

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA  
جامعة باجي مختار عنابة



FACULTY OF TECHNOLOGY

Département de Génie Mécanique



## MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master:

**DOMAINE** : Sciences et Technologies

**FILIERE** : Génie Mécanique

**OPTION** : Construction Mécanique

Sur le thème :

**ETUDE ET SIMULATION D'UN MICRO-ACTIONNEUR  
ELECTROTHERMIQUE MEMS EN ALLIAGE FeNbAs  
PROPOSE POUR REMPLACER LE POLY-SILICIUM**

Présenté par :

BELKHIRI AKRAM

Soutenu le 20/06/2022

Devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	Dr. BENAMIRA MOHAMED	MCB Université d'Annaba
<b>Encadreur :</b>	Dr. BOURICHA AMOR	MCB Université d'Annaba
<b>Co- encadreur :</b>	Dr. KADRI SALIM	MAA Université d'Annaba
<b>Expert :</b>	Pr. BEY KAMEL	Pr. Université d'Annaba
<b>Expert :</b>	Dr. MENAIL YOUNES	MCA Université d'Annaba

N° d'ordre:.....

Année universitaire:2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# Dédicaces

*À ma mère et mon père*

*À mon frère Islam et ma sœur Zeinab*

*À mes amies,*

*Ayes, Hiba, Teja, Linou et Oumaima*

*À ma famille et mes collègues*

*À tous ceux et toutes celles qui m'ont  
accompagné et soutenu durant*

*cette année.*

*Remerciement*

## Table des matières:

<b>Nomenclature :</b> .....	11
<b>Problématique :</b> .....	12
<b>Résumé:</b> .....	12
<b>ملخص:</b> .....	13
<b>ABSTRACT:</b> .....	13
<b>INTRODUCTION GENERALE:</b> .....	15
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MEMS.....</b>	<b>18</b>
<b>Introduction :</b> .....	18
<b>I.1. Etat de l'art :</b> .....	18
<b>I.2. Historique :</b> .....	19
<b>I.3. Définition :</b> .....	20
<b>I.4. Les dimensions:</b> .....	22
<b>I.5. La Miniaturisation des Microsystèmes:</b> .....	23
<b>I.6. Pourquoi la miniaturisation :</b> .....	24
<b>I.7. Dispositif microsysteme:</b> .....	25
<b>I.8. Composants clés MEMS:</b> .....	25
<b>I.9. Classification des microsystèmes :</b> .....	27
<b>I.10. Familles des MEMS :</b> .....	27
<b>I.11. Domaine d'application des microsystèmes:</b> .....	28
<b>I.11.1. MEMS pour dispositif mobile :</b> .....	30
<b>I.11.2. MEMS pour automobile :</b> .....	30
<b>I.11.3. MEMS pour l'imprimerie:</b> .....	31
<b>I.12. Applications typiques:</b> .....	32
<b>I.12.1. Capteur :</b> .....	32
<b>I.12.2. Microsystèmes biocompatibles (Bio-MEMS):</b> .....	34
<b>I.12.3. Microsystèmes optiques (MOEMS):</b> .....	36
<b>I.12.4. Microsystèmes Radiofréquence (RF-MEMS):</b> .....	36
<b>I.13. Fabrication des Micro systèmes:</b> .....	39
<b>I.13.1. Les principales procédures de fabrication de MEMS:</b> .....	39
<b>I.13.2. Les processus de fabrication spécifiques aux MEMS:</b> .....	42
<b>I.13.3. D'autres procédés:</b> .....	44
<b>Conclusion :</b> .....	45

<b>CHAPITRE II: LES MICROS-ACTIONNEURS .....</b>	<b>47</b>
<b>Introduction :.....</b>	<b>47</b>
<b>II.1. Les Micro-actionneur :.....</b>	<b>47</b>
<b>II.2. Le rôle d'un actionneur : .....</b>	<b>48</b>
<b>II.2.1. Représentation schématique d'un actionneur:.....</b>	<b>48</b>
<b>II.2.2. Exemples d'actionneurs : .....</b>	<b>49</b>
<b>II.3. Les différents types d'actionnements: .....</b>	<b>49</b>
<b>II.3.1. Actionnement magnétique: .....</b>	<b>50</b>
<b>II.3.2. Actionnement magnétostrictif:.....</b>	<b>52</b>
<b>II.3.3. Activation Piézoélectrique: .....</b>	<b>52</b>
<b>II.3.4. Actionnement électrostatique: .....</b>	<b>53</b>
<b>II.3.5. Actionnement thermique :.....</b>	<b>55</b>
<b>Conclusion:.....</b>	<b>60</b>
<b>CHAPITRE III : MATERIAUX DE BASE POUR LA FABRICATION DE MEMS.....</b>	<b>62</b>
<b>Introduction :.....</b>	<b>62</b>
<b>III.1. Matériaux utilisés en microsystèmes compatibles avec les circuits intégrés : .</b>	<b>62</b>
<b>III.1.1. Silicium : .....</b>	<b>62</b>
<b>III.1.2. Polymères : .....</b>	<b>63</b>
<b>III.1.3. Céramiques : .....</b>	<b>64</b>
<b>III.1.4. Métal :.....</b>	<b>64</b>
<b>III.2. Le Silicium et ses caractéristiques : .....</b>	<b>64</b>
<b>III.3. Généralités sur les half -Heusler : .....</b>	<b>65</b>
<b>III.3.1. Alliages Heusler : .....</b>	<b>65</b>
<b>III.3.2. Alliages Heusler inverses : .....</b>	<b>66</b>
<b>III.3.3. Alliages Heusler quaternaires :.....</b>	<b>66</b>
<b>III.3.4. Alliages Full-Heusler :.....</b>	<b>67</b>
<b>III.3.5. Alliages Semi Heusler : .....</b>	<b>67</b>
<b>III.3.6. Structure cristalline : .....</b>	<b>67</b>
<b>III.3.7. Les applications : .....</b>	<b>68</b>
<b>Conclusion :.....</b>	<b>70</b>
<b>CHAPITRE IV: SIMULATION DE MICRO-ACTIONNEUR ELECTROTHERMIQUE.....</b>	<b>72</b>
<b>Introduction :.....</b>	<b>72</b>
<b>IV.1. Définition du modèle : .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.2. Données matérielles .....</b>	<b>75</b>
<b>IV.3. Conditions aux limites et contraintes.....</b>	<b>75</b>

<b>IV.4. Modélisation dans ANSYS:</b> .....	77
<b>IV.4.1. Mise en route :</b> .....	77
<b>IV.4.2. Définition de la géométrie :</b> .....	78
<b>IV.4.3. Définition des types d'éléments finis :</b> .....	79
<b>IV.4.4. Configuration des propriétés des matériaux :</b> .....	82
<b>IV.4.5. Maillage :</b> .....	84
<b>IV.4.6. Mise en place des conditions aux limites :</b> .....	86
<b>IV.4.7. Choisir une méthode d'analyse :</b> .....	93
<b>IV.4.8. Analyse en cours :</b> .....	93
<b>IV.4.9. Affichage des résultats de la simulation :</b> .....	94
<b>IV.5. Résultats :</b> .....	97
<b>IV.5.1. Discussion :</b> .....	100
<b>Conclusion:</b> .....	101
<b>Conclusion générale:</b> .....	103
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:</b> .....	104

## Liste des figures:

<b>FIGURE I.1: CONCEPTION DU CONDENSEUR DE TESLA AVEC PLAQUES INTERDIGITALES.</b> .....	18
<b>FIGURE I.2 : UN EXEMPLE DE CONCEPTION MODERNE DE CAPTEUR – TRANSDUCTEUR.</b> .....	19
<b>FIGURE I.3:TRANSISTOR MOS A GRILLE RESONANTE.</b> .....	20
<b>FIGURE I.4: MEMS ET SON ENVIRONNEMENT</b> .....	20
<b>FIGURE I.5: DEFINITION DE LA NOTION DE MEMS / MICROSYSTEMES.</b> .....	21
<b>FIGURE I.6: LES COMPOSANTS DE MEMS</b> .....	22
<b>FIGURE I.7: ORDRE DE GRANDEUR</b> .....	22
<b>FIGURE I.8:UN MICROSCOPE ELECTRONIQUE MONTRE LA STRUCTURE DE SILICIUM FINEMENT GRAVEE D'UN CAPTEUR D'ACCELERATION BOSCH</b> .....	23
<b>FIGURE I.9: MEMS MICROPHONES.</b> .....	23
<b>FIGURE I.10: ENGRENAGE CONIQUE FABRIQUE EN <math>\mu</math>SL</b> .....	23
<b>FIGURE I.11: L'ACCELEROMETRE (AIRBAG) TECHNOLOGIE ISSUE DES C.I.</b> .....	24
<b>FIGURE I.12: BASE DE CONCEPTION DES MICROSYSTEMES</b> .....	25
<b>FIGURE I.13: SCHEMA DE PRINCIPE D'UN MEMS.</b> .....	25
<b>FIGURE I.14: REPRESENTATION MODULAIRE D'UN CAPTEUR.</b> .....	26
<b>FIGURE I.15 : PRINCIPE D'UN CAPTEUR.</b> .....	26
<b>FIGURE I.16: DEFINITION DE MICROSYSTEME (MEMS)</b> .....	27
<b>FIGURE I.17: LES DOMAINES D'APPLICATION DES MEMS.</b> .....	28
<b>FIGURE I.18: MEMS DISPOSITIF PORTABLE</b> .....	30
<b>FIGURE I.19: EXEMPLES DE CAPTEURS DANS LES VOITURES</b> .....	30
<b>FIGURE I.20: IMPRIMANTE A JET D'ENCRE.</b> .....	31

<b>FIGURE I.21:</b> PROCESSUS D'IMPRESSON A JET D'ENCRE .....	31
<b>FIGURE I.22:</b> APPLICATIONS TYPIQUES DES MEMS .....	32
<b>FIGURE I.23:</b> LES DEUX PEIGNENT D'ACCELEROMETRE .....	32
<b>FIGURE I.24:</b> ACCELEROMETRE CAPACITIF EN PEIGNE .....	33
<b>FIGURE I.25:</b> CAPTEUR D'HUMIDITE .....	33
<b>FIGURE I.26:</b> PUCE A ADN.....	34
<b>FIGURE I.27:</b> GENERATEUR DE GRADIENT DEVELOPPE AU LABORATOIRE SATIE DE L'ENS .....	34
<b>FIGURE I.28:</b> EXEMPLE DE BIOMEMS .....	35
<b>FIGURE I.29:</b> ENVIRONNEMENT BIOMEDICAL (DISTRIBUTEUR D'INSULINE, BIOPUCE A ADN, MICROPOMPE). .....	35
<b>FIGURE I.30:</b> APPLICATIONS A LA PROJECTION D'IMAGES VIDEO : LES SYSTEMES DMD DE TEXAS INSTRUMENT ET GLV .....	36
<b>FIGURE I.31:</b> LES MEMS-RF .....	37
<b>FIGURE I.32:</b> LA STIMULATION CEREBRALE PROFONDE .....	38
<b>FIGURE I.33:</b> STRUCTURATION DE RESINES PHOTOSENSIBLES NEGATIVE OU POSITIVE PAR PHOTOLITHOGRAPHIE. A) DEPOT DE LA RESINE A LA TOURNETTE. B) INSOLATION DE LA RESINE AU TRAVERS D'UN PHOTO-MASQUE. C) GRAVURE HUMIDE DE LA RESINE. ....	40
<b>FIGURE I.34:</b> PRINCIPE DE GRAVURE PAR PLASMA. ....	41
<b>FIGURE I.35:</b> MICRO-USINAGE DE SURFACE .....	42
<b>FIGURE I.36:</b> EXEMPLE DE SCHEMA EN COUPE D'UNE TECHNOLOGIE MEMS INTEGRES .....	43
<b>FIGURE I.37:</b> EXEMPLE DE SCHEMA EN COUPE D'UNE TECHNOLOGIE CMOS COMPATIBLE .....	44
<b>FIGURE I.38:</b> EXEMPLE DE STRUCTURE MICRO USINEE PAR GRAVURE EN VOLUME .....	44
<b>FIGURE I.39:</b> TECHNOLOGIE LIGA.....	45
<b>FIGURE II.1:</b> EXEMPLE D'UN RESEAU DE ACTIONNEURS ELECTROTHERMIQUES.....	48
<b>FIGURE II.2:</b> REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN ACTIONNEUR. ....	48
<b>FIGURE II.3 :</b> TYPES D'ACTIONNEUR.....	49
<b>FIGURE II.4:</b> MICRO POMPE A UN ACTIONNEUR ELECTROMAGNETIQUE.....	50
<b>FIGURE II.5:</b> PRINCIPE DE L'ACTIONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE.....	51
<b>FIGURE II.6:</b> PRINCIPE DE L'ACTIONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE.....	51
<b>FIGURE II.7:</b> SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UN ACTIONNEUR PIEZOELECTRIQUE DE TYPE BILAME.....	52
<b>FIGURE II.8:</b> FONCTIONNEMENT D'UNE MICRO POMPE A ACTIONNEUR ELECTRIQUE. ....	53
<b>FIGURE II.9:</b> SCHEMA ILLUSTRANT LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ACTIONNEUR ELECTROSTATIQUE. ....	54
<b>FIGURE II.10:</b> PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE MEMS – RF. ....	54
<b>FIGURE II.11:</b> SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE DIFFERENTS ACTIONNEURS THERMIQUES DANS LE PLAN .....	55
<b>FIGURE II.12:</b> SCHEMA D'UN ACTIONNEUR THERMIQUE SE DEFORMANT DANS LE PLAN PAR UNE DIFFERENCE DE MATERIAU DES DEUX BRAS. ....	56
<b>FIGURE II.13 :</b> DEFORMATION D'UN BILAME THERMIQUE SI/AL .....	56
<b>FIGURE II.14:</b> SCHEMAS DES ACTIONNEURS THERMIQUES ABSOLUS ET DIFFERENTIELS. ....	57
<b>FIGURE II.15:</b> MICROACTIONNEUR THERMIQUE A POUTRES COURBEES ENTRAINEES ELECTRIQUEMENT SOUS LE MICROSCOPE.....	57
<b>FIGURE II.16:</b> MICRO-ACTIONNEUR THERMOMECHANIQUE .....	58
<b>FIGURE II.17:</b> MICRO-RELAIS A ACTIONNEMENT ELECTROTHERMIQUE ET DEPLACEMENT HORS PLAN .....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
<b>FIGURE II.18:</b> MICRO-RELAIS A ACTIONNEMENT ELECTROTHERMIQUE ET DEPLACEMENT DANS LE PLAN .....	59
<b>FIGURE III.1:</b> RESEAU CRISTALLIN DU SILICIUM. ....	63



<b>FIGURE III.2:</b> TABLEAU PERIODIQUE DES ELEMENTS. LE GRAND NOMBRE DE MATERIAUX HEUSLER PEUT ETRE FORME PAR LA COMBINAISON DES DIFFERENTS ELEMENTS SELON LE SCHEMA DE COULEURS. ....	65
<b>FIGURE III.3:</b> REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTES STRUCTURES DES COMPOSES HEUSLER. ....	66
<b>FIGURE III.4:</b> STRUCTURE CRISTALLINE DE HALF HEUSLER ALLIAGE XYZ (A) ET DE FULL HEUSLER ALLIAGE X <sub>2</sub> YZ (B) . ....	67
<b>FIGURE III.5:</b> (A) LA STRUCTURE ROCK SALT, (B) LA STRUCTURE ZINC BLENDE ET LEURS RELATIONS AVEC LA STRUCTURE SEMI-HEUSLER (C).....	68
<b>FIGURE III.6:</b> DIFFERENTS TYPE D'OCCUPATIONS DES SITES NON EQUIVALENTS DANS LA STRUCTURE DE TYPE C1B. ....	68
<b>FIGURE IV.1:</b> A) UN GROUPE D'ACTIONNEURS ELECTROTHERMIQUES B) ACTIONNEUR ELECTROTHERMIQUE.....	72
<b>FIGURE IV.2:</b> LE MICRO ACTIONNEUR THERMIQUE. ....	73
<b>FIGURE IV.3:</b> CONDITIONS ELECTRIQUES AUX LIMITES. ....	75
<b>FIGURE IV.4:</b> CONDITIONS DE TRANSFERT DE CHALEUR AUX LIMITES.....	76
<b>FIGURE IV.5:</b> CONDITIONS ET CONTRAINTES STRUCTURELLES AUX LIMITES.....	77
<b>FIGURE IV.6:</b> PREFERENCES POUR LA FENETRE DE DIALOGUE DE FILTRAGE DE L'INTERFACE GRAPHIQUE.....	78
<b>FIGURE IV.7:</b> ETAPES POUR INSERER FICHIER PARASOLIDE.....	78
<b>FIGURE IV.8:</b> FENETRE ANSYS CONNEXION POUR PARASOLID. ....	79
<b>FIGURE IV.9:</b> MODELE 3D DE L'ACTIONNEUR. ....	79
<b>FIGURE IV.10:</b> CHEMIN DU MENU POUR APPELER LE CHOIX DU TYPE D'ELEMENT. ....	80
<b>FIGURE IV.11:</b> AJOUTER UN ELEMENT.....	80
<b>FIGURE IV.12:</b> BIBLIOTHEQUE DE TYPES D'ELEMENTS FINIS.....	81
<b>FIGURE IV.13:</b> PARAMETRAGE DES PROPRIETES DE L'ELEMENT SELECTIONNE.....	81
<b>FIGURE IV.14:</b> CHEMIN DU MENU POUR DEFINIR LES PROPRIETES DU MATERIAU.....	83
<b>FIGURE IV.15:</b> DEFINITION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES MATERIAUX. .	83
<b>FIGURE IV.16:</b> MODULE DE YOUNG <b>EX</b> ET LE COEFFICIENT DE POISSON <b>PRXY</b> .....	83
<b>FIGURE IV.17:</b> LISTE DES PARAMETRES DEFINIS.....	84
<b>FIGURE IV.18:</b> CHEMIN DE MENU POUR INVOQUER LES OPERATIONS DE MAILLAGE.....	84
<b>FIGURE IV.19:</b> FENETRE DE DIALOGUE OUTIL DE MAILLAGE. ....	85
<b>FIGURE IV.20:</b> BOITE DE DIALOGUE VOLUMES DE MAILLAGE.....	85
<b>FIGURE IV.21:</b> RESULTAT DE MAILLAGE. ....	86
<b>FIGURE IV.22:</b> CHEMIN DE MENU POUR APPELER LES OPERATIONS DE DEFINITION DES CHARGES. ....	87
<b>FIGURE IV.23:</b> SELECTION DES SURFACES POUR L'APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (DEPLACEMENT). ....	87
<b>FIGURE IV.24:</b> APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (DEPLACEMENT).....	88
<b>FIGURE IV.25:</b> SELECTION DES SURFACES POUR L'APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (DEPLACEMENT). ....	88
<b>FIGURE IV.26:</b> SELECTION DES SURFACES POUR L'APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (TEMPERATURE). ....	89
<b>FIGURE IV.27:</b> APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (TEMPERATURE).....	90
<b>FIGURE IV.28:</b> SELECTION DE LA SURFACE POUR L'APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (TENSION). ....	91
<b>FIGURE IV.29:</b> APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (TENSION).....	91
<b>FIGURE IV.30:</b> SELECTION DE LA SURFACE POUR L'APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (TENSION). ....	92
<b>FIGURE IV.31:</b> APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES (TENSION).....	92

