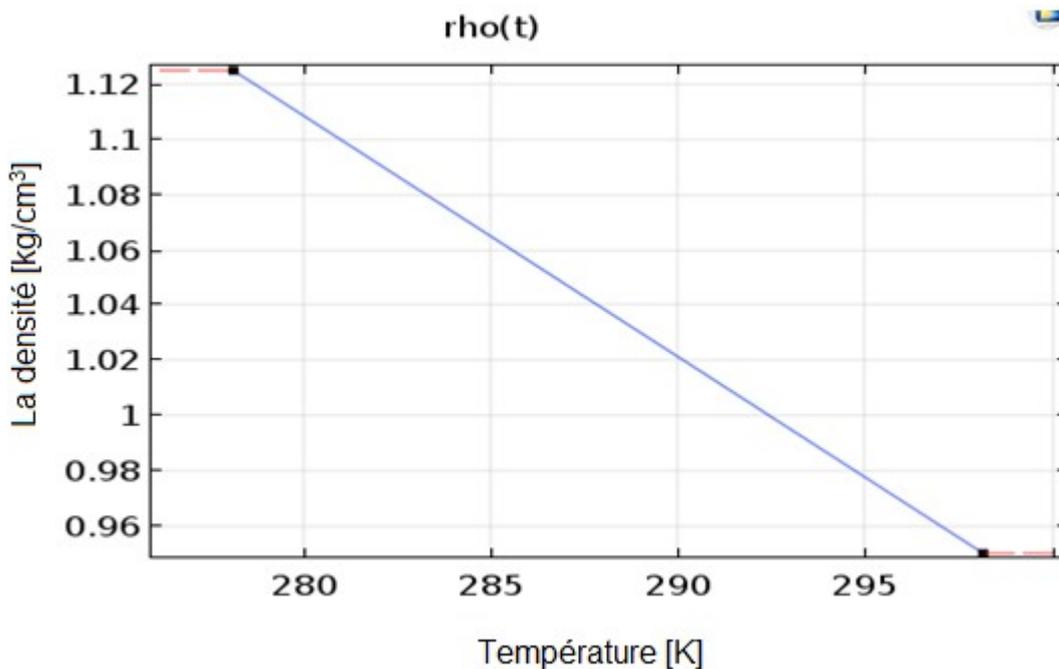


Figure 4.10 : Variation de la densité en fonction de la température.

➤ Résultat

La figure 4.11 montre la concentration de l'agent de gravure HF à $t = 32638s$, pour un rayon de cavité initial de 0.9 mm. Le profil de gravure est symétrique. La vitesse de gravure est plus élevée autour de la zone où le flux laminaire rencontre d'abord la couche limite dans la direction du fluide. La concentration devient plus profonde dans la cavité car l'écoulement laminaire ne peut plus transporter le réactif vers la couche limite en raison de la tolérance.

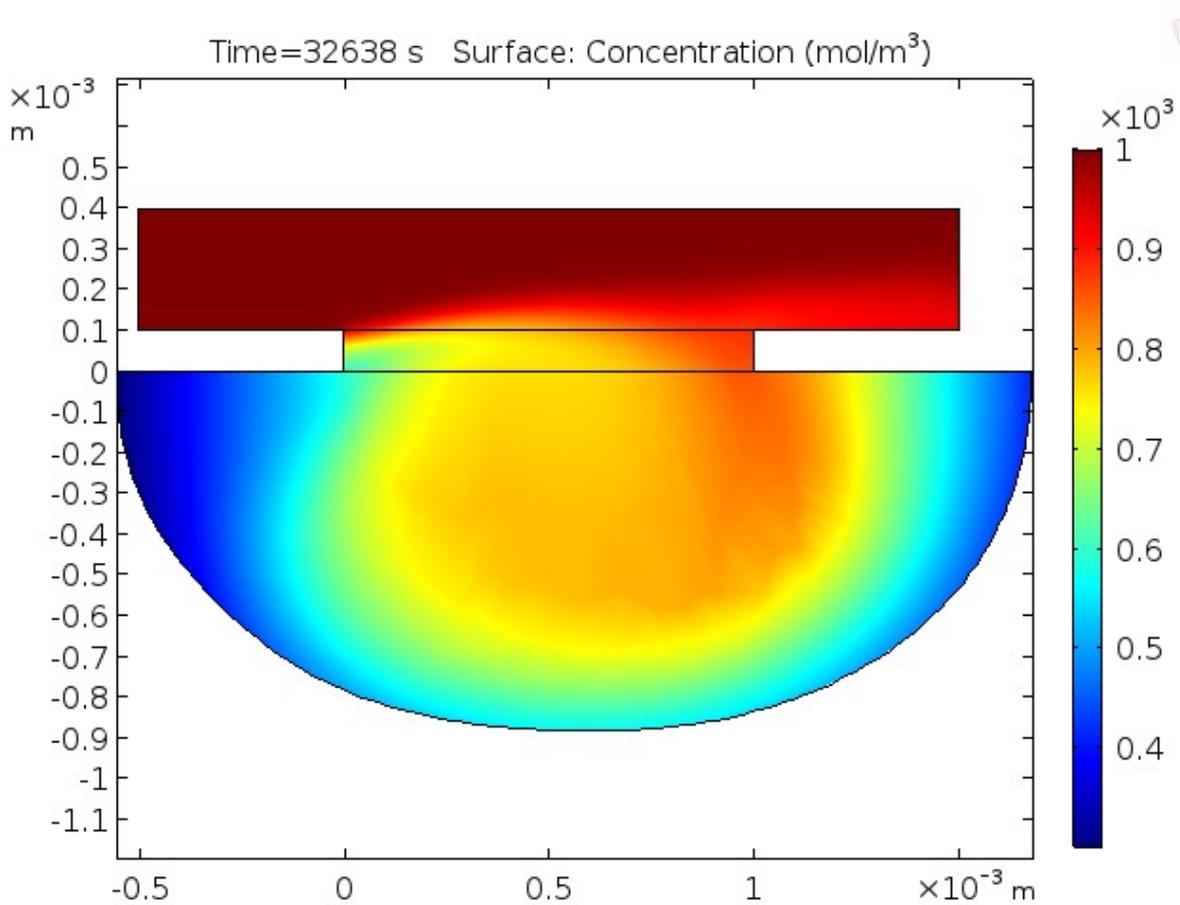


Figure 4.11 : Profil de concentration (0.61%) du décapant HF à $t=32638s$.