<b>FIGURE IV.32:</b> CHEMIN DE MENU POUR APPELER LES OPERATIONS DE DEFINITION DU TYPE D'ANALYSE (SELECTIONNEZ LE TYPE D'ANALYSE).....	93
<b>FIGURE IV.33:</b> CHEMIN DE MENU POUR APPELER LES OPERATIONS D'EXECUTION DE L'ANALYSE. ....	94
<b>FIGURE IV.34:</b> CHEMIN DE MENU POUR INVOQUER DES OPERATIONS POUR AFFICHER LES RESULTATS DE LA SIMULATION. ....	95
<b>FIGURE IV.35:</b> FENETRE DE DONNEES DE SOLUTION NODALE DE CONTOUR. ....	95
<b>FIGURE IV.36:</b> DEPLACEMENT DE L'ACTIONNEUR ELECTROTHERMIQUE ANALYSE. ....	81
<b>FIGURE IV.37:</b> TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE ANALYZED ELECTROTHERMAL ACTUATOR. ....	96
<b>FIGURE IV.38:</b> LA REPONSE DU CONTACTEUR (POLYSILICIUM ET FEASNB) AVANT ET APRES CHARGEMENT (CHARGE ELECTRIQUE). ....	97
<b>FIGURE IV.39:</b> DEPLACEMENT DANS L'ACTIONNEUR THERMIQUE. ....	98
<b>FIGURE IV.40:</b> EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DU SUBSTRAT. ....	99
<b>FIGURE IV.41:</b> COURBE DE DEPLACEMENT MAXIMUM POUR LES DEUX MATERIEAUX ( POLY-SILICIUM ET FEASNB). ....	99

### **Liste des tableaux:**

<b>TABLEAU 1:</b> DOMAINES D'APPLICATION DES MEMS [2A] .....	29
<b>TABLEAU 2:</b> CAHIERS DE CHARGES DES DIFFERENTS TYPES D'ACTIONNEMENTS.....	60
<b>TABLEAU 3:</b> AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIFFERENTS TYPES D'ACTIONNEMENT.....	60
<b>TABLEAU 4:</b> $E$ :YOUNG MODULUS IN GPA; $\nu$ :POISSON'S RATIO; $\alpha$ :THERMAL EXPANSION COEFFICIENT IN $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ; $\varpi$ :ELECTRICAL RESISTIVITY IN $\Omega\text{M}$ ; $K_L$ :THERMAL CONDUCTIVITY IN $\text{W.M}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$ .....	75
<b>TABLEAU 5 :</b> TABLEAU DE COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DE DEPLACEMENT ET DE TEMPERATURE DES DEUX MATERIAUX.....	100

## Nomenclature :

Abréviations les plus couramment utilisées :

**MEMS:** Micro Electro Mechanical Systems

**NEMS:** Nano Electro Mechanical Systems

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

**Bio-MEMS:** Micro-systèmes en application

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

**MMIC:** Monolithic Microwave Integrated Circuit

**FBAR:** Film Bulk Acoustic Resonators

**GPS:** Global Positioning System

**MOS:** Metal Oxyde Semiconducteur

**CMOS:** Complementary Metal Oxide Semiconductor

**SiC:** Carbure de silicium

**SiO<sub>2</sub>:** Oxyde de silicium

**SoC:** System-on-Chip

**SOI:** Silicon On Insulator

**LIGA:** Méthode technologique

## **Problématique :**

MEMS (Micro Electro Mécanique Système), en particulier des micro-actionneurs thermiques construits en poly-silicium qui fonctionnent en utilisant la chaleur du courant électrique selon l'effet Joule[1].

Sous déformation électrothermique et transmission de chaleur, la force de déplacement de ces micro-actionneurs est proportionnelle au matériau à partir duquel ils sont fabriqués. Malheureusement, l'utilisation croissante de ce matériau le place en forte demande, ce qui entraîne un épuisement des ressources et une augmentation des prix.

Selon l'association professionnelle SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International), l'utilisation mondiale de plaquettes de silicium expédiées en surface a augmenté de 14 % en 2021, tandis que la valeur marchande a augmenté de 13 % par rapport à 2020, atteignant de nouveaux sommets historiques de 12 milliards de dollars.[2]

Cela empêche les scientifiques de découvrir des produits chimiques supplémentaires avec des caractéristiques physiques similaires au poly-silicium. L'objectif de cette thèse est de sélectionner un nouveau composé comparable au poly-silicium et de faire une simulation numérique pour estimer les performances d'un actionneur fabriqué à l'aide du nouveau matériau avant la production.

## **Résumé:**

Notre recherche fait partie d'une étude plus large des systèmes de miniaturisation de micro-actionneurs, qui comprennent de petits composants électriques et mécaniques pouvant être couplés dans un disjoncteur thermique et haute fréquence. Le terme "microsystème" fait référence à un composant électromécanique que l'on trouve couramment dans les capteurs et les actionneurs et qui est conçu pour remplir diverses fonctions telles que la perception de l'environnement (capture), l'analyse et le traitement des données, le cheminement et la communication avec le monde extérieur, ou l'influence sur le modèle lui-même.

Nous avons également abordé une connaissance générale des systèmes micro-électromécaniques, ainsi que des différents actionneurs et leurs principes de fonctionnement, et aussi les méthodes de fabrication et les matériaux, ainsi qu'une compréhension générale des matériaux Heusler, comment les créer, et leur propriétés qui, selon nous, remplaceront le poly-silicium et peuvent être brevetées.

Le modèle de bras de l'actionneur thermoélectrique a ensuite été analysé dans le logiciel ANSYS avec son matériau changé en un matériau différent, et les résultats ont été comparés.

## ملخص :

يعد بحثنا جزءاً من دراسة أكبر لأنظمة تصغير المشغل الصغير ، والتي تتضمن مكونات كهربائية وميكانيكية صغيرة يمكن أن تقترن بقاطع دارة حراري وعالي التردد. يشير مصطلح "النظام الصغير" إلى مكون كهروميكانيكي يوجد بشكل شائع في أجهزة الاستشعار والمحركات وهو مصمم لأداء مجموعة متنوعة من الوظائف مثل الإدراك البيئي (الالتقاط) وتحليل البيانات ومعالجتها والمسار والتواصل مع العالم الخارجي ، أو التأثير على النموذج نفسه.

لقد غطينا أيضاً المعرفة العامة بالأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة ، فضلاً عن المشغلات المختلفة ومبادئ التشغيل الخاصة بها ، مع استحضار طرق ومواد التصنيع ، فضلاً عن فهم عام لمواد Heusler ، وكيفية إنشائها ، و الخصائص ، التي نعتقد أنها ستحل محل البولي سيليكون ويمكن طرحها للحصول على براءة اختراع.

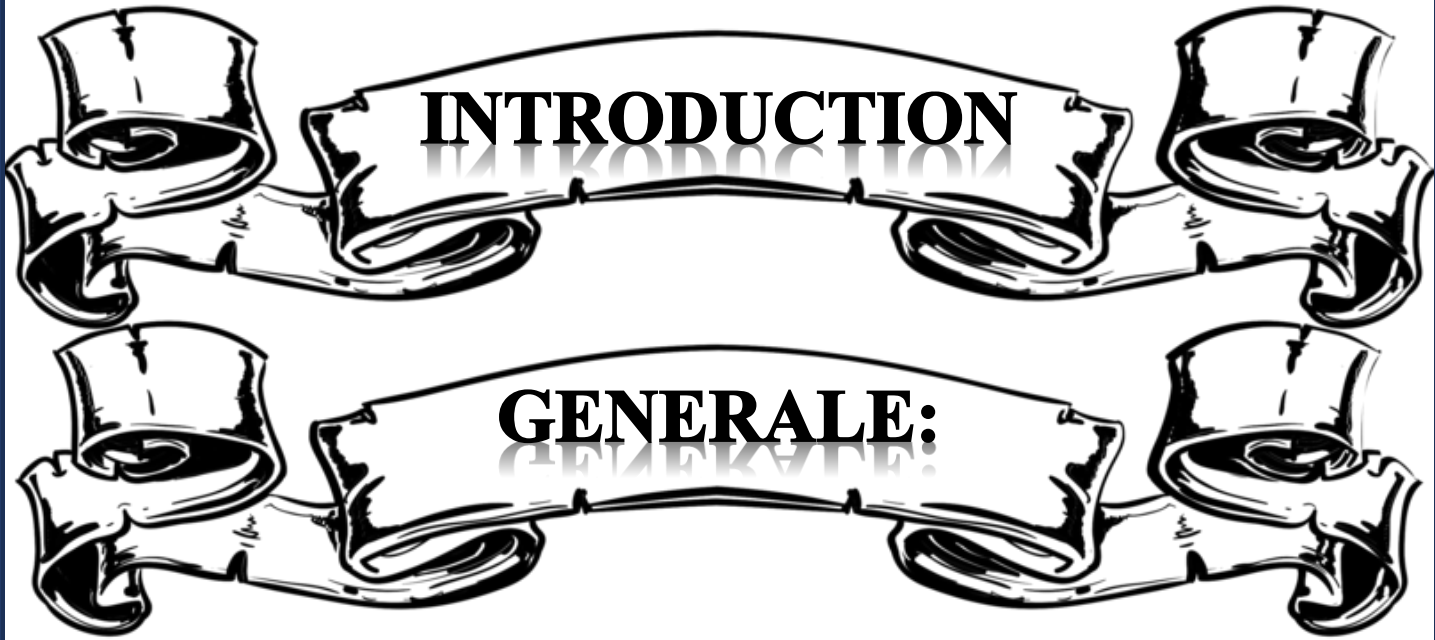
ثم تم تحليل نموذج ذراع المشغل الكهرو حراري في برنامج ANSYS حيث تم تغيير مادته إلى مادة مختلفة وتم مقارنة النتائج.

## **ABSTRACT:**

Our research is part of a larger study of micro-actuator miniaturization systems, which include small electrical and mechanical components that may be coupled in a thermal and high-frequency circuit breaker. The term "micro-system" refers to an electromechanical component that is commonly found in sensors and actuators and is designed to perform a variety of functions such as environmental perception (capture), data analysis and processing, the path and communication with the outside world, or the influence on the model itself.

We also covered general knowledge of micro-electromechanical systems, as well as different actuators and their operating principles, manufacturing methods and materials, as well as a general understanding of Heusler materials, how to create them, and their properties, which we believe will replace polysilicon and can be patented.

The thermoelectric actuator arm model was then analyzed in ANSYS software with its material changed to a different material, and the results were compared.



## **INTRODUCTION GENERALE:**

Les microsystèmes sont un univers fascinant d'éléments microscopiques qui ont infiltré notre quotidien au cours des 10 dernières années. Cependant, le concept derrière ces systèmes n'est pas nouveau. Dans sa conférence à l'American Physical Society à Caltech en 1959, le physicien Richard Feynman a fait allusion à l'idée d'influencer la matière à petite échelle, jetant ainsi les bases de la course à la miniaturisation. Alors que les premiers microsystèmes ont été développés à la fin des années 1960 (transistors MOS à grille résonnante ou micro-capteurs de pression), la commercialisation n'a commencé que dans les années 1980, avec l'émergence des micro-accéléromètres dans le domaine automobile. Depuis lors, leur gamme d'applications s'est élargie pour inclure l'aérospatiale, la médecine, les télécommunications, l'optique, etc.

Un microsystème est un composant qui combine une petite structure physique avec une partie électronique qui peut être incorporée sur le même support physique. MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) fait référence à tout microsystème avec des composants mécaniques mobiles. Les MEMS assurent des fonctions de capteur (pression, masse, accélération, etc.), des fonctions d'actionneur (micro-miroirs, micro-pompes, micromanipulateurs, etc.) ou de traitement du signal. Ils sont fabriqués selon des techniques de micro-usinage du silicium dérivées de celles de la micro-électronique mais se différencient par la réalisation de pièces mobiles détachées du substrat (filtres électromécaniques, composants radiofréquence, etc.). Les systèmes micro-électromécaniques ont récemment commencé à dépasser le seuil de miniaturisation en se réduisant à des dimensions nanométriques. Nous parlons de systèmes nano-électromécaniques (NEMS), qui ont le potentiel de révolutionner de nouvelles applications technologiques grâce à une sensibilité et une résolution accrues.

La croissance rapide du nombre d'utilisateurs de divers réseaux de communication, tels que le téléphone cellulaire, l'Internet à haut débit et les systèmes sans fil, a entraîné des changements importants dans les circuits et composants de télécommunication utilisés. L'exigence de fabriquer des biens transportables à faible coût et à faible consommation pour le grand public a entraîné une miniaturisation et une production à grande échelle. La création de composants RF MEMS (Radio Frequency Micro Electro Mechanical System) est un prolongement naturel de cette stratégie. La possibilité de fabriquer des composants à faibles pertes avec des dimensions de quelques centaines de micromètres et une technologie de

fabrication hautement compatible avec les composants actifs actuels permettent la fabrication de circuits « tout intégrés » qui exécutent des opérations compliquées. En conséquence, plusieurs nouveaux composants basés sur cette technologie de pointe ont évolué, notamment des commutateurs, des condensateurs variables et des diodes accordables. Les filtres et les résonateurs, les déphaseurs, etc. ont tous prouvé un potentiel élevé pour remplacer les circuits existants ou créer de nouvelles fonctionnalités.

Ces nombreuses avancées techniques s'organisent selon trois axes :

Le premier concerne ce qui existe déjà : pouvons-nous réaliser les aspirations d'applications intelligentes à faible coût, à faible consommation et à volume élevé avec les composants MEMS existants ?

La seconde concerne les matériaux. Quels nouveaux matériaux doivent être créés pour étendre les capacités des plateformes en charge de produire des microsystèmes ?

Le dernier point concerne les questions d'intégration. De nouvelles approches d'intégration sont-elles nécessaires compte tenu des applications à faible coût, à faible consommation et à volume élevé ?

Ce mémoire sera divisé en quatre sections. Tout d'abord, nous fournirons des informations générales sur la technologie MEMS ainsi que sur les moyens de produire des microsystèmes compatibles avec les processus microélectroniques typiques, en mettant l'accent sur les technologies intégrées qui permettent des microsystèmes monolithiques. Ensuite, nous passerons en revue les nombreuses applications technologiques contemporaines. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux microsystèmes à actionneurs thermiques, qui connaissent aujourd'hui une augmentation considérable de leur utilisation. Le fonctionnement, notamment le mouvement MEMS, repose sur des processus physiques qui doivent être compris et maîtrisés. Dans le chapitre 2, nous aborderons les différents types de micro-actionneurs.

Dans le chapitre 3, nous discuterons des matériaux de production des MEMS, en mettant l'accent sur le silicium et les matériaux utilisés pour favoriser le remplacement du silicium.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude et à la modélisation de l'actionneur électrothermique et de sa déformation sous l'effet de la tension. La comparaison des deux matériaux au fonctionnement de l'actionneur sera montrée dans cette étude et simulation.

Enfin, ce mémoire se terminera par une conclusion générale et un point de vue.



A decorative banner with a central section containing the text "CHAPITRE I". The banner has a wavy, ribbon-like appearance with ornate, curled ends on both sides. The text is in a bold, black, serif font. The banner is centered horizontally and vertically on the page.