La figure 4.12 montre le profil de vitesse pour le flux de décapant à $t=32638s$. La vitesse est nulle près de la limite en mouvement. Le fluide devient plus faible à mesure que le rapport d'aspect de la cavité augmente avec le temps.

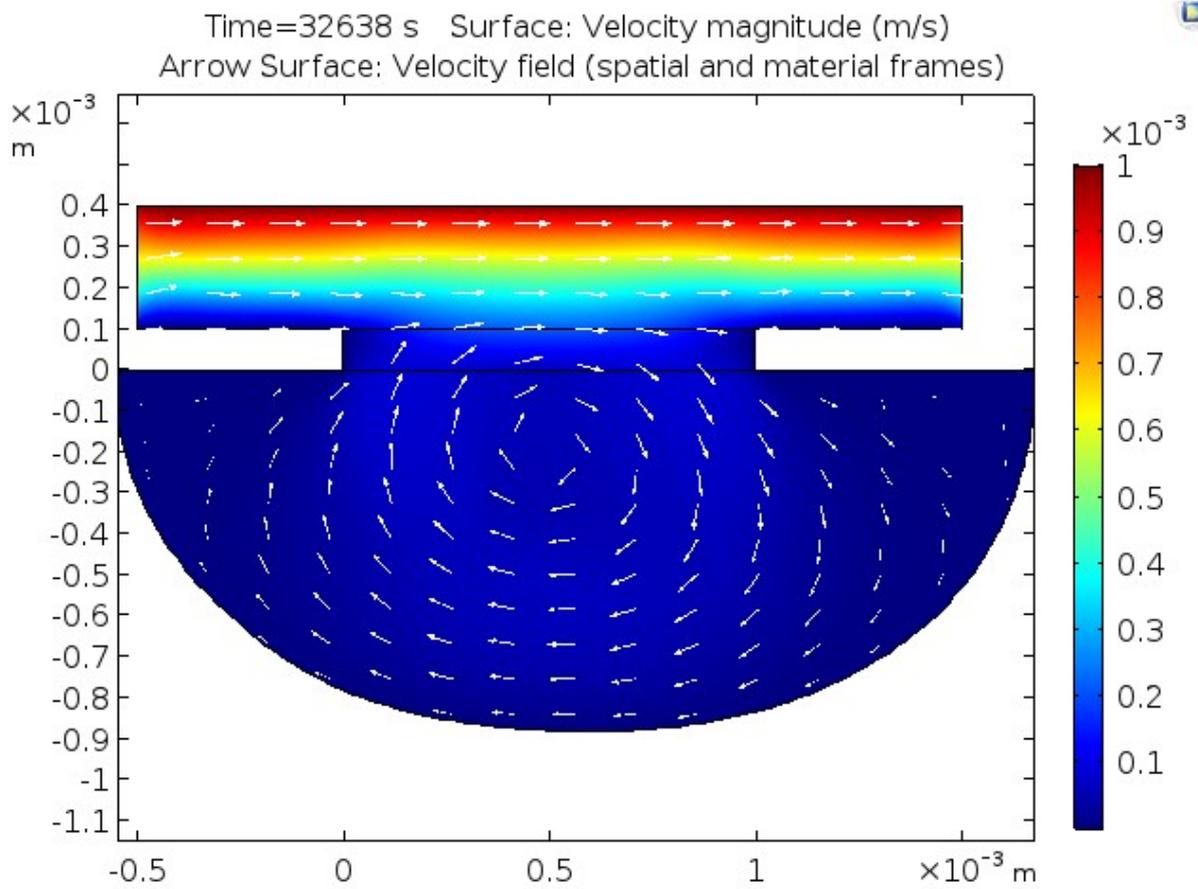


Figure 4.12 : Tracé de la surface de la flèche représentant le profil de vitesse du décapant HF après $t = 32638$ s sur la géométrie déformée de la cavité de silicium.

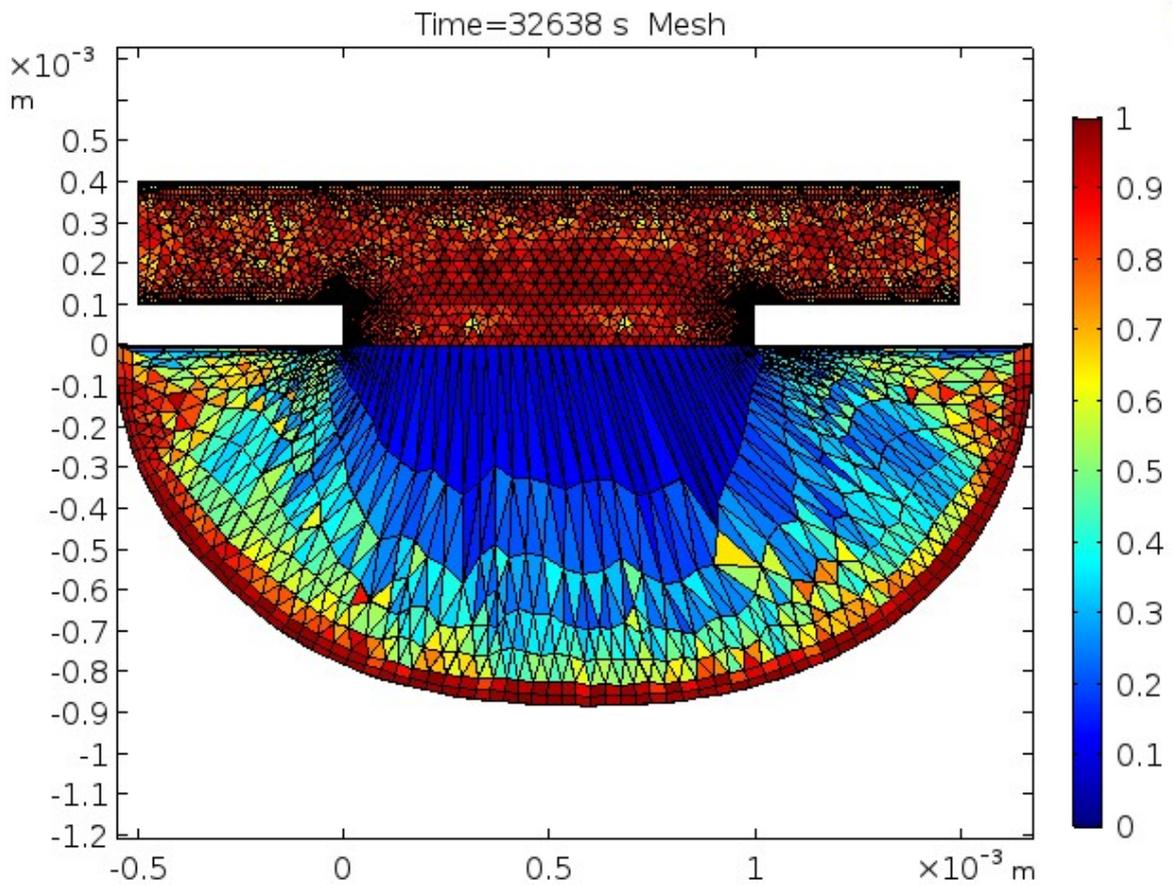


Figure 4.13 : Déformation du maillage après $t = 6519\text{h } 30\text{min } 57\text{s}$ sur la gravure de la cavité de silicium non masquée.

Cette figure montre la déformation du maillage pour déformer la géométrie à $t = 32638\text{s}$.

Notez que plus la concentration de HF est élevée, plus la profondeur de gravure est grande, et moins de temps, ce qui rend difficile le contrôle de la gravure.

4.3.3 Notre modèle en 3D :

Nous avons pris les mêmes données mais en 3D, le résultat est illustré dans la figure 4.10. Notez que le gonflement est clair et proche de la réalité.

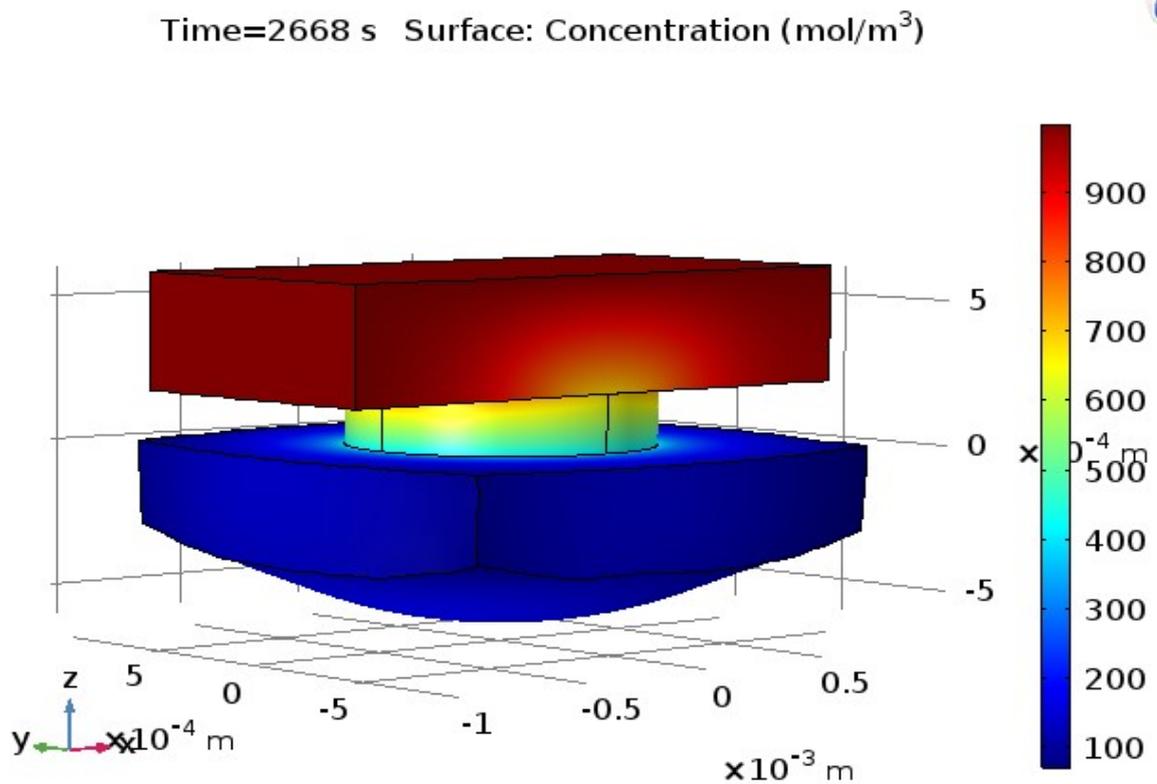


Figure 4.14 : Le modèle de la gravure en 3D.