**CHAPITRE I**

# CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MEMS

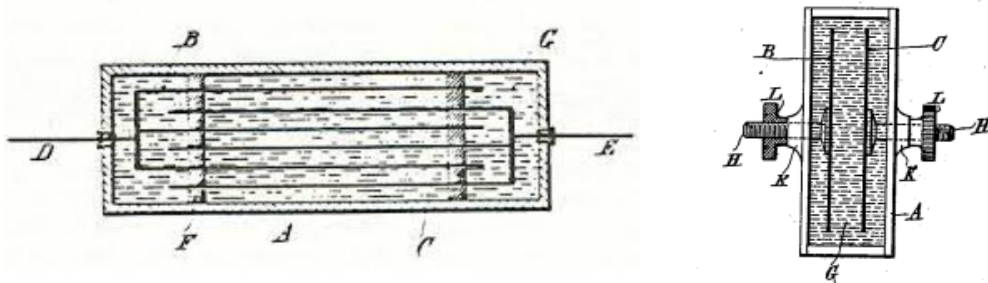
## Introduction :

La technologie « MEMS », acronyme de « Micro Electro Mechanical Systems », est un sujet de recherche qui a suscité l'intérêt de nombreux laboratoires à travers le monde. Les MEMS pour les applications RF, en particulier, sont le résultat de l'émergence des composants électroniques MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) et de l'exigence croissante de réduction des effectifs et d'amélioration des performances des systèmes électroniques. En effet, des microsystèmes ont été créés à des fins diverses, dont la métrologie sous forme de capteurs (accéléromètres, capteurs de pression, etc.) depuis les années 1970 [3]. Les premiers MEMS pour les applications hyperfréquences ont été développés au début des années 1990, grâce aux efforts des laboratoires de recherche de l'armée américaine. Les caractéristiques extrêmement bonnes de ces structures jusqu'à 50 GHz surpassaient considérablement celles des dispositifs à base de semi-conducteurs, suscitant l'intérêt d'un nombre important d'entreprises et de laboratoires.

Les caractéristiques électriques et mécaniques des composants micro électromécaniques sont déjà bien comprises, et malgré leur immaturité en termes de conditionnement et de fiabilité, leur potentiel pour de nombreuses applications télécoms, militaires et autres rend la recherche et le développement de ces dispositifs critiques. [4].

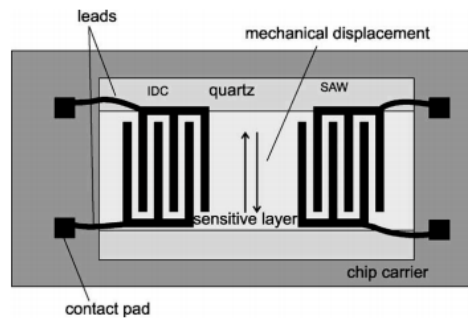
### I.1. Etat de l'art :

Le brevet 1891 de Tesla est peut-être le plus ancien exemple de conception d'électrodes interdigitales - de nombreuses applications.[5]



**Figure I.1:** Conception du condensateur de Tesla avec plaques interdigitales.

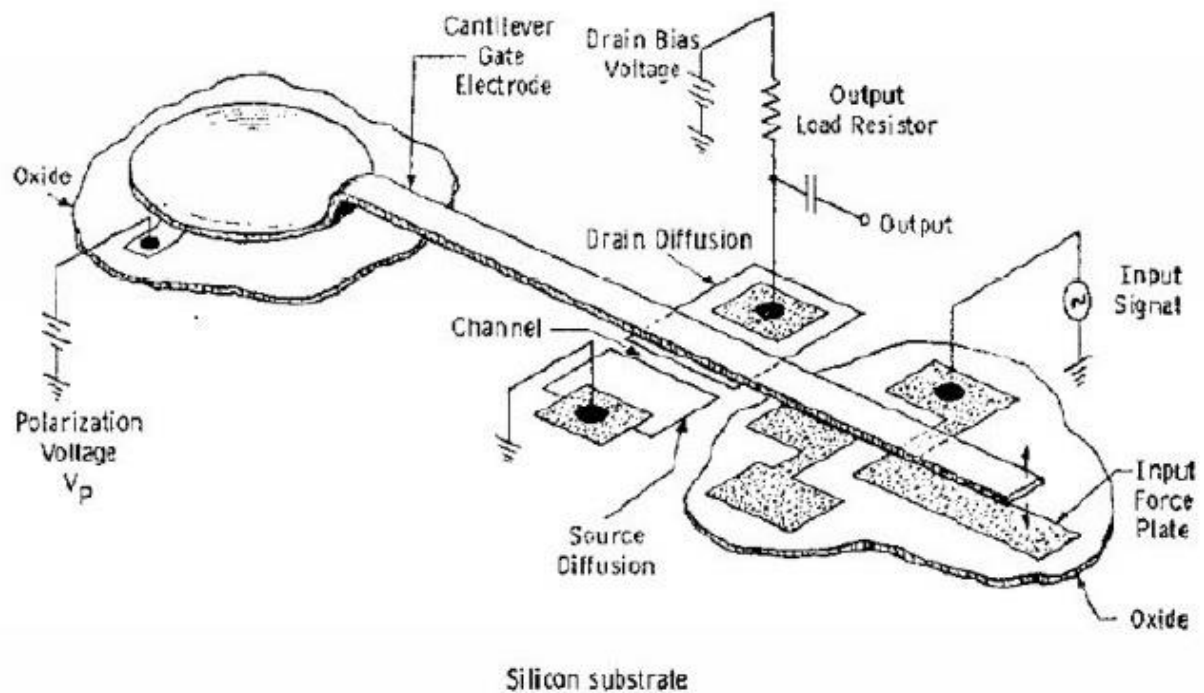
Utilisation omniprésente dans les systèmes micromécaniques (MEMS), la détection chimique, l'acoustique piézoélectrique, la biotechnologie,...[6]



**Figure I.2 :** Un exemple de conception moderne de capteur – transducteur.

## I.2. Historique :

- 1750 : Le premier moteur électrostatique (Franklin, Gordon).
- 1824 : La découverte du Silicium (Berzelius).
- 1939 : Première jonction (Schottky).
- 1947 : Le premier transistor en Ge (Shockley).
- 1949 : Le Silicium mono cristallin.
- 1954 : Jauge de contrainte en silicium, Jauges piézorésistives (Pont de Wheatstone).
- 1959 : Richard Feynman CalTech ((1918-1988)) a dit :« There's Plenty of Room at the Bottom ».
- 1960 : la démonstration du premier capteur de pression en Si (Kulite).
- 1967 : la découverte du micro usinage en surface (H. Nathanson)
- En 1969 Westinghouse crée le premier. Curiosité mécanique « FET à grille résonante » basé sur des nouvelles techniques de fabrication. Le premier dispositif microsystèmes était une structure MOS à grille résonante en or.[7] (figure I.3)
- En 1970 apparaissent les premiers accéléromètres sur silicium micro usiné en volume (Kulit)
- 1979 : tête jet d'encre.
- 1984 : Les premiers microsystèmes en poly silicium.
- 1988 : Le premier micro moteur électrostatique (Muller, UC-Berkeley).
- 1996 : Introduction du procès DRIE (gravure profonde) - Bosch.
- 1995 : Développement rapide des Bio MEMS.
- 2000 : MEMS optiques deviennent un grand marché.



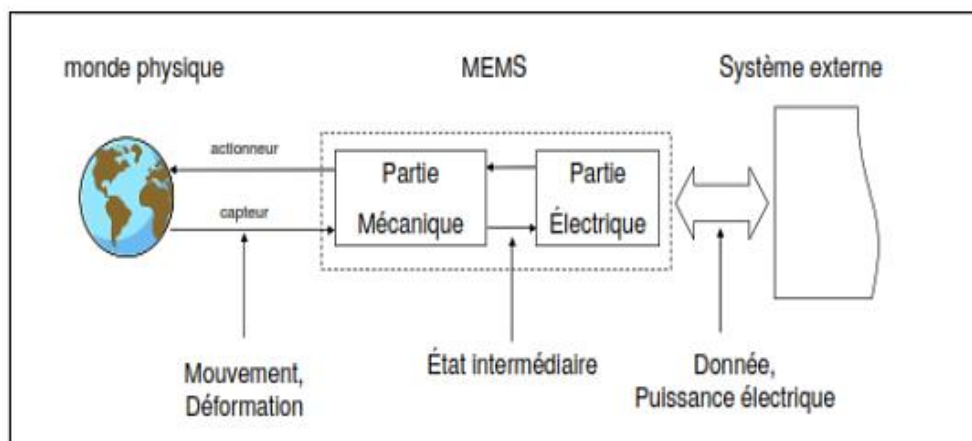
**Figure I.3:** Transistor MOS à Grille résonante.

### I.3. Définition :

Un microsystème électromécanique est un microsystème composé d'un ou plusieurs éléments mécaniques qui utilisent l'électricité comme source d'énergie pour réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur. L'expression microsystèmes électromécaniques est l'équivalent français de l'abréviation MEMS (Micro Electro Mechanical Systems).[8]

Le MEMS peut être défini comme un petit objet avec un composant électrique (et/ou électronique) et un composant mécanique en relation fonctionnelle.

La partie mécanique est liée aux données du monde physique (**Figure I.4**). [9]

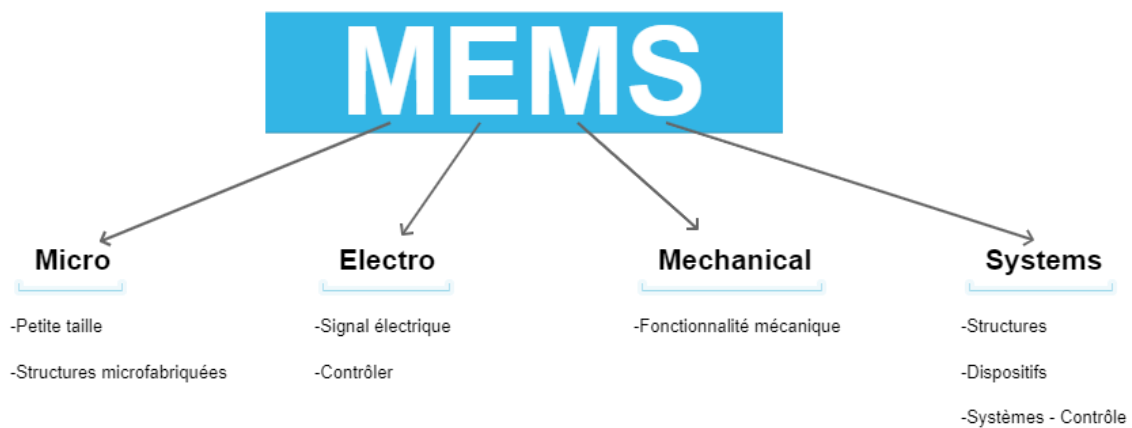


**Figure I.4:** MEMS et son environnement

Elle remplit les fonctions de capteur, de collecteur d'énergie ou d'actionneur par le mouvement ou la déformation. Le composant électrique ou électronique est en charge du traitement des commandes ou du signal.

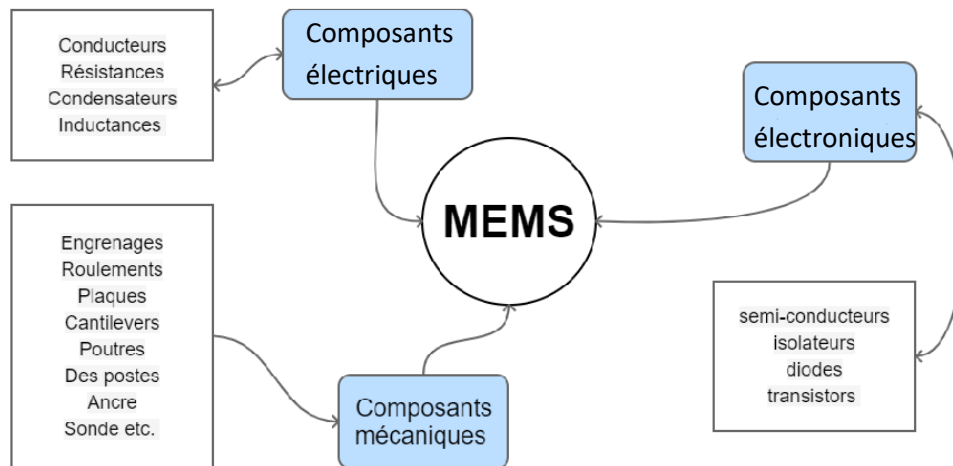
Certains MEMS n'ont pas de composants mécaniques, mais comme ils convertissent certains signaux mécaniques en signaux électriques ou optiques, ils sont classés comme MEMS.

En Europe, les MEMS sont plus communément connus sous le nom de technologie de microsystèmes (MST ou MS), micro-ingénierie en Angleterre, MEMS aux USA et au Japon, on parle de micromachines.[10]



*Figure I.5: Définition de la notion de MEMS / Microsystèmes*

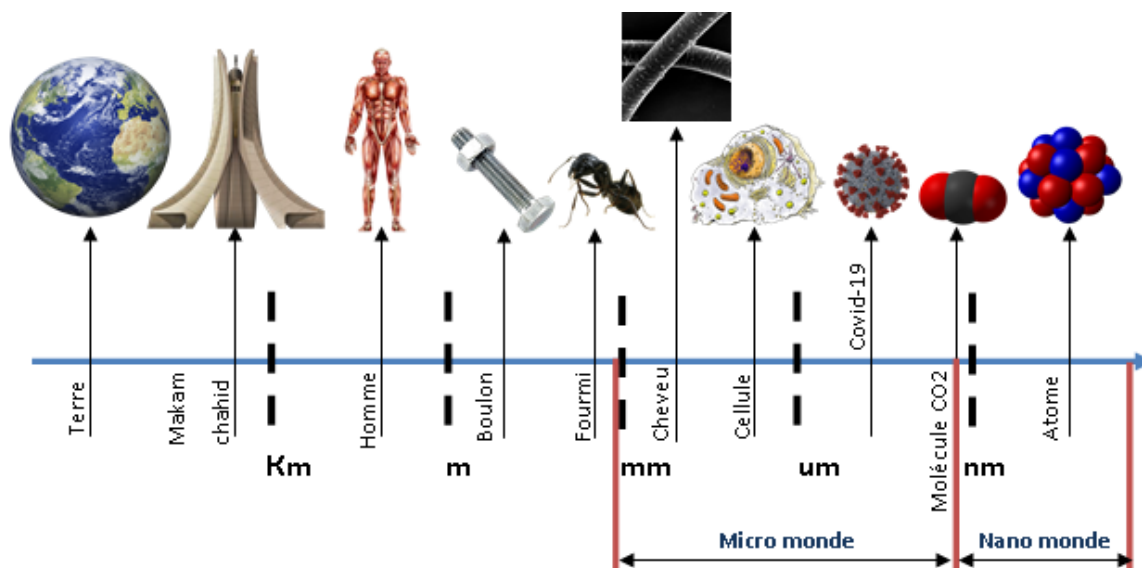
La technologie MEMS est considérée comme une forme étendue de fabrication de circuits intégrés (IC) traditionnels. La principale différence entre la technologie traditionnelle de fabrication de circuits intégrés (VLSI) et MEMS réside dans le fait qu'en utilisant les MEMS, vous pouvez non seulement fabriquer des composants électriques tels que des condensateurs et des inducteurs, mais également des composants mécaniques tels que des engrenages, des ressorts, des poutres, etc. En utilisant la technologie IC traditionnelle, vous ne pouvez fabriquer que des semi-conducteurs, des isolants, des diodes et des transistors.



**Figure I.6:** les composants de MEMS

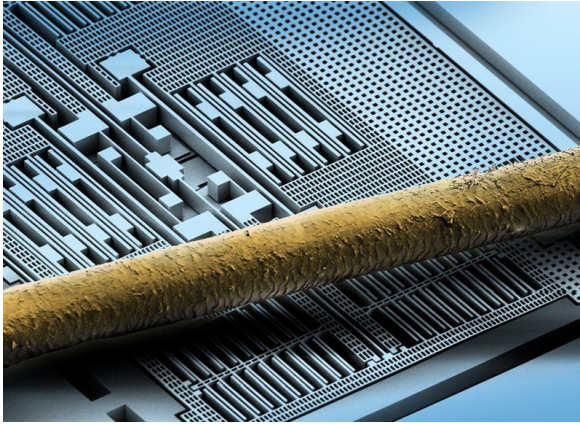
#### **I.4. Les dimensions:**

La dimension physique des dispositifs MEMS peut aller de 20 micromètres à un millimètre. Ils sont constitués de composants d'une taille comprise entre 1 et 100 micromètres.