4.4 La gravure anisotrope (KOH)

Nous avons essayé faire une modèle de gravure anisotropie avec une concentration de 25% du KOH, où nous modifions les dimensions de la géométrie (Tableau 4.5). Nous changeons également la viscosité et la densité de la solution (Tableaux 4.6, 4.7 Figures 4.15, 4.16).

Tableau 4.5 : Les paramètres utilisé dans notre modèle.

| Nom | Expression | Description |
|------------------|---|-----------------------------|
| cSi_bulk | 1[mol/dm ³] | Concentration en masse, cSi |
| Kf | 80[um/min] | Constant de vitesse sens 1 |
| M_Si | 28.0855 [g/mol] | Masse molaire, Si |
| rho_Si | 2.32*10 ³ [kg/m ³] | Densité, Si |
| h_mask | 0.5 [mm] | Hauteur de masque |
| h_seed_cavity | 1.5 [mm] | Hauteur de cavité |
| d_mask | 1.5 [mm] | Longeure de masque |
| h_boundary_layer | 1[mm] +h_seed_cavity | Hauteur de la couche limite |
| D | 1e-9[m ² /s] | Diffusion de réactif |

La figure 4.15 est montrée la géométrie avant la déformation.

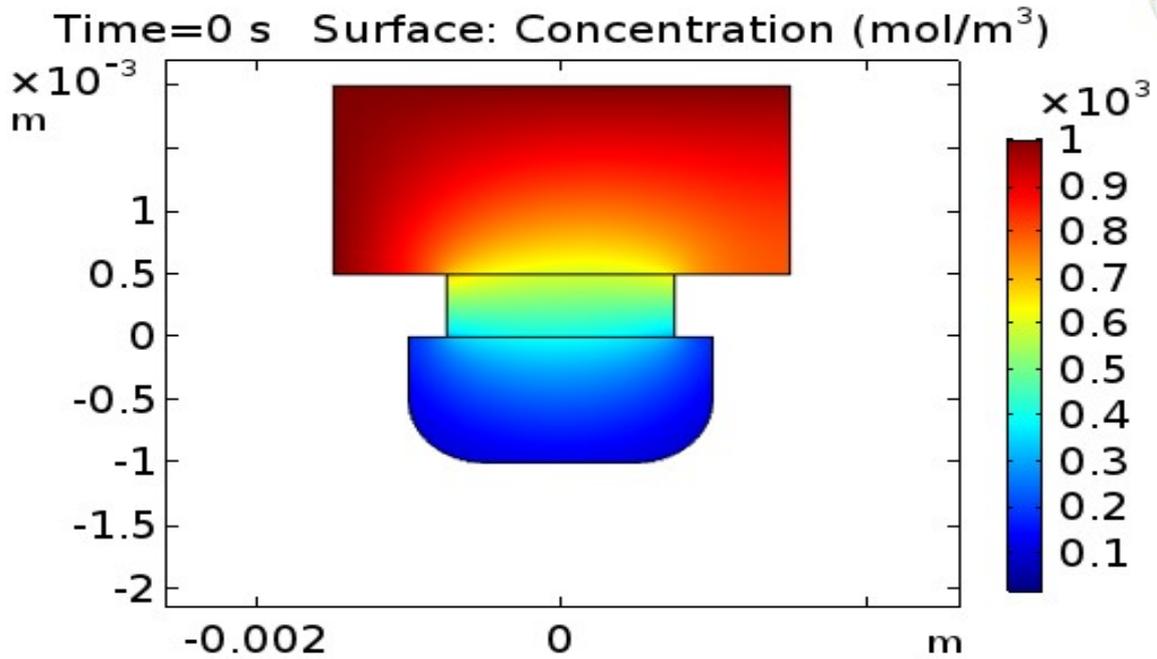


Figure 4.15 : La géométrie avant la déformation.

Ces tableaux et courbes représentent: la viscosité et la densité de KOH.

Tableau 4.6: Variation de la viscosité en fonction de la température.

| Température (k°) | Viscosité |
|------------------|-----------|
| 293.15 | 1.145 |
| 303.15 | 0.9267 |
| 313.15 | 0.76675 |

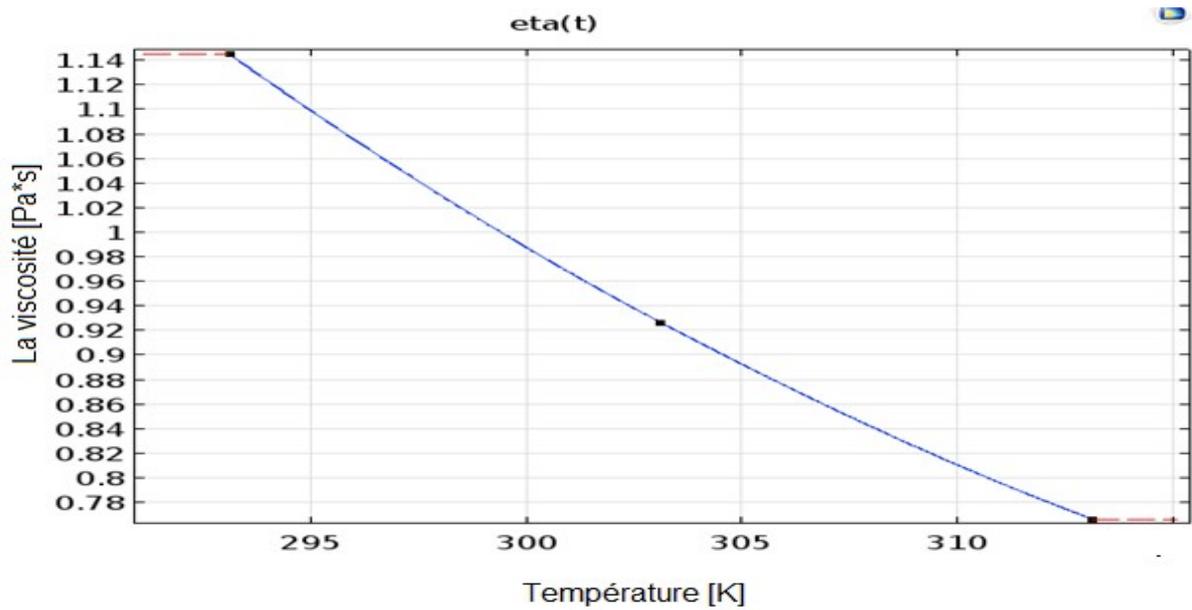


Figure 4.16 : Variation de la viscosité en fonction de la température.

Tableau 4.7: Variation de la densité en fonction de la température.

| Température (k°) | Densité |
|------------------|---------|
| 293.15 | 1.1062 |
| 303.15 | 1.10244 |
| 313.15 | 1.09865 |

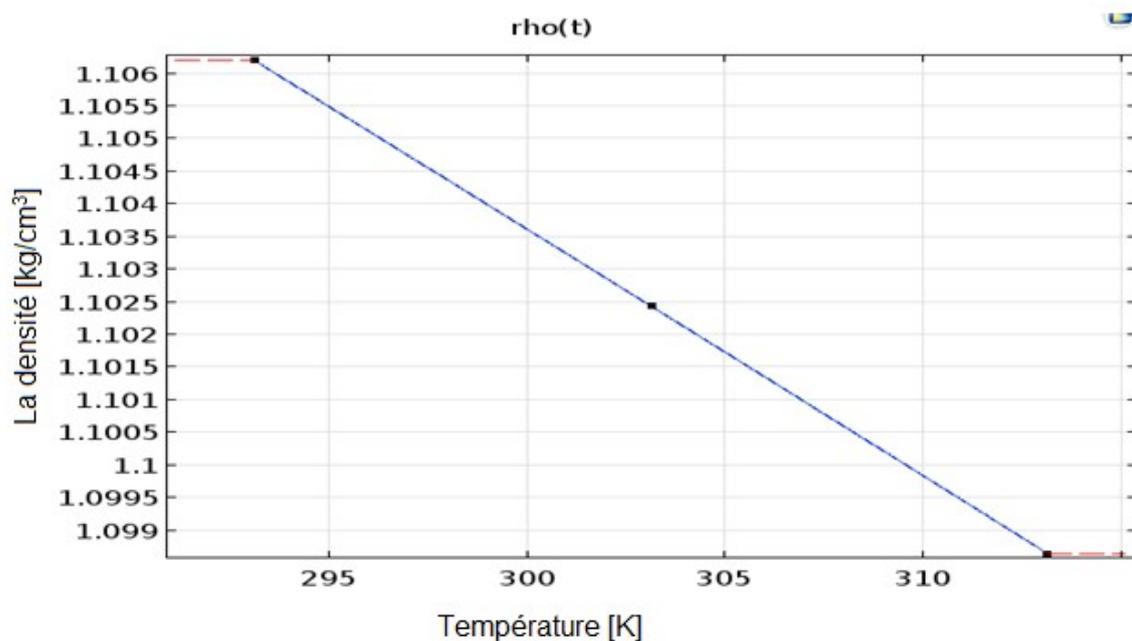


Figure 4.17 : Variation de la densité en fonction de la température.

Dans la figure 4.16 nous remarquons que le motif de l'inscription prend presque la forme du triangle, C'est parce que la vitesse de la gravure de KOH est selon l'orientation cristallographique (le tableau 4.8). Plus le facteur de gravure est élevé, meilleure est l'anisotropie. Pour une gravure anisotrope parfaite, le facteur de gravure tend vers l'infini.