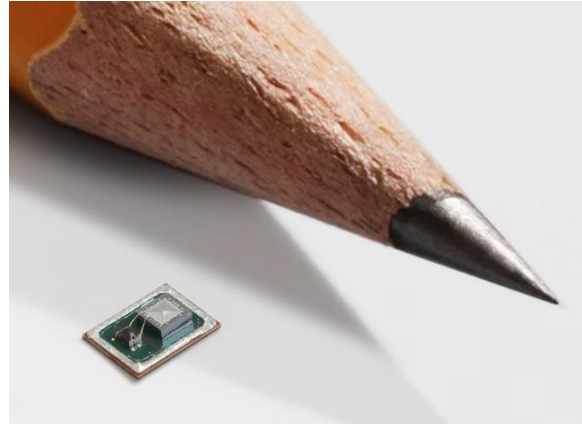


**Figure I.7:** Ordre de grandeur

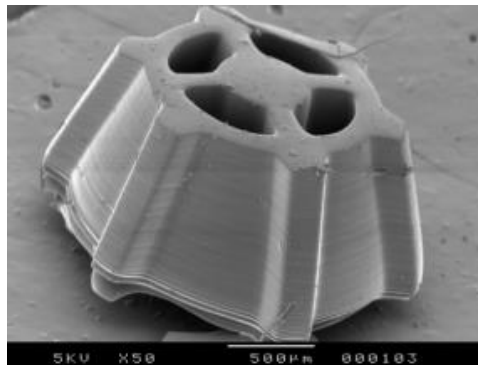
Alors que les composants individuels peuvent être plus petits que la largeur d'un cheveu humain, plusieurs modules disposés en réseaux peuvent occuper une surface de plus de 10 centimètres carrés. (figure I.8)[11] (figure I.9)[12] (figure I.10)[13]



**Figure I.9:** Un microscope électronique montre la structure de silicium finement gravée d'un capteur d'accélération Bosch [10A].



**Figure I.8:** MEMS microphones [4A].



**Figure I.10:** Engrenage conique fabrique en  $\mu$ SL

## **I.5. La Miniaturisation des Microsystèmes:**

La miniaturisation des circuits électroniques, capteurs et microsystèmes permet de développer des systèmes de mesure électroniques connectés peu intrusifs et envisageant de nombreuses applications nouvelles (santé, traçabilité, sécurité...). Probabilité de voir se développer une « atmosphère intelligente » basée sur des objectifs de mesure les communications distribuées impliquent des innovations importantes dans la conception et l'intégration technologique de microsystèmes fiables et compacts. En ce qui concerne

développer des techniques d'intégration de dispositifs primaires dans de nouvelles applications industrielles, et des efforts technologiques à trois niveaux :

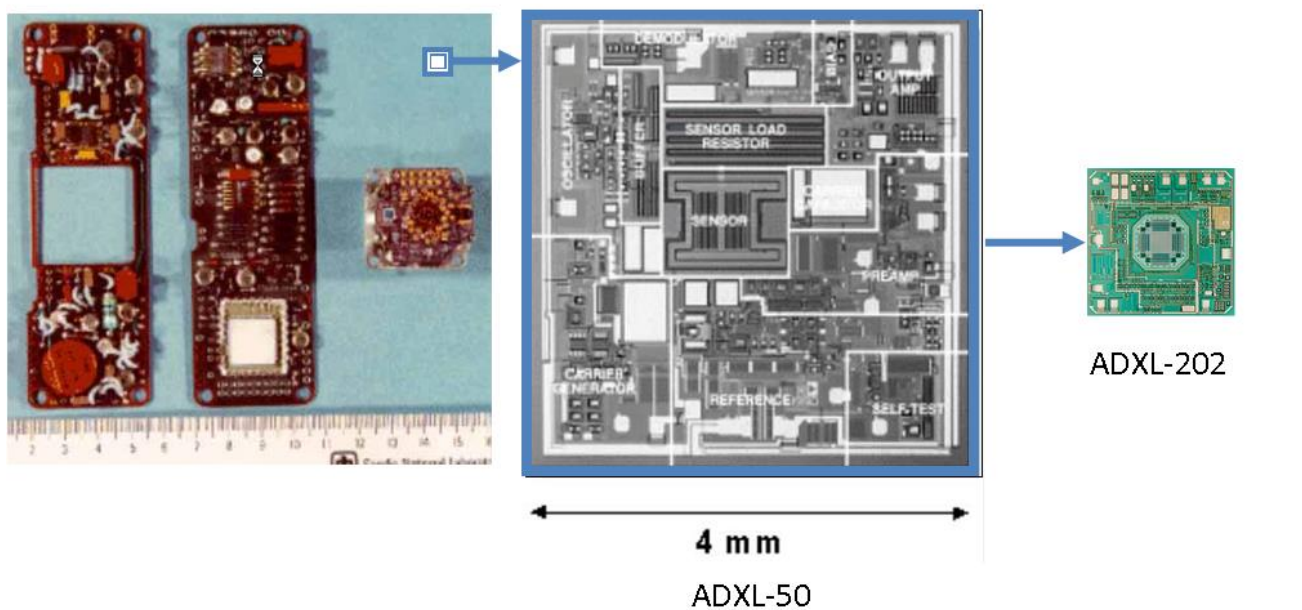
- Concernant les composants que nous devons contrôler totalement dans leur comportement basses et hautes énergies,
- Dans les architectures de microsystèmes intégrés,
- A propos de l'intégration de technologies très hétérogènes.

### Exemple : l'accéléromètre (Airbag)

1980 : Carte 50cm<sup>2</sup>

1995 : puce 16mm<sup>2</sup> (1D)

2002 : puce 3mm<sup>2</sup> (2D)



**Figure I.11:** L'accéléromètre (Airbag) Technologie issue des C.I.

### **I.6. Pourquoi la miniaturisation :**

La miniaturisation ne peut se limiter à un seul domaine scientifique ou technologique puisque, par définition, elle nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs physiques et technologiques. Elle fait aujourd'hui l'objet de recherches futures, tant théoriques que pratiques, en raison de l'étendue et de la complexité des difficultés rencontrées...

La miniaturisation offre les avantages suivants :

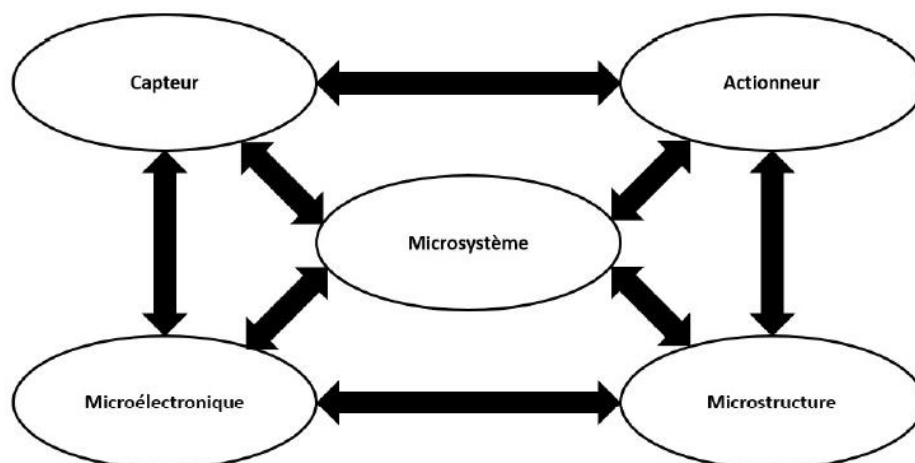
- Réduction de la taille et du poids;
- Réduction de la consommation énergétique;
- Amélioration des performances (vitesse, sensibilité...);



- Production collective de composants individuels;
- Réduction des coûts;
- Nouvelles propriétés et fonctionnalités;
- Motivations scientifiques: explorer des 'objets' plus petits;
- Prédominance de certains phénomènes physiques;
- Fréquences de fonctionnement et largeur de bande élevées;
- Grande fiabilité mécanique;
- Constantes de temps thermiques faibles.

### **I.7. Dispositif microsysteme:**

Ce concept est surtout inspiré de la réalisation en microélectronique, la mécanique des structures et l'électronique de transduction (capteur ou actionneur) comme la montre la figure ci-dessous. [8]

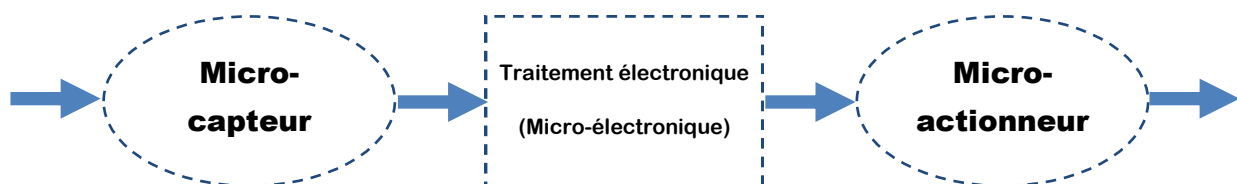


*Figure I.12: Base de conception des microsystemes.*

### **I.8. Composants clés MEMS:**

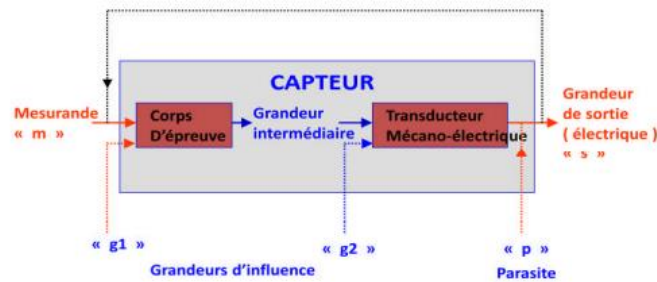
On appelle microsysteme, un systeme de taille micro fabriqué selon les procédés collectifs intégrant au moins deux des fonctions suivantes :

MEMS = 1,2 ou 3 éléments de la chaine suivante. [14]



*Figure I.13: Schéma de principe d'un MEMS.*

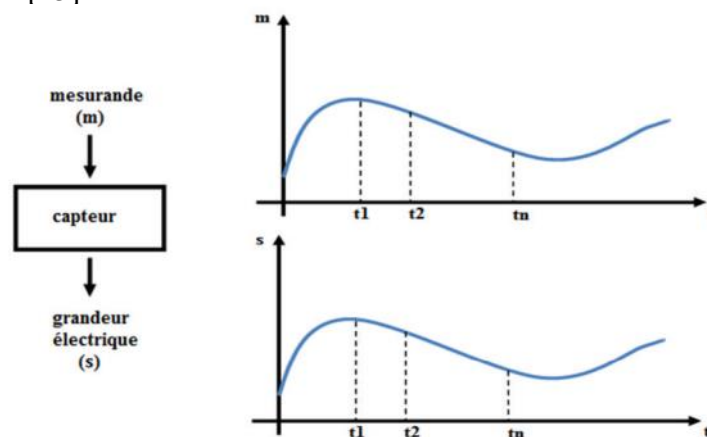
- **Fonction capteur** (transducteur d'entrée) convertit une grandeur non électrique (pression, température) en un signal électrique (tension, courant, charge).



*Figure I.14: Représentation modulaire d'un capteur.*

La grandeur à mesurer est appelée mesurande « m ». Le rôle du capteur est donc de convertir « m » en une grandeur électrique qu'on appellera la mesure « s ».

La fonction  $s = m(F)$  dépend souvent d'autres grandeurs physiques propres à l'environnement (température, humidité, etc.). Ces grandeurs sont appelées grandeurs d'influence.[15]

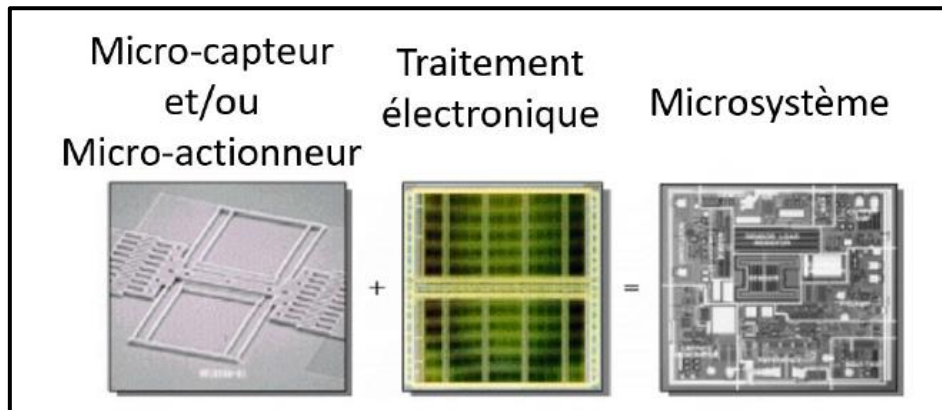


*Figure I.15 : Principe d'un capteur.*

- **Fonction traitement** (analogique ou numérique) transforme le signal électrique issu du capteur souvent inexploitable car trop faible, déformé et bruité, en un signal utile par amplification, filtrage, modulations...
- **Fonction actionneur** (transducteur de sortie) convertit un signal électrique en grandeur non électrique compréhensible par un opérateur (affichage ou enregistrement par exemple) ou en une action sur l'environnement extérieur (mouvement moteur par exemple).

Le choix du principe d'actionnement le plus souhaitable dépend de plusieurs facteurs comme :

- La force recherchée
- La quantité de mouvement recherchée
- Taille
- Vitesse...



**Figure I.16:** définition de microsystème (MEMS) [6].

### **I.9. Classification des microsystèmes :**

Plusieurs variantes de classements sont utilisées :

- Suivant la grandeur physique à mesurer
- Suivant le système de traitement de l'information
- Suivant le principe physique exploité
- Suivant l'application
- Suivant la complexité
- Suivant l'énergie du signal considéré.

### **I.10. Familles des MEMS :**

MOEMS (pour l'optique), RF-MEMS (commute les fréquences radio), BIO-MEMS (pour la biologie avec 'lab-on-chip') et MAGMAS (Magnetic Micro-Actuators and Generators, ou MAGnetic Micro-Actuators & Systems) sont certaines familles de MEMS. C'est une grande famille, même si elle ne partage plus qu'un petit nombre de biens industriels ou grand public.

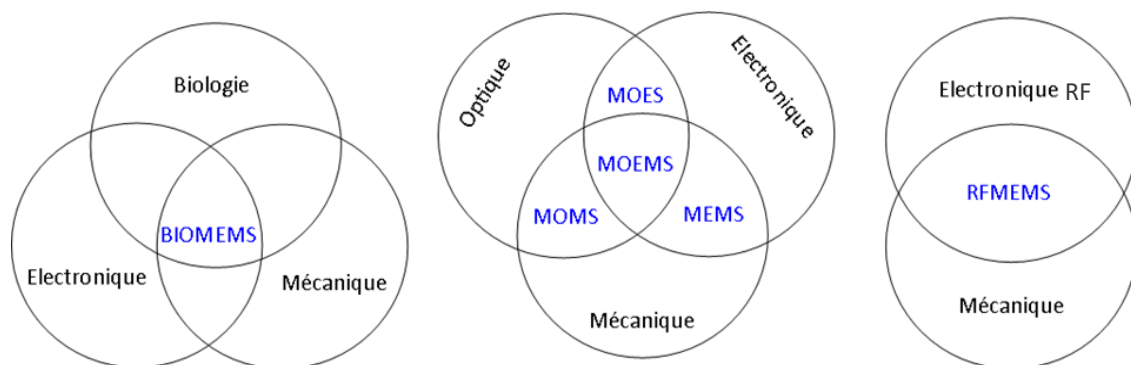
Têtes d'impression, capteurs d'airbag, matrices actives de miroirs dans les vidéoprojecteurs, têtes de disque dur... n'en sont que quelques exemples.

Parce qu'il y a encore beaucoup de développement à faire pour identifier et stabiliser de nouveaux procédés, produire de nouveaux matériaux ou construire de nouveaux logiciels de simulation, ce domaine reste extrêmement proche de la recherche.[16]

### **I.11. Domaine d'application des microsystèmes:**

Le domaine des MEMS est fortement pluridisciplinaire ; contrairement à la microélectronique, les applications couvertes par les dispositifs microsystèmes telles que :

- Micro-capteurs.
- Micro-actionneurs.
- Bio-MEMS.
- MEMS RF.( Radio-Frequency-Micro-Electrical-Mechanical Systems)
- MEMS Optiques.
- Micro-fluidique
- MEMS acoustiques.
- Micro-TAS (chimiques).
- MEMS Magnétiques
- Labo On Chip.



***Figure I.17: Les domaines d'application des MEMS.***

Le tableau suivant permet de donner des exemples de quelques domaines d'application.

*Tableau 1: Domaines d'application des MEMS [15]*

<b>Défense</b>	<b>Médicale</b>	<b>Electronique</b>	<b>Communications</b>	<b>Automobile</b>
Guidage des armes	Micro-valves, micro-pompes, microréacteurs chimiques, puces ADN	Têtes de lecteur de disque	Commutateurs optiques ou photoniques et interconnexions pour réseaux large bande passante	Capteurs de navigation embarqués
Surveillance	Stimulateurs musculaires et systèmes de diffusion intra-sanguine	Têtes d'impression pour imprimantes à jet d'encre	Relais, micro-commutateurs, matrices de commutation, filtres radios fréquences, antennes, duplexeurs, micro-miroirs	Capteurs de compression du système de climatisation
Systèmes armement	Capteurs de pression intracorporels, capteur de pression sanguine	Télé-projecteurs	Systèmes de projection pour les téléphones portables	Capteurs de force de freinage, accéléromètres pour le contrôle des suspensions
Capteurs intégrés	Prothèses	Capteurs sismiques	Oscillateurs commandés sous tension (VCO)	Détecteurs de niveau de carburant et de pression de vapeur
Stockage des données	Instruments d'analyse miniaturisés	Détecteurs de pression pour l'aérospatial	Diviseurs et coupleurs, résonateurs, déphaseurs	Capteurs pour coussins gonflants (airbag)
Surveillance aérienne	Stimulateurs cardiaques	Systèmes de stockage des données	Lasers accordables	Pneus intelligents

### I.11.1. MEMS pour dispositif mobile :



Figure 18: MEMS dispositif portable

### I.11.2. MEMS pour automobile :

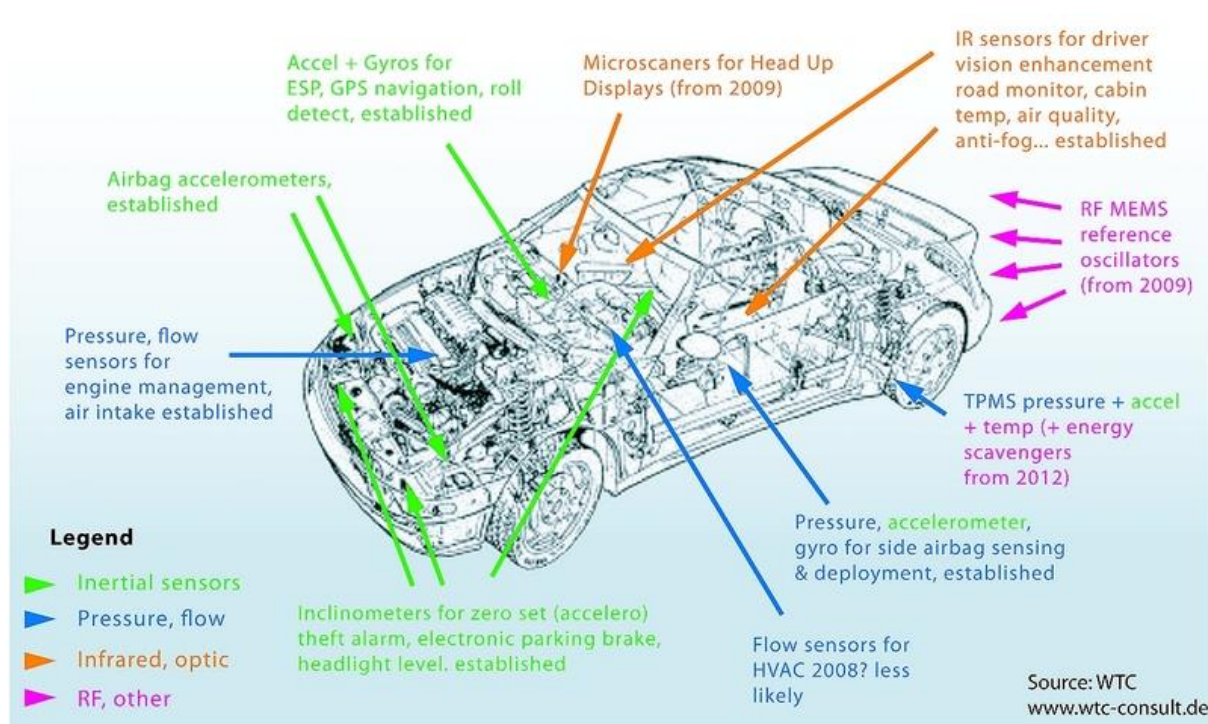
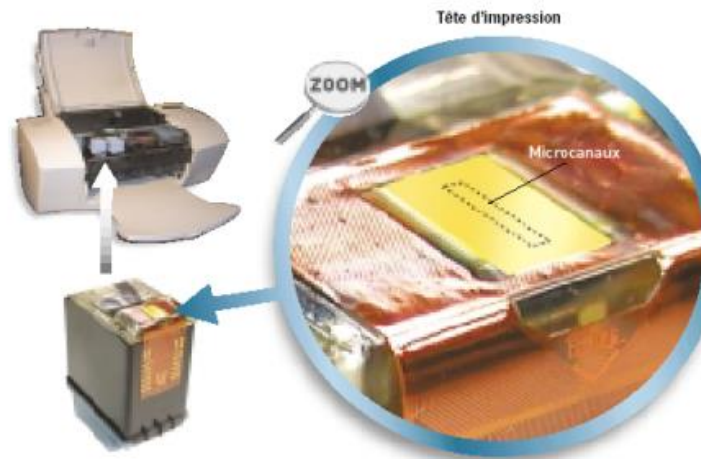


Figure 19: Exemples de capteurs dans les voitures.

### I.11.3. MEMS pour l'imprimerie:

En raison du besoin toujours croissant de stockage de données, de nouvelles générations de disques durs basés sur MEMS sont en cours de développement. Les nouveaux procédés d'impression sont dominés par les têtes d'impression à jet d'encre (Figure I.20 et I.21).

Dans ces dispositifs, une électrode est posée sur un substrat comportant une chambre pour l'encre, permettant de générer une force électrostatique agissant sur les gouttes d'encre [17].



1978 : MEMS pour jet d'encre (IBM, H. P.)

Figure I.20: Imprimante à jet d'encre.

Micro-buses d'injection pour cartouche d'imprimante à jet d'encre :

- Chauffage d'encre liquide
- Projection du liquide à travers une membrane micro-perforée [18]

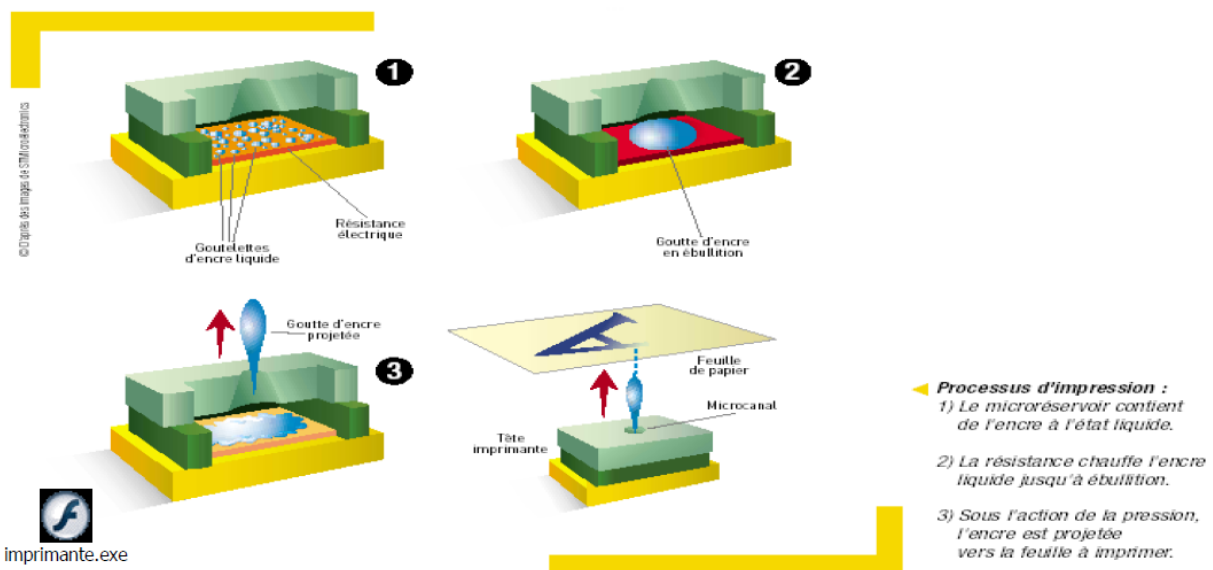
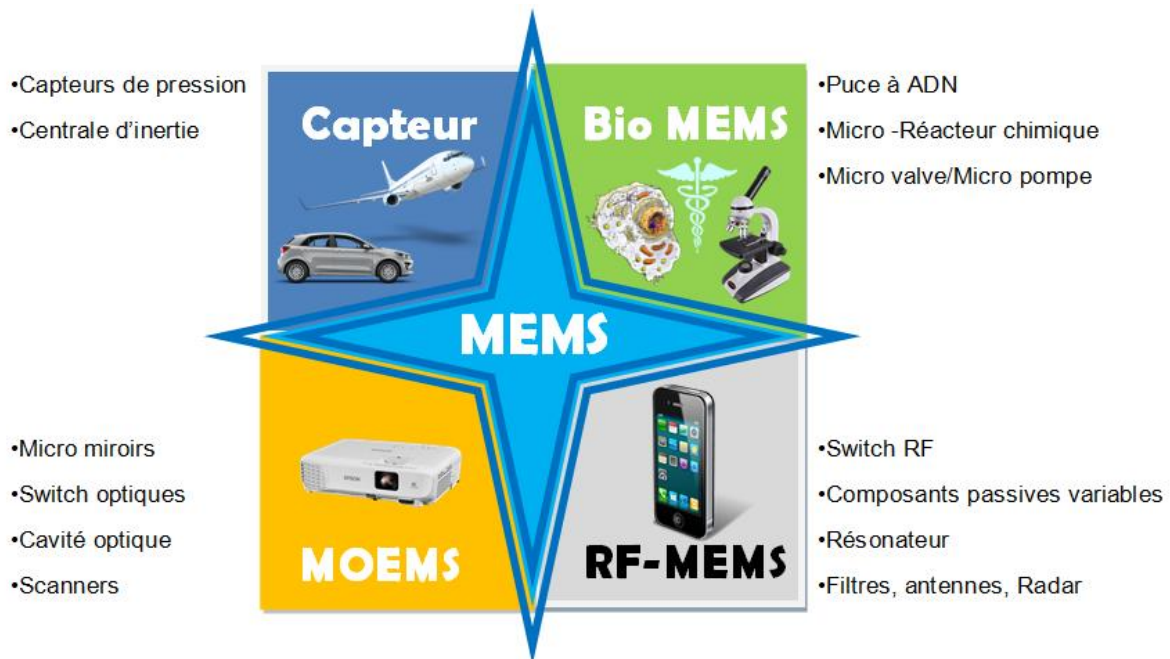


Figure I.21: Processus d'impression à jet d'encre.

## I.12. Applications typiques:

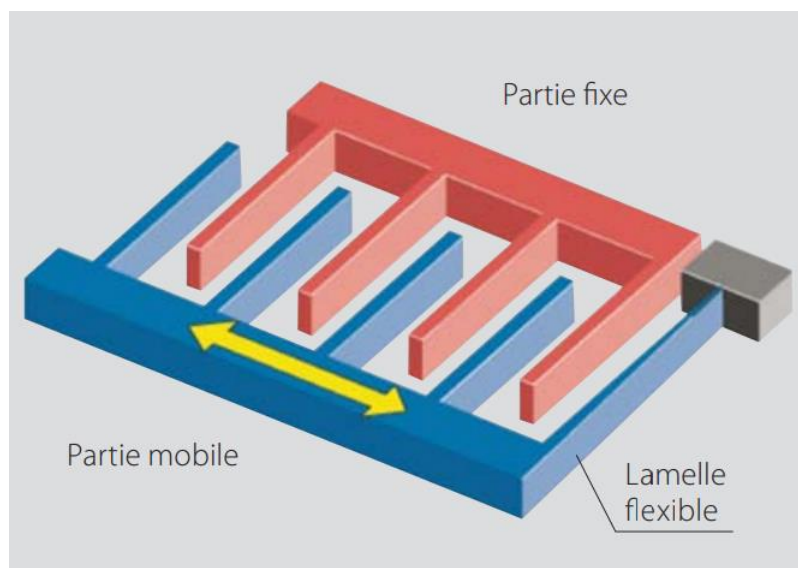


*Figure I.22: Applications typiques des MEMS.*

### I.12.1. Capteur :

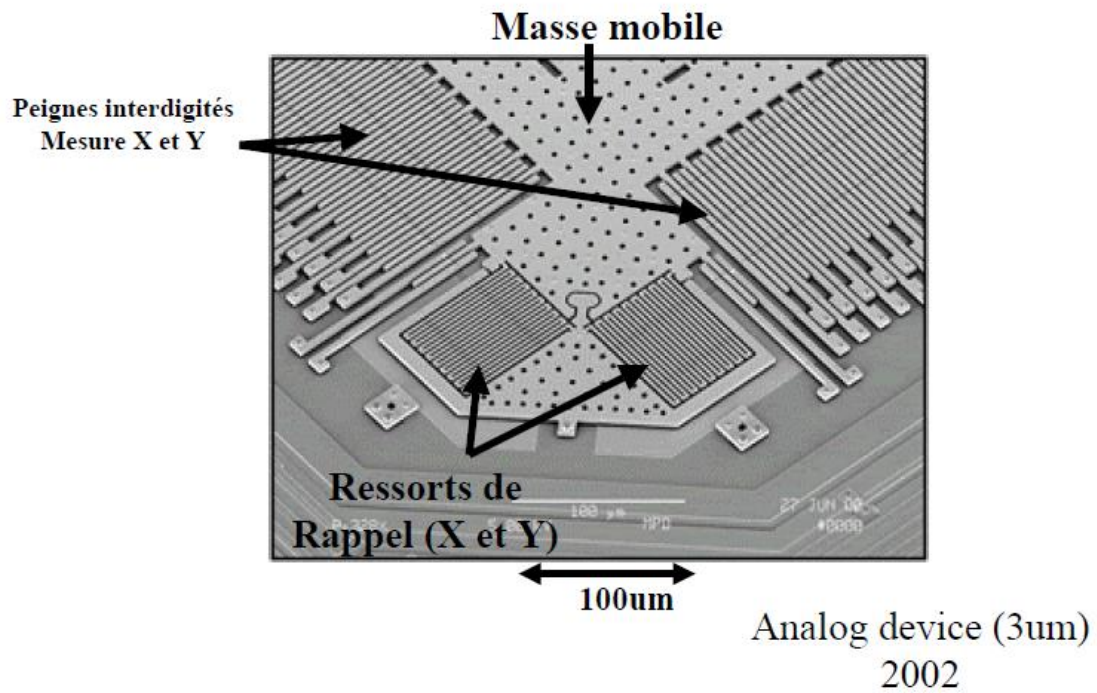
L'accéléromètre est un capteur d'accélération composé de Surfaces polies en silicone, constituées de deux peignes, L'un est fixe et l'autre est suspendu par un support mobile flexible. Lorsque la vitesse varie, il y a accélération.

Peigne portable Il peut se déplacer de quelques dizaines de nanomètres. Les Modifiez le déplacement équivalent capacitif. Elle a La structure électronique fournit des signaux analogiques Capacités proportionnelles à l'accélération. (Figure I.23)[19] (figure I.24)[20]



*Figure I.23: les deux peignent d'accéléromètre.*

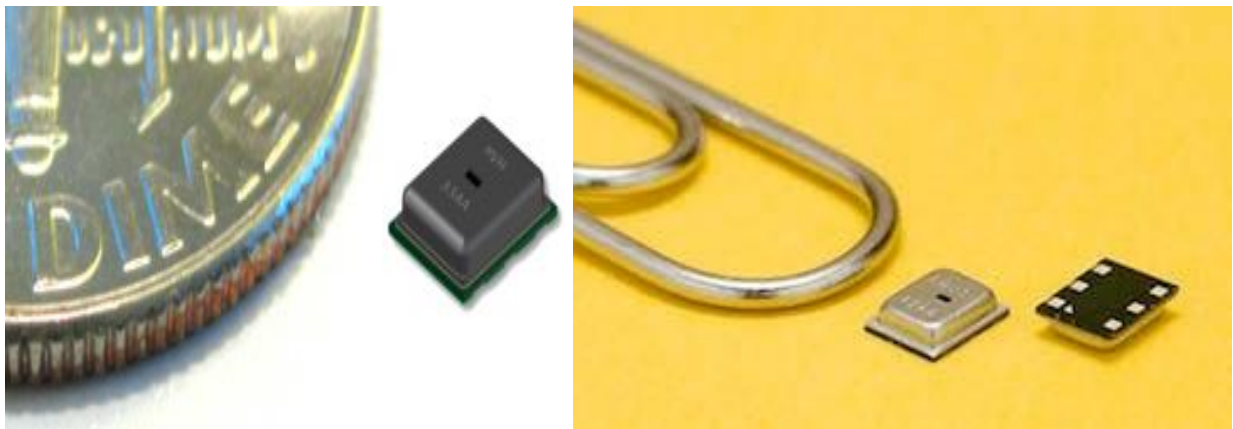




*Figure I.24: Accéléromètre capacitif en peigne.*

Les micros capteurs ont des fonctions peu encombrantes. Ils sont conservateurs et légers et non Perturbé par l'environnement d'application.

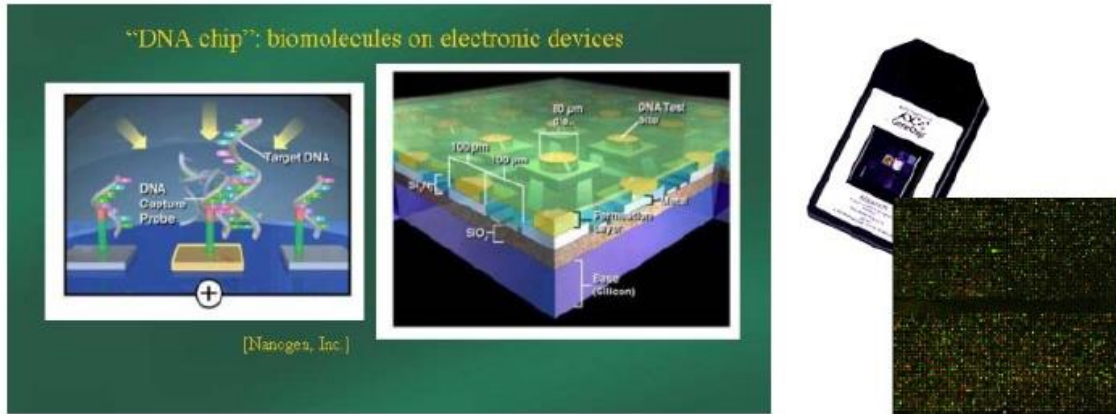
Par exemple Capteur d'humidité :[21]



*Figure I.25: Capteur d'humidité.*

### I.12.2. Microsystèmes biocompatibles (Bio-MEMS):

Dans le domaine médical, disposer de systèmes précis est très important pour surveiller et assister le personnel médical et les patients dans la vie quotidienne. Dans les figures suivantes, nous citerons quelques applications très populaires dans le domaine médical.

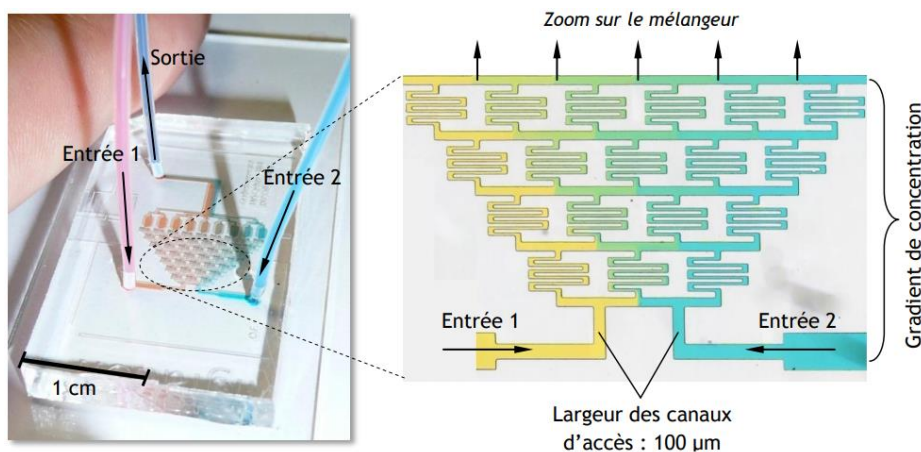


Etude et analyse de la structure génétique par détection de séquence d'ADN

- Identification de l'origine et du contenu (alimentation)
- Identification multiple (Ex : 12000 gènes identifiable sur 1cm<sup>2</sup>)
- identification de modifications génétiques (multiples)

**Figure I.26:** Puce à ADN

Associé au Laboratoire sur puce (LOC : Lab On Chip), il permet le développement d'applications permettant des interactions avec le vivant, aussi bien au niveau protéique (quelques nanomètres) qu'à l'échelle cellulaire (quelques dizaines de microns) ou encore à la taille du tissu (quelques millimètres). Bio MEMS intègre des réseaux de micro-canaux où sont gérés les flux micro-fluidiques. Il vise à intégrer toutes les étapes du protocole biologique dans un microsystème de la taille typique d'une carte de paiement. Ils se trouvent sous l'application des bio-puces. [22]



**Figure I.27:** Générateur de gradient développé au laboratoire SATIE de l'ENS

## Examples of bioMEMS-enabled systems

(Source: BioMEMS Market and Technology report, Yole Développement, 2020)

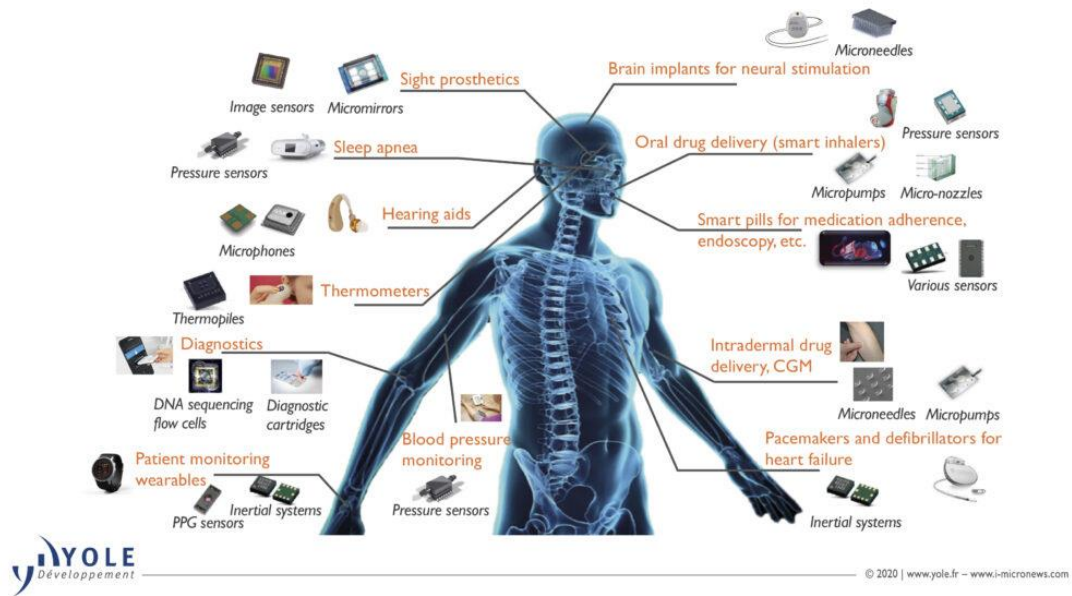


Figure I.28: Exemple de bio MEMS.

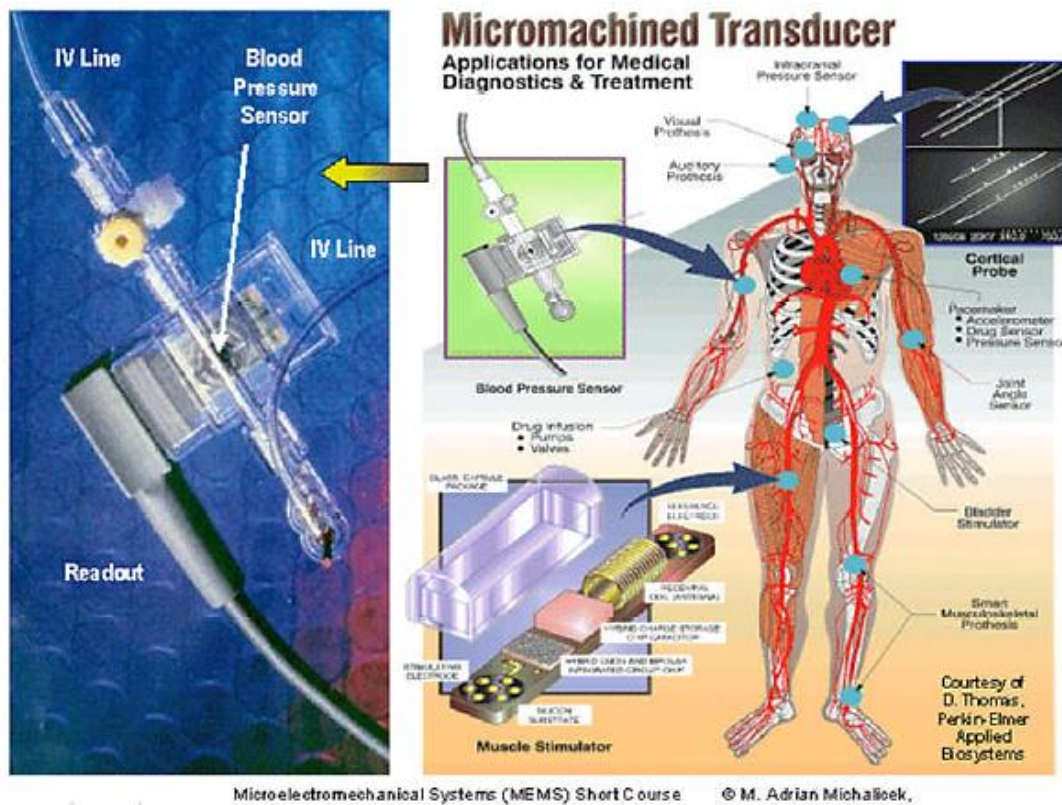
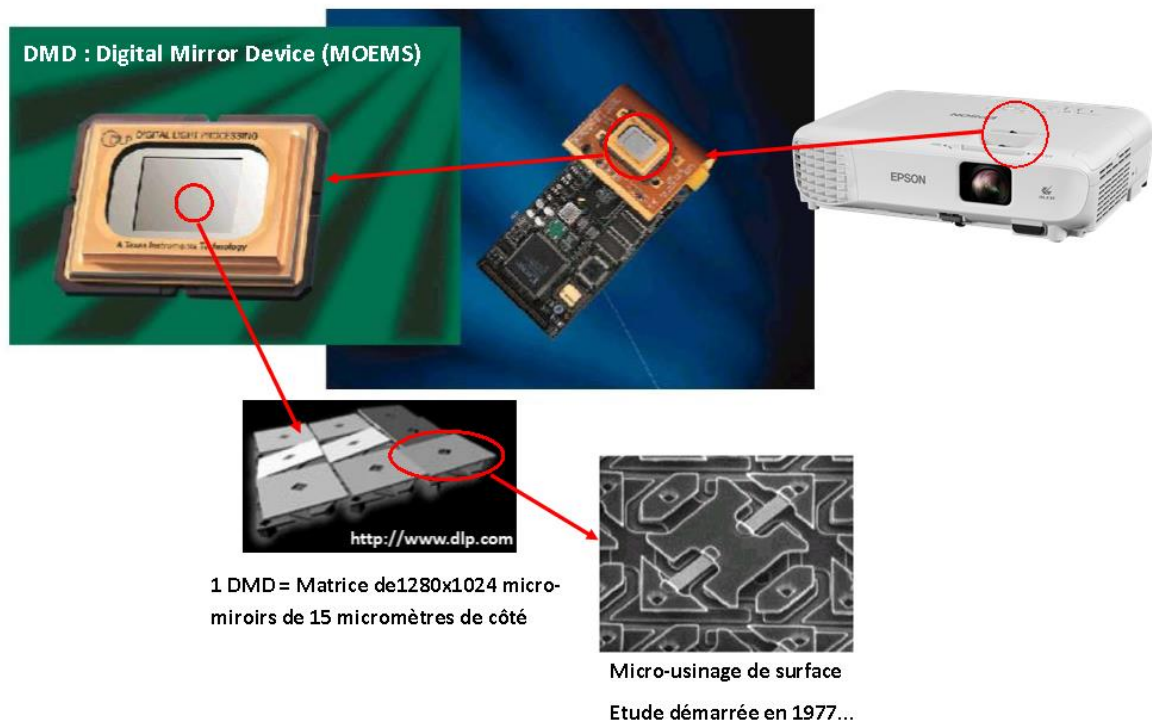


Figure I.29: Environnement Biomédical (Distributeur d'insuline, Biopuce à ADN, micropompe).

### **I.12.3. Microsystèmes optiques (MOEMS):**

En général, les dispositifs MOEMS sont basés sur l'intégration d'un ou plusieurs micro-miroirs, et la majorité utilisent des technologies de fabrication et d'emballage relativement matures, et répondent aux besoins divers de nombreux domaines d'application. D'autres sont encore en phase de développement pour améliorer leurs performances afin de répondre aux normes de plus en plus exigeantes.

Dans la figure suivante, nous allons citer un exemple d'un capteur MOEMS :

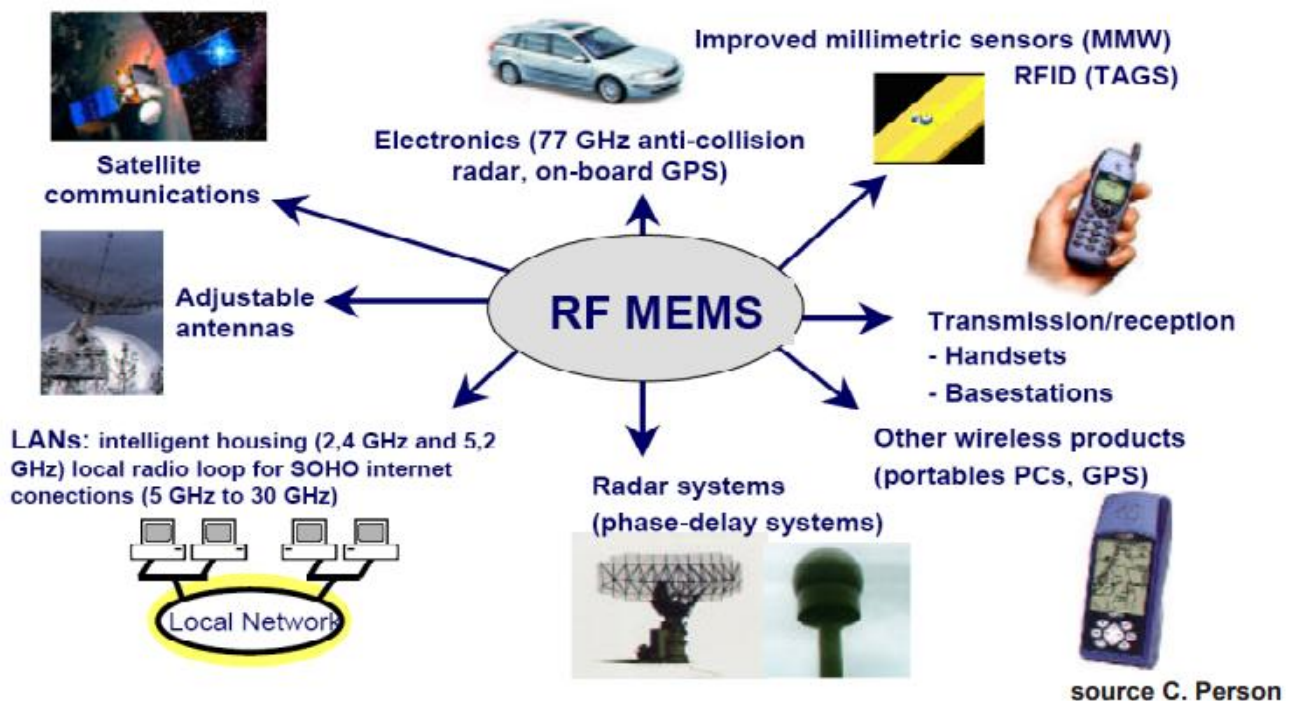


**Figure I.30:** Applications à la projection d'images vidéo : Les systèmes DMD de Texas Instrument et GLV

### **I.12.4. Microsystèmes Radiofréquence (RF-MEMS):**

En raison de leurs performances améliorées, les MEMS RF ont ouvert de nouvelles voies pour les applications de radiofréquence. En effet, la technologie de production des MEMS pour les applications hyperfréquences a évolué et s'est diversifiée, lui permettant de générer aujourd'hui une large gamme de composants et de circuits. Parmi les bénéfices des RF MEMS, on peut citer [23] :

- Très faible consommation d'énergie (uniquement dans les phases de déplacement) : l'activation électrostatique ne nécessite pratiquement aucun courant, ce qui implique une très faible consommation d'énergie.
- Isolation élevée : Comme les commutateurs RF MEMS sont basés sur un entrefer, ils ont une capacité très faible, ce qui se traduit par une excellente isolation.
- Dans le cas de commutateurs parallèles, par exemple, les pertes d'insertion sont typiquement d'environ 0,1 dB.
- Une fréquence de coupure extrêmement élevée.
- Un processus de production simple : les MEMS RF sont généralement créés à l'aide de la technologie de fabrication des semi-conducteurs et peuvent être générés sur une large gamme de substrats, tels que le quartz, le verre ou le silicium.

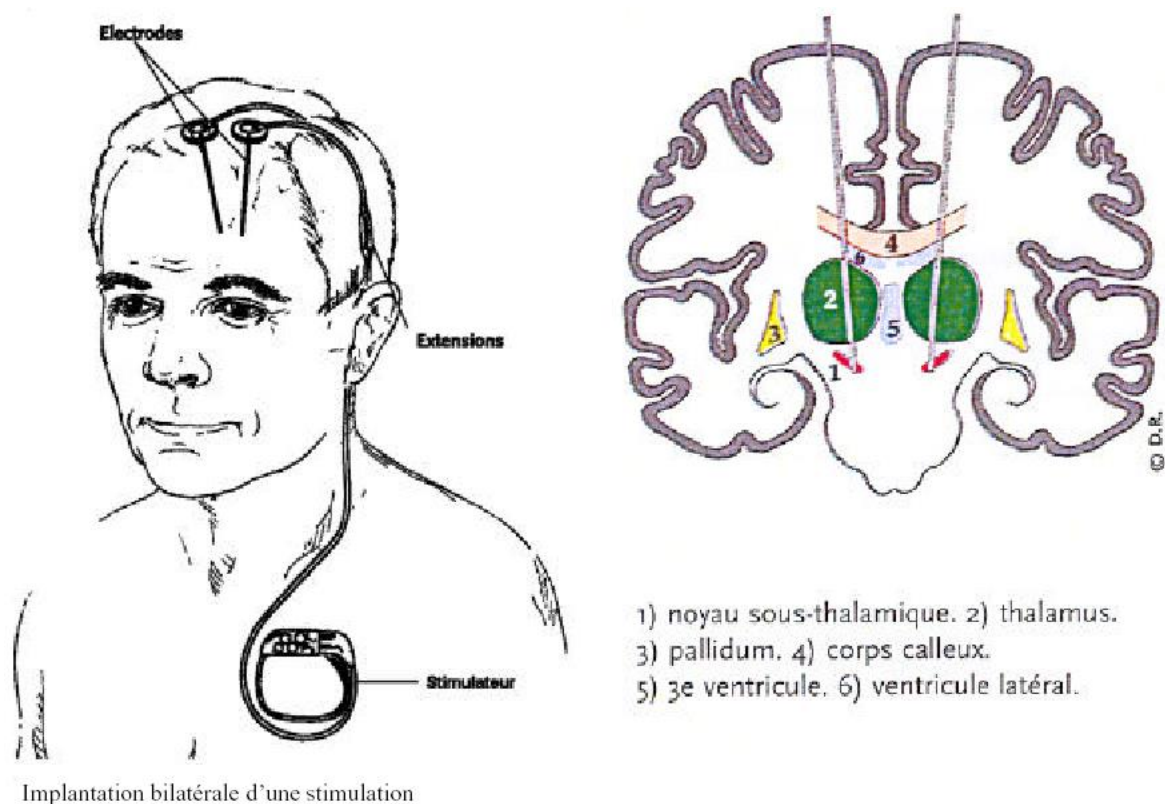


source C. Person

*Figure I.31: Les MEMS-RF*

En collaboration avec le CHU de Grenoble, le CEA-LETI développe actuellement un nouvel appareil de stimulation cérébrale profonde pour améliorer l'opérabilité des personnes atteintes de la maladie de Parkinson. Cette forme de stimulation est également étudiée pour le traitement des symptômes associés à des maladies telles que l'épilepsie et l'obésité. Depuis plus d'une décennie, la procédure de traitement consiste à implanter des électrodes de stimulation exactement autour du noyau sous-thalamique et à produire un courant électrique à des fréquences de l'ordre de 100-200 Hz [24], comme illustré sur la Figure I.32.[25]

L'objectif du nouveau système est de permettre l'insertion d'un plus grand nombre d'électrodes de stimulation [26] ainsi que leur sélection postopératoire. Cette solution raccourcirait la durée de l'opération et donc son coût. En effet, la présente approche nécessite l'engagement direct du patient pendant la procédure, afin que le chirurgien puisse déterminer si les électrodes sont bien positionnées. La zone à stimuler ayant la taille d'un gros grain de riz, l'implantation d'un plus grand nombre d'électrodes, permettant d'atteindre plus facilement la zone à exciter, et pour stimuler une plus grande zone de volume, ce qui peut produire un bénéfice thérapeutique dans certaines circonstances.



**Figure I.32:** La stimulation cérébrale profonde.

## **I.13. Fabrication des Micro systèmes:**

### **I.13.1. Les principales procédures de fabrication de MEMS:**

Les procédés de fabrication des microsystèmes sont fortement influencés par la microélectronique. Les tranches de silicium sont généralement utilisées comme substrat, et les microsystèmes sont créés par une série d'étapes d'épitaxie, de dépôt de résine, de photolithographie et de gravure sèche ou humide.

Les différences fondamentales entre les microsystèmes et la microélectronique sont liées à la fabrication de composants mobiles donc quelque peu éloignés du substrat, ce qui est souvent réalisé en utilisant une couche sacrificielle.

Les étapes de production de la microélectronique sur silicium peuvent être divisées en trois catégories : les techniques additives (dépôt de couches minces, épitaxie...), sélectives ou par transfert de motifs comme la photolithographie, et les techniques de gravure soustractive [27].

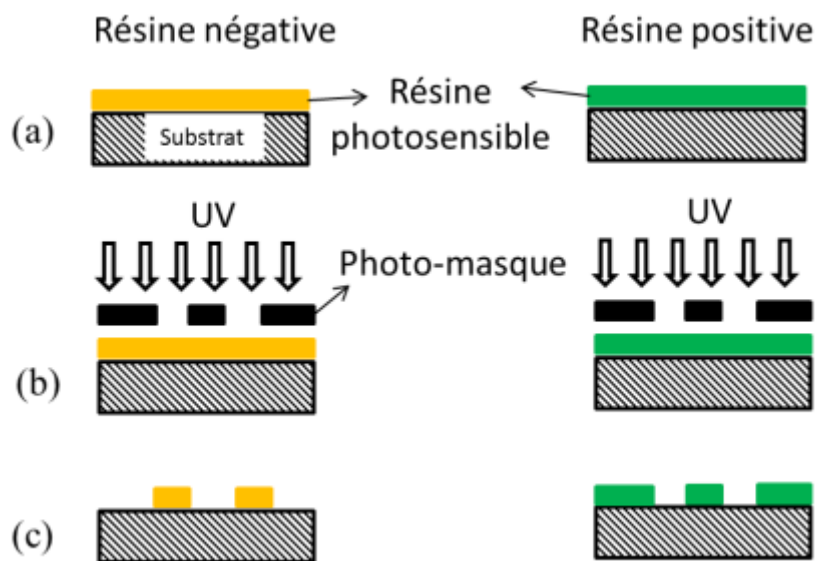
#### **II.3.5.1. Dépôt de couches minces:**

Cette technique consiste à déposer des couches de divers matériaux à partir d'un gaz, d'un plasma, d'une solution aqueuse ou d'un état solide les unes sur les autres. Des matériaux tels que le poly-silicium, les oxydes et nitrures de silicium, les polymères, etc. peuvent être déposés. Les épaisseurs des couches créées et leurs propriétés (électriques, piézoélectriques mécaniques, etc.) dépendent fortement de paramètres tels que la température, l'inclinaison de la tranche et la topologie de fabrication. Pour obtenir les propriétés souhaitées, nous ajoutons fréquemment une étape de traitement thermique après le dépôt.

#### **II.3.5.2. La photolithographie:**

La figure I.33 décrit les phases essentielles de la photolithographie qui conduisent à la structuration d'un film photorésistant mince. Ces résines sensibles aux UV peuvent avoir une polarité positive ou négative. Quelle que soit leur polarité, ils doivent être posés de manière cohérente sur le substrat de silicium, le plus souvent par un revêtement à la tournette. Le dépôt peut également être réalisé par "SPRAY-COATING" ou "DOCTOR BLADE" (Figure I.33.a). La résine est recuite après son dépôt afin de drainer les solvants présents dans la solution. La substance est ensuite

mise en forme en l'exposant à des longueurs d'ondes UV généralement de 365 nm à travers un photo-masque dont les parties opaques protègent cette même résine des rayonnements. Brillant (Figure I.33.b). Cette insolation n'a pas le même effet sur les résines de polarité positive que sur les résines de polarité négative. Dans le premier exemple, la dégénérescence des composants exposés est causée par l'insolation. L'exposition, en revanche, conduit à une polymérisation complète des parties exposées dans le cas d'une résine négative pré-polymérisée. Les sections indésirables de chacune de ces deux résines sont ensuite gravées du substrat à l'aide d'une solution de gravure spécifique au solvant (Figure I.33.c). Par exemple, des résines négatives telles que SU-8 (résine époxy) sont utilisées pour la production de canaux micro-fluidiques en raison de leurs rapports d'aspect essentiels [28]. Les résines positives telles que les gammes AZ ou SHIPLEY [29] sont fréquemment utilisées comme masques pour la mise en forme de micro-leviers en silicium dont les différents procédés sont expliqués dans la section suivante. Cette approche permet un contrôle simple de la taille et de l'épaisseur de la microstructure, avec une précision de 1  $\mu\text{m}$ .



**Figure I.33:** Structuration de résines photosensibles négative ou positive par photolithographie. a) Dépôt de la résine à la tournette. b) insolation de la résine au travers d'un photo-masque. c) gravure humide de la résine.

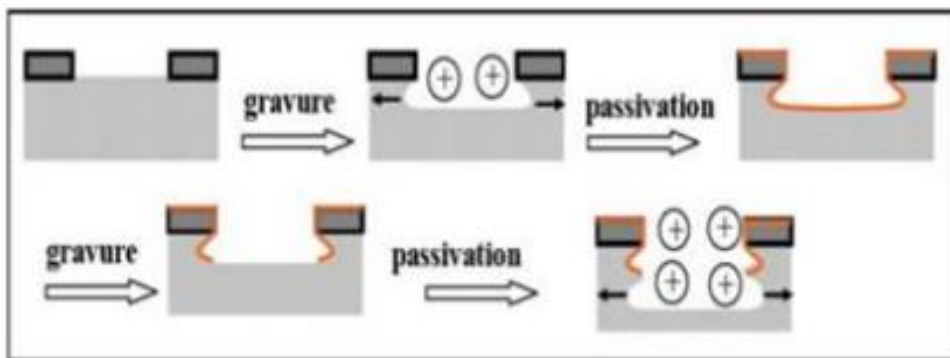


### II.3.5.3. Techniques de Gravure:

La gravure est un procédé de transfert soustractif dans lequel une structure est formée par un élément de matériau issu du substrat ou d'une couche sous-jacente traversant les ouvertures d'un masque de résine ; cette gravure chimique et/ou physique de la surface non protégée par les masques peut être réalisée en milieu liquide (gravure humide) ou en milieu gazeux (gravure plasma sèche).

La méthode de gravure la plus courante est l'agression chimique. Après le processus de photolithographie, il est réalisé en immergeant un substrat de silicium dans des bains chimiques.

La gravure humide permet un usinage volumique du silicium avec des profondeurs de gravure de quelques microns seulement. La technique la plus fréquente est la gravure plasma, illustrée schématiquement à la (figure I.34). Le plasma utilisé est un gaz ionisé avec un nombre à peu près égal de particules chargées positivement et négativement. La gravure se fait dans une chambre à vide avec bombardement ionique, qui arrache des atomes de silicium sur les zones exposées de la plaquette, la protection étant réalisée en amont par micro photolithographie. Cette dernière technique est plus intrigante car elle améliore significativement la densité des ions réactifs et par conséquent la vitesse de gravure [27].

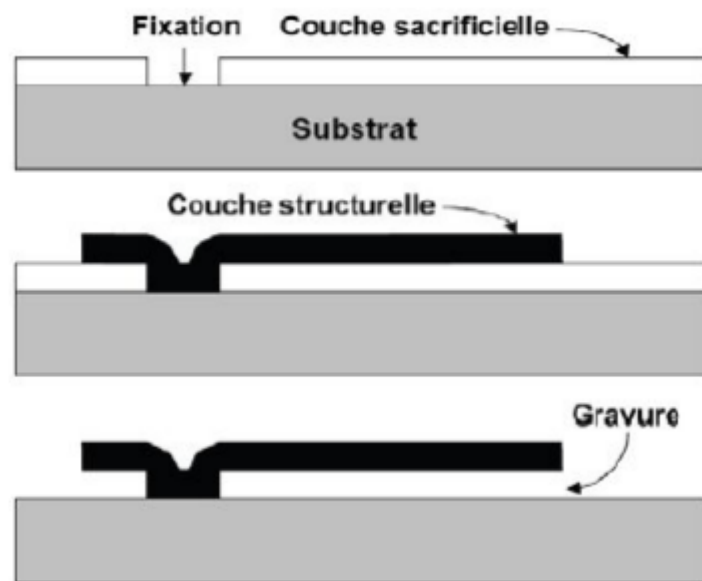


*Figure I.34: Principe de gravure par plasma.*

## I.13.2. Les processus de fabrication spécifiques aux MEMS:

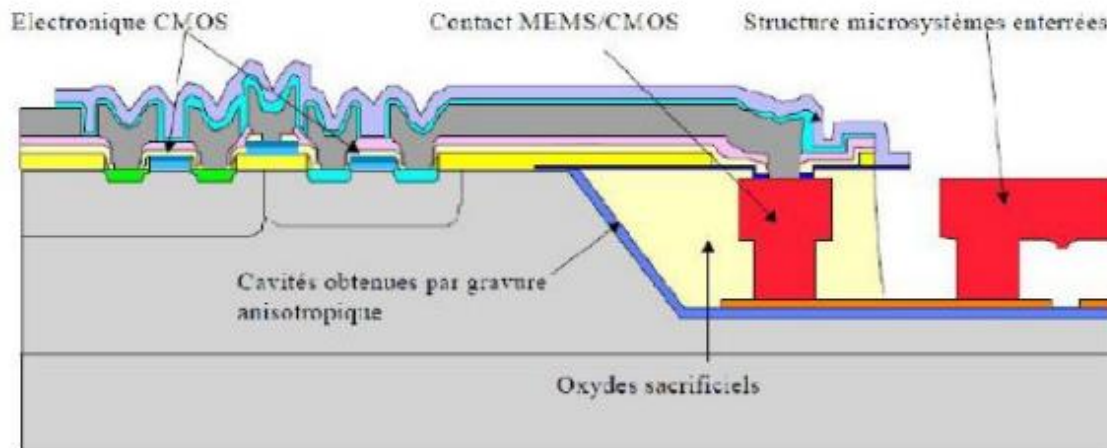
### I.13.3.1. Le Micro usinage en surface:

Cette approche est basée sur la gravure sélective des couches sacrées et structurales. Chaque couche peut être gravée pour lui donner une forme. Une fois l'empilement terminé, les divans sacrificiels sont dissous sélectivement par rapport aux divans structuraux, qui forment la structure auto-assemblée. Utilisés à l'origine dans la fabrication de circuits intégrés, les matériaux utilisés sont le poly-silicium, les oxydes et les nitrures de silicium. En utilisant la sélectivité de l'héliogravure entre ces matériaux, une libération de couche peut être accomplie, permettant la construction de structures tridimensionnelles auto-assemblées. La (figure I.35) représente un schéma de coupe d'une technologie de micro-usinage de surface.[27]



*Figure I.35: Micro-usinage de surface*

Le micro-usinage de surface consiste en une gravure anisotrope du silicium des tranchées dans lesquelles les structures suspendues et les pièces électroniques seront créées ultérieurement pour éliminer à terme les couches sacrificielles qui obstruaient les tranchées. Cette méthode présente l'avantage de blinder les structures en polysilicium avec des oxydes pendant les phases de production CMOS, permettant aux deux processus d'être largement indépendants (Figure I.36).[30]

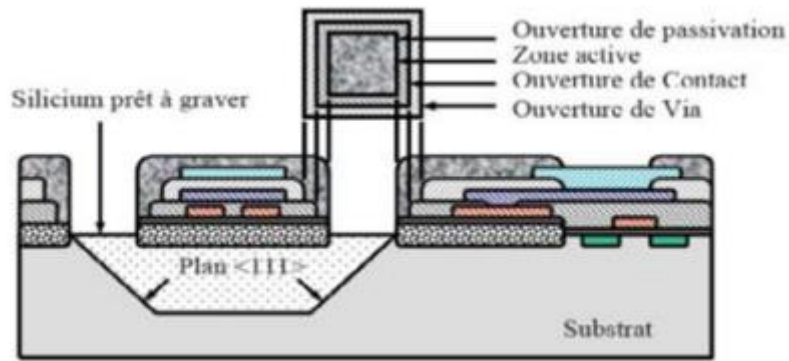


*Figure I.36: Exemple de schéma en coupe d'une technologie MEMS intégrés.*

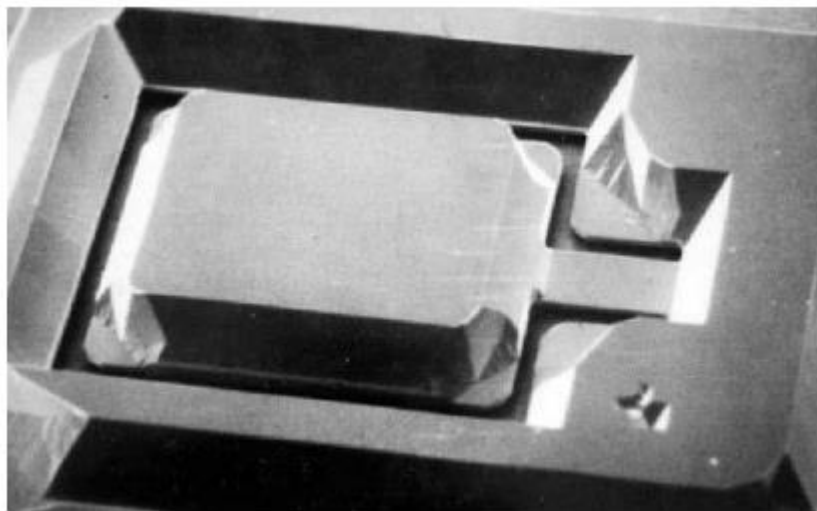
### **I.13.3.2. Micro usinage en volume:**

La gravure chimique anisotrope et sélective du silicium est à la base de cette technologie. Différentes solutions peuvent être utilisées pour cibler sélectivement certains plans cristallins de silicium afin de libérer des structures (membranes, poutres, ponts, etc.).

La figure I.37 décrit le processus de création de ce style de gravure. Une ou plusieurs couches structurales sont déposées et gravées à la surface du silicium, suivi d'un assaut anisotrope sur le silicium à l'issue du processus de fabrication pour libérer les structures mécaniques. Les délais de gravure sont importants (quelques heures), et les solutions employées sont difficiles à manipuler et polluent l'environnement. Le terme « volume » en micro-usinage volumique fait référence au fait que la gravure crée une cavité dans le volume du substrat (Figure I.38) [27].



*Figure I.37: Exemple de schéma en coupe d'une technologie CMOS compatible.*

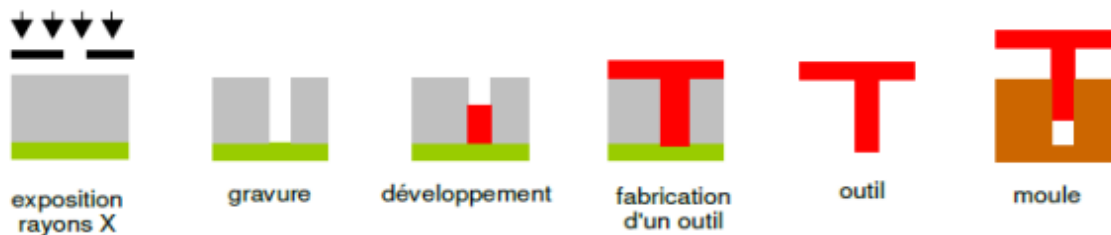


*Figure I.38: Exemple de structure micro usinée par gravure en volume..*

### **I.13.3. D'autres procédés:**

#### **I.13.3.1. LIGA:**

La technologie LIGA (Figure I.39) est étudiée séparément ; il permet de réaliser des structures de plusieurs centaines de micromètres d'épaisseur, ainsi que des micro-outils ou des moules métalliques. Ceux-ci vous permettent de reproduire une forme sur des matériaux plastiques selon vos besoins. [31]



*Figure I.39: Technologie LIGA*

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé une définition large des microsystèmes ainsi qu'une description de leurs techniques de production compatibles avec les normes de processus de la microélectronique, en mettant l'accent sur les technologies qui sont intégrées pour produire des microsystèmes monolithiques.

Ensuite, nous avons discuté des nombreuses applications technologiques contemporaines. Les microsystèmes bénéficient d'avancées technologiques telles que la réduction des effectifs, la réduction des coûts grâce à des techniques de fabrication collectives, l'augmentation des performances et des fonctionnalités, et donc des économies d'énergie.



**CHAPITRE II**

## **CHAPITRE II: LES MICROS-ACTIONNEURS**

### **Introduction :**

La variété des systèmes d'actionnement et de mesure a permis le développement d'un grand nombre de microsystèmes, principalement à des fins médicales, de défense et de sécurité.

Maintenance des équipements industriels. Les composants fluidiques tels que les vannes, les vannes et les pompes ont fait l'objet de recherches approfondies pour leur capacité à transférer de minuscules quantités de produits chimiques et sont fréquemment utilisés dans des applications biochimiques. Il existe un réel besoin de gérer des éléments infimes (préhension, transport, position, orientation, etc.) pour créer des microsystèmes supplémentaires.

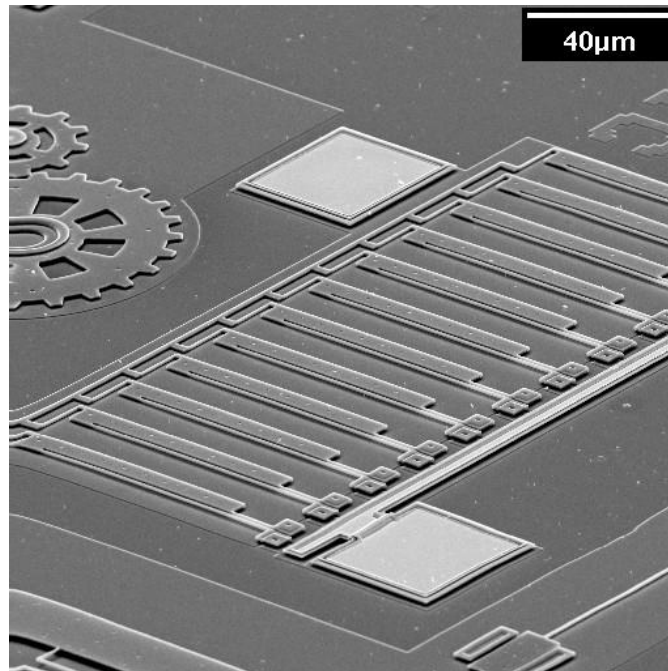
L'endoscopie est un autre domaine où les micro-actionneurs peuvent être d'une grande aide.

Enfin, une grande partie des microsystèmes complexes, qui combinent fréquemment de nombreuses technologies, traitent des défis de mobilité dans des espaces contraints.

### **II.1. Les Micro-actionneur :**

Un actionneur est un dispositif mécanique qui convertit une demande externe en une action physique (par exemple une force ou un déplacement). Les micro-actionneurs, comme les micro-capteurs, peuvent être classés selon différents critères :

- En fonction de l'effet physique employé pour réaliser la transduction du signal externe.
- Il existe deux types de micro-actionneurs basés sur la conception de la partie mécanique active :
  - Des microstructures rigides qui transmettent des efforts ou des couples par translation ou rotation
  - Microstructures déformables qui transmettent des forces ou des déplacements par déformation (Exemple d'actionneur thermique, Figure II.1).



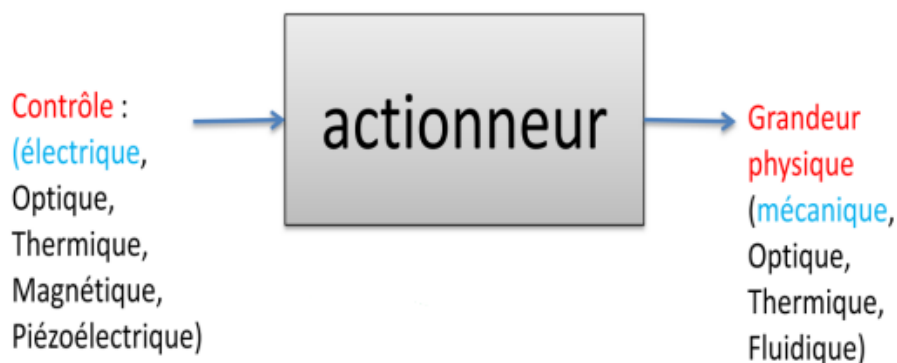
*Figure II.1: Exemple d'un réseau de actionneurs électrothermiques.*

## **II.2. Le rôle d'un actionneur :**

Le rôle d'un actionneur est de réguler un processus à partir des commandes d'un système d'information. Il gère les échanges énergétiques des organes clés du processus.

Un micro-actionneur est prévu pour exécuter les mêmes opérations à plus petite échelle. HAS Nous reconnaissons aujourd'hui que la création de micro-actionneurs présente des enjeux importants quant à l'évaluation de leur efficacité en termes d'efficacité énergétique ou de performances de mouvement, présentant souvent un modeste compromis entre précision, amplitude et puissance. Le développement des microsystèmes favorise le développement de micro-actionneurs fiables et performants qui permettent d'accéder à de nouvelles applications.

### **II.2.1. Représentation schématique d'un actionneur:[15]**



*Figure II.2: Représentation schématique d'un actionneur.*



### II.2.2. Exemples d'actionneurs :

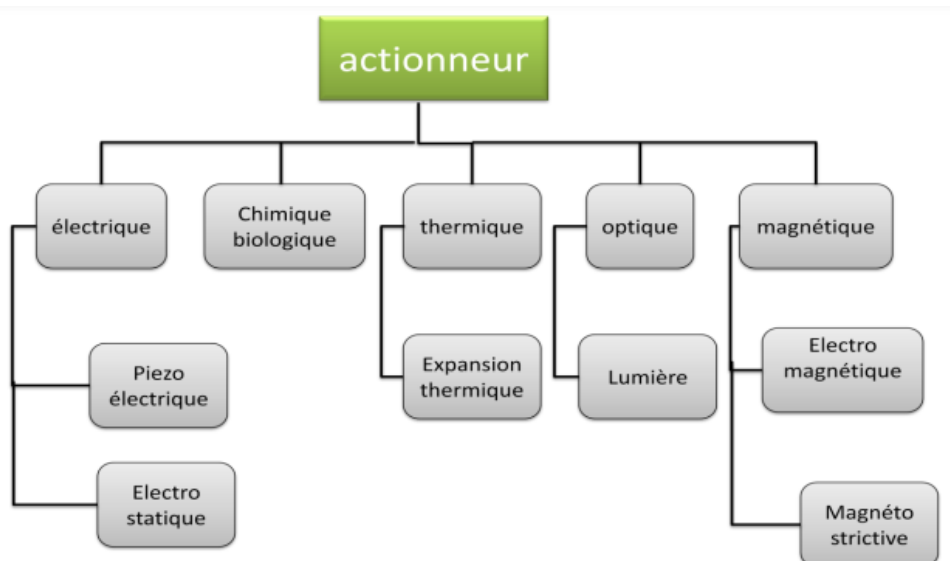
- Valve, pompe
- Commutateur, interrupteur
- Haut-parleur
- Résonateur
- Tête d'imprimante à jet d'encre
- Tête d'écriture magnétique.

### II.3. Les différents types d'actionnements:

Les actionneurs sont classés en plusieurs catégories. Chacun se rapporte à une certaine micro pompe. Chaque type d'actionneur a des caractéristiques d'injection de volume distinctes basées sur le déplacement du diaphragme, le temps de réaction, l'énergie consommée et la tension d'entrée appliquée.

L'actionneur approprié est déterminé par l'application. Cela signifie qu'il est extrêmement important de trouver un équilibre entre la taille, le débit, la force, le mouvement et la consommation d'énergie. La figure II.3 décrit les différents actionneurs découverts dans la littérature [32]

Les énergies thermique, électrique, magnétique, optique et acoustique peuvent toutes être utilisées pour agir



*Figure II.3 : Types d'actionneur.*

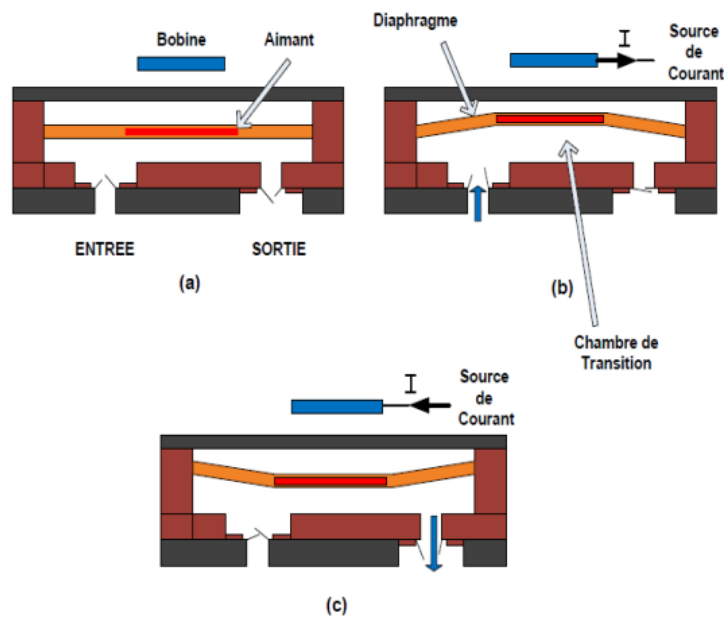
### II.3.1. Actionnement magnétique:

Une bobine est alimentée pour produire un champ électromagnétique qui repousse ou attire un aimant permanent fixé à une membrane (diaphragme). Les forces attractives ou répulsives créées par le conducteur sont proportionnelles au courant. Utilisé dans la bobine (Figure II.4).

La force magnétique ( $F_m$ ) entre un fil de longueur ( $dl$ ) passé par l'équation d'un courant et un aimant permanent (induction magnétique)

$$\vec{F}_m = i \int \vec{B} \vec{dl}$$

Où  $B$  représente le champ magnétique et  $I$  représente le courant électrique appliqué.



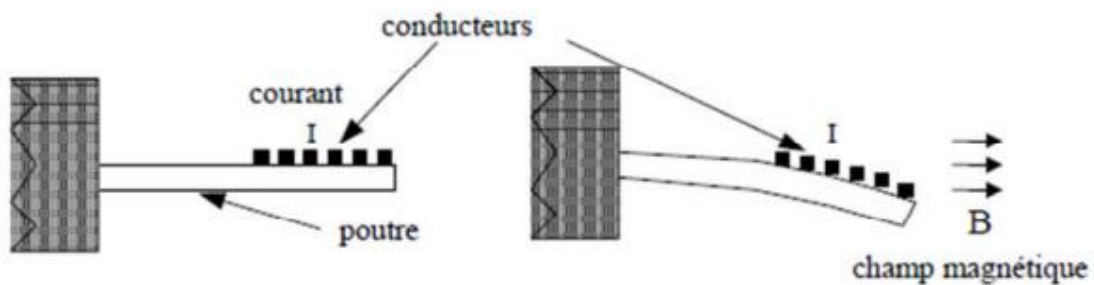
**Figure II.4:** Micro pompe à un actionneur électromagnétique.

- (a) état initial (le courant est nul);
- (b) déflexion de la membrane vers le haut (aspiration du liquide)
- (c) déflexion de la membrane vers le bas (pompage).[33]

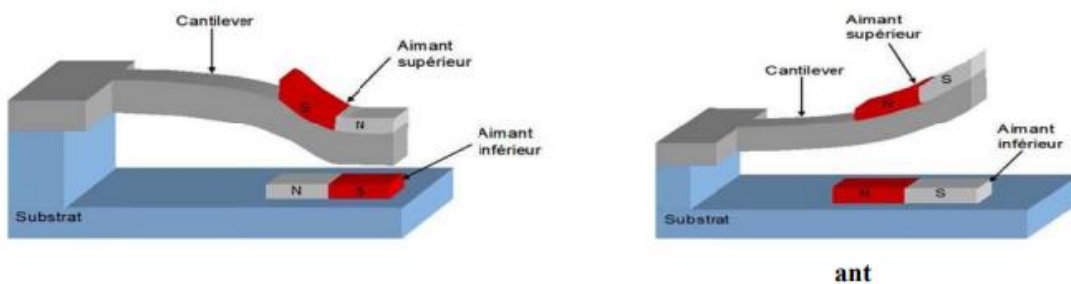
Lors de la conversion de l'énergie électromagnétique en mouvement mécanique, cet actionneur électromagnétique a un rendement élevé (temps de réaction rapide). Les avantages de l'actionneur électromagnétique sont la déviation élevée du diaphragme et la capacité d'atteindre des fréquences de vibration élevées, d'où une grande quantité de liquide. Étant donné que les champs électromagnétiques se forment et se dissipent rapidement, ces appareils peuvent fonctionner à des fréquences élevées [31].

Une approche d'actionnement est basée sur la création d'un champ magnétique continu  $B$  par un aimant agissant sur un conducteur parcouru par un courant électrique.

Cette interaction produit la force de Laplace, qui permet la flexion et donc la déformation d'une poutre. Par exemple:



*Figure II.5: Principe de l'actionnement électromagnétique.*



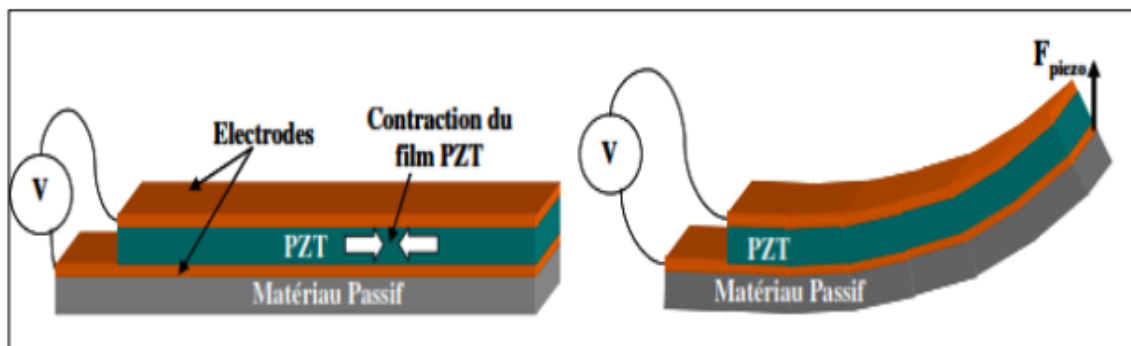
*Figure II.6: Principe de l'actionnement électromagnétique.*

### II.3.2. Actionnement magnétostrictif:

Une autre forme d'actionneur magnétique utilise le principe de magnétostriction, qui est provoqué par un champ magnétique externe. Contrairement à un actionneur électromagnétique, ce type d'actionneur est constitué de matériaux particuliers (ferromagnétiques) qui se déforment sous l'impact d'un champ magnétique sans introduction de courant. Les capteurs de champ magnétique, la mémoire magnétique et les applications de déplacement magnétique utilisent tous des matériaux magnétostrictifs. Les déformations de ces matériaux magnétostrictifs sont faibles, ce qui est un inconvénient [1].

### II.3.3. Activation Piézoélectrique:

La propriété de certains matériaux de se polariser électriquement lorsqu'ils sont soumis à une force mécanique (effet direct) et de se déformer lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique (effet inverse) est appelée piézoélectricité. En pratique, il déploie un champ électrique sur une structure mobile qui contient une poutre. Le déplacement de la structure est provoqué par l'application d'une couche de matériau piézoélectrique. Une direction déterminée par le signe de polarisation (Figure II.7). En inversant la polarité de Lorsque'une contrainte est appliquée à la couche, celle-ci