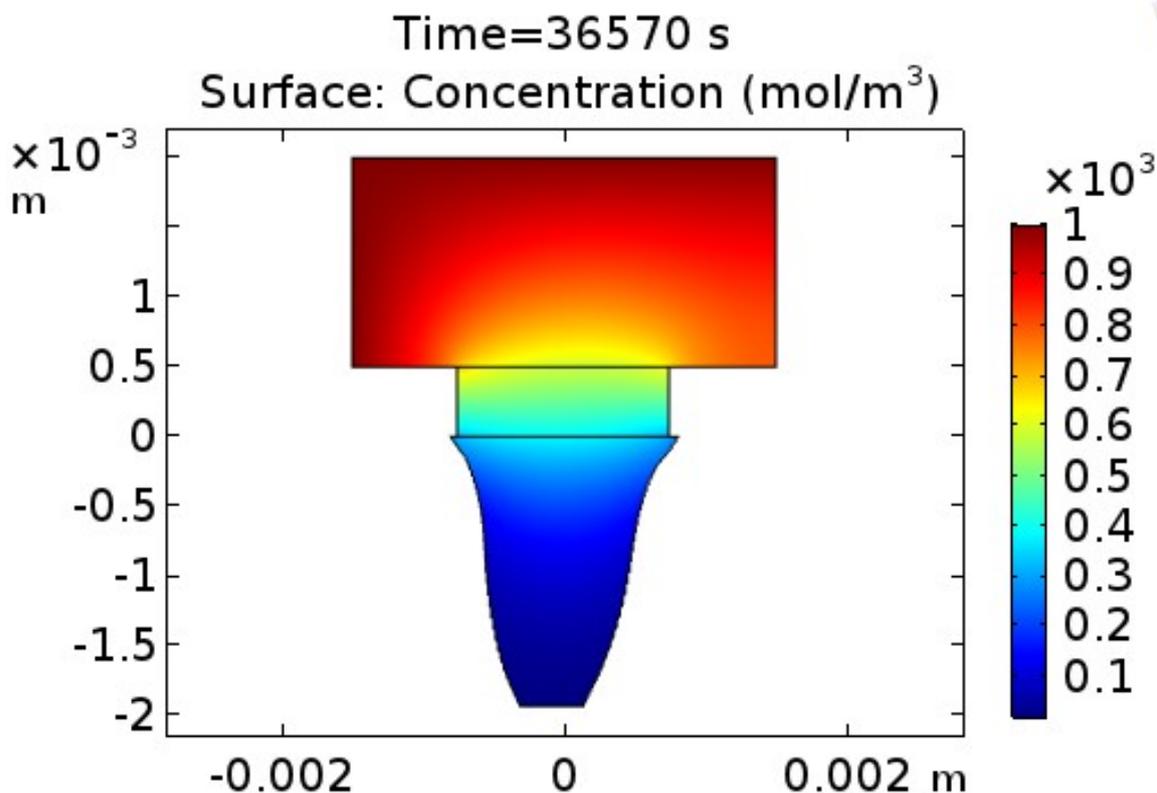


Figure 4.16 : Après la déformation.

Tableau 4.8 : Variation de la vitesse de gravure [(100) (110)] en fonction de la température.

| | La concentration 25% | | |
|------------------------------|----------------------|------|------|
| | 20°C | 30°C | 40°C |
| La vitesse (100) [µm/min] | 1.53 | 3.3 | 6.9 |
| La vitesse (110) [µm/min] | 2.3 | 5 | 10.4 |

En ce qui grave avec KOH, plus la concentration est élevée, plus la vitesse de la gravure est lentement, au contraire, plus la température est élevée, plus la vitesse de gravure est rapide, comme le montrent les figures (4.17,4.18).

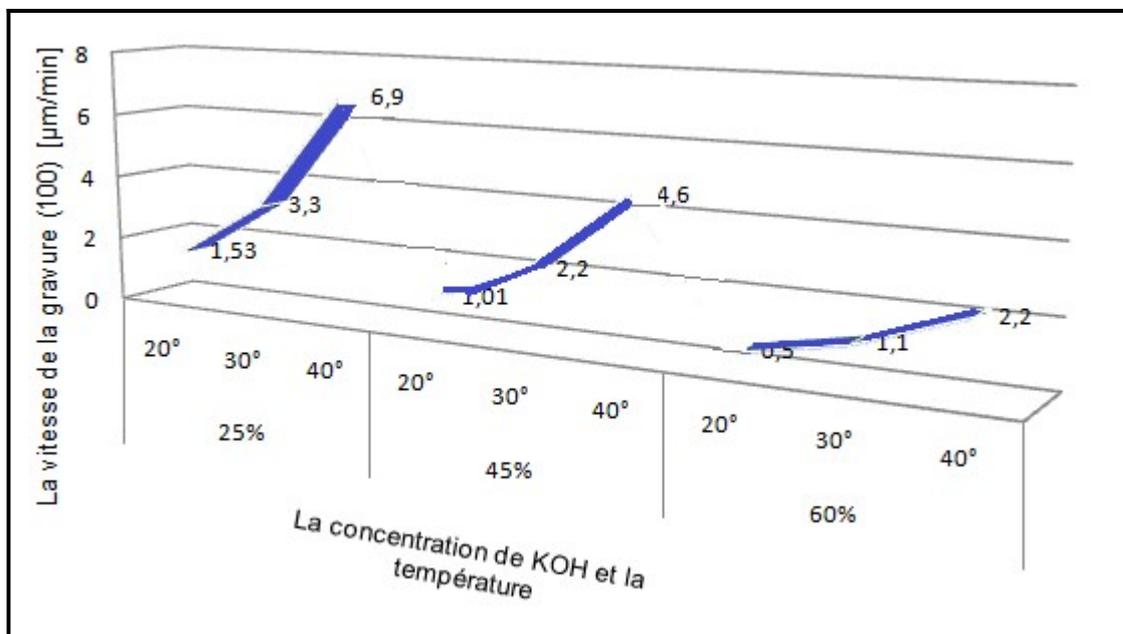


Figure 4.18: La vitesse de la gravure (100) en fonction de la concentration et la température.

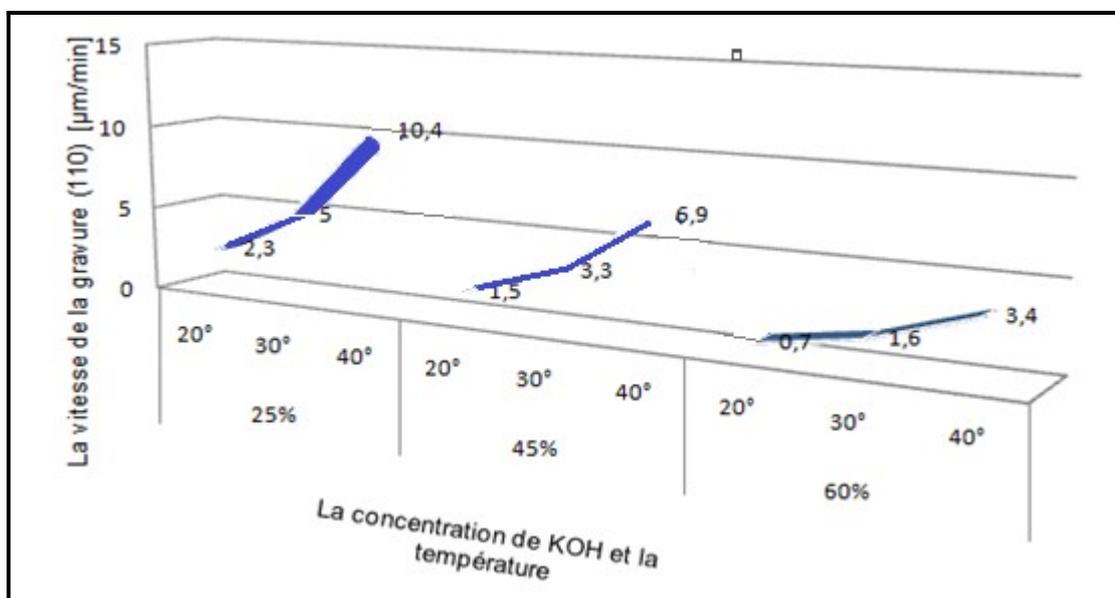


Figure 4.19: La vitesse de la gravure (110) en fonction de la concentration et la température.

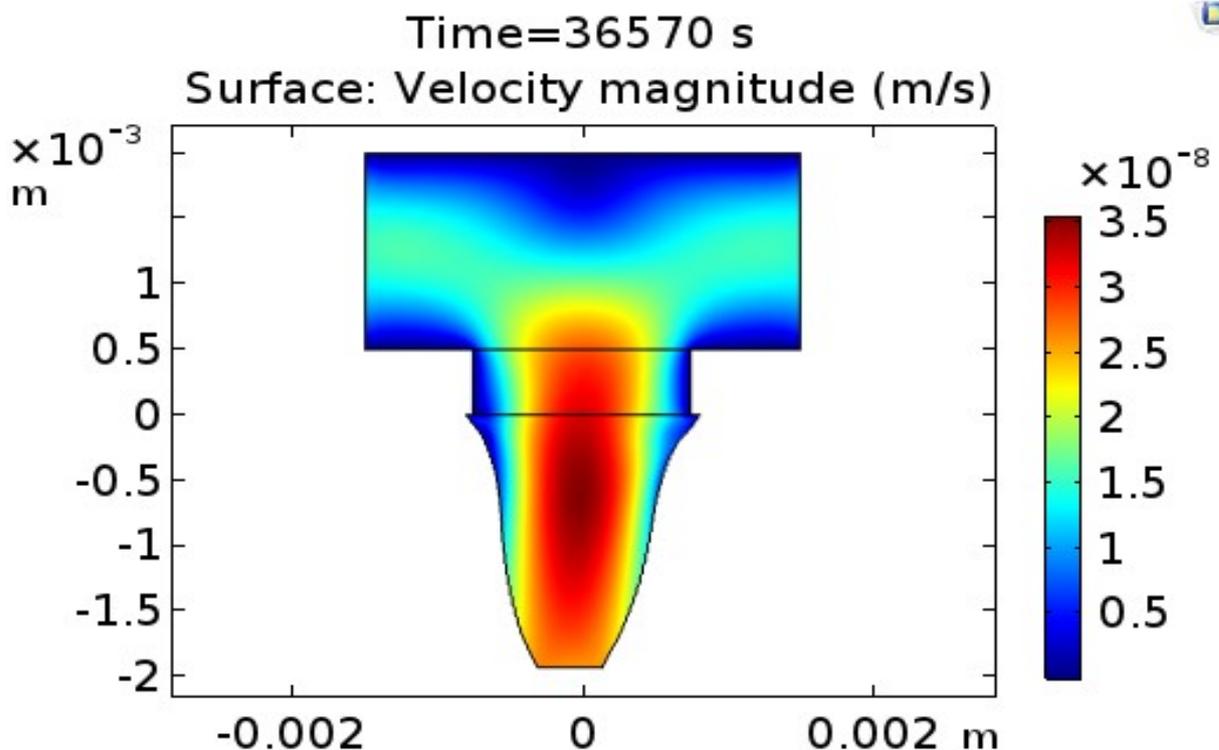


Figure 4.17 : Tracé de la surface de la flèche représentant le profil de vitesse du décapant KOH après $t = 36570$ s sur la géométrie déformée de la cavité de silicium.

Plus le facteur de gravure est élevé, meilleure est l'anisotropie. Pour une gravure anisotrope parfaite, le facteur de gravure tend vers l'infini.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats et la discussion de la gravure chimique humide dans un écoulement forcé.

Dans cette étude on peut remarquer que la profondeur de la gravure isotropie avec HF augmente avec l'augmentation de la concentration.

À mesure que la mise au point augmente, la vitesse augmente, ce qui rend difficile le contrôle de la gravure.

Quant à l'anisotropie nous l'avons essayée, tel modèle peut être utilisé pour comprendre et améliorer le processus de gravure.

Conclusion générale

Ce travail de master consiste à étudier la gravure chimique humide dans un écoulement forcé.

Tout d'abord, nous avons commencé par une étude bibliographique illustrant les technologies de fabrication des microsystèmes qui sont dérivées de celles de fabrication de la micro électronique utilisant les mêmes techniques des générations de masque (la photolithographie, le micro-usinage en volume et le micro-usinage en surface). Cependant, la plus part des parties mécaniques des procédés de fabrication des circuits intégrés à base des MEMS sont fabriquées à l'aide de procédés qui éliminent certaines parties du wafer en ajoutant de nouvelles couches structurales pour former le dispositif mécanique.

En utilisant le logiciel de simulation numérique COMSOL *Multiphysics* basé sur la méthode des éléments finis, pour étudier la gravure chimique humide de silicium. Dans cette gravure nous avons travaillé avec l'acide fluorhydrique et l'hydroxyde de potassium.

Nous avons discuté les résultats qu'on a trouvés après la simulation :

1. Dans la gravure isotrope on a remarqué que le rapport d'aspect de la cavité augmentait pendant la gravure, plus la concentration de HF est élevée et moins de temps, donc difficile le contrôle de la gravure.
2. Dans la gravure anisotrope on a essayé faire le modèle, nous remarquons que le motif de l'inscription prend presque la forme du triangle.

Ce travail devra être poursuivi afin de prendre plus de paramètres réactionnels et être le plus près de la réalité. Ceci permettra de concevoir des dispositifs MEMS plus précisément et avec une bonne répétabilité.

Référence :

- [1] : Flavien Delauche : Optimisation statistique du rendement paramétrique de microsystèmes (MEMS). Thèse de Doctorat, Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc, 2003.
- [2] : Aboubacar Chaehoi : Conception et modélisation de MEMS monolithiques CMOS en technologie FSBM : application aux accéléromètres. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc, 2005.
- [3] : Ben Messaoud Mourad, Conception et Modélisation des MEMS : Application aux Accéléromètres, Université des Sciences et De la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014.
- [4]: S.D.Senturia, "Feynman revisited IEEE, proceeding on microelectromechanical systems". Workshop (MEMS'94), 1994 page(s): 309-312.
- [5]: J-P Della Mussia, "Le marché des MEMS sur une croissance de 16% l'an", Electronique International (n°614) 2005.
- [6] : Mir, Salvador, "Dispositifs et physique des microsystèmes sur silicium". Traité EGEM, Hermès Science Publications (Paris) 2002.
- [7]: Prime Faraday Partnership, An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems), Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, Loughborough (Royaume-Uni), 2002.
- [8]: Lau, J.H, et al, Electronic Packaging: Design, Materials, Process, and Reliability, New York: McGraw-Hill, 1998, pp. 111- 193.
- [9]: Nadim Maluf, Kit Williams, An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering, Artech House, 2004, Boston, London.
- [10]: <https://sfa.asso.fr/fr/activites-gssr/la-section-grand-nord-gno/cr-ecole-mems.pdf>
- [11]: R. Briseno-Rodriguez, P.I. Alcantara-lianas, A.P. Gonzalez-Arceo, M. Bandala-Sanchez, Silicon as a MEMS material, Microelectronic Systems Departement, CIDESI, Mexico, 2015.

- [12]: IHS-MEMS Market Tracker-Q3 2015.
- [13]: J. C. Eloy, Yole Development, 2015.
- [14]: Erwan Fourn, Etude et conception de systèmes de communication adaptatifs à base de MEMS aux longueurs d'ondes millimétriques, Université de Bretagne Occidentale, France, 2004.
- [15]: Mohamed Mehdi Jatlaoui, Capteurs passifs à transduction électromagnétique pour la mesure sans fil de la pression, institut National Polytechnique de Toulouse, France, 20Avril 2009.
- [16]: <http://www.airmems.com/index.php/rf-mems-technologie.html>
- [17]: <http://www.unilim.fr/spcts/Depot-d-oxyde-d-aluminium-par.html>
- [18]: www.nanotech-now.com/.../svidinenko-yuriy.htm
- [19]: news.bbc.co.uk/1/hi/scotland/4192776.stm
- [20]: Hong Liu, Modélisation par éléments finis du contact ohmique de microcommutateurs MEMS, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), France, mai 2013.
- [21]: Mohamed kazem El Khatib, Fonctions de commutation à base de microcommutateurs MEMS RF appliquées à la conception de matrices de commutation, Université de Limoges, France, Juillet 2008.
- [22]: Trai-ran Hsu, ASME Fellow, MEMS and Microsystems Design and Manufacture, San Jose State University, California, USA, 2008.
- [23]: Marc. Madou: Fundamentals of Microfabrication. CRC Press: p 723 774, 1997.
- [24]: Giordano N and J-T. Cheng: Microfluid mechanics: progress and opportunities. Phys. Condens. Matter: p193 Editor IEEE, 2001.
- [25]: Pierre-Alain Auroux ; Darwin R. Reyes and Andreas Manz : Micro total analysis systems. Analytical standard operations and applications. Anal. Chem, 2002.

[26]: Fulcrand R; D. Jugieu; C. Escriba ; A. Bancaud ; D. Bourrier, A. Boukabache ; A.M. Gué : Development of a flexible microfluidic system integrating magnetic microactuators for trapping biological species, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009.

[27]: Abgrall A; S. Low-stress fabrication of 3D polymer free standing structures using lamination of photosensitive films, Microsystems Technologies France, 2008.

[28]: H. C. Nathanson et al: The Resonant Gate Transistor. IEEE Tran, Electron Devices, Vol. 14, no.3, pp117-133, March 1967.

[29]:[https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaireenvironnement/definition/silicium si.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaireenvironnement/definition/silicium%20si.php4).

[30]: M. Sze, « Physics of semiconductors devices », 3rd edition, New-York, wiley, 2007.

[31]: Henri Camon : Contribution à la conception et la réalisation de microsystèmes électrostatiques. Thèse de Doctorat, LAAS/CNRS. p28. 2005

[32]: Zein Juneidi : Outils CAO pour micro système. Thèse de Doctorat, Laboratoire TIMA, Institut National Polytechnique de Grenoble. P68. 2003.

[33]: Olivier Francais: ESIEE Group, SAME 2003–Tutorials MEMS. <http://www.esiee.fr/~francaio>

[34]: [https://www.addlink.es/productos/COMSOL Multiphysics 5.3a.pdf](https://www.addlink.es/productos/COMSOL%20Multiphysics%205.3a.pdf)

[35]: Benoit Charlot, Modélisation de fautes et conception en vue du test structurel des microsystèmes, institut national polytechnique de Grenoble, 2001

[36]: Davies A J, "The finite element method: a first approach", Toronto: Editions Clarendon Press, p. 287, 1980.

[37]: Baker A J et Pepper D W, "Finite elements 1-2-3"*, Montréal ; Éditions McGraw-Hill, p. 341, 1991.

[38]: Marceau D, "Méthode des éléments finis", Cours offert à l'Université du Québec à Chicoutimi, Qc. 2008.

[39]: Nisrine Mhaguen, Développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis, l'Université du Québec à Chicoutimi, Janvier 2011.

[40]: Kesmia Abderrezzak, Etude de l'effet photoacoustique dans les semiconducteurs composés de deux couches, université Ferhat Abbas-Sétif, Algérie, 2012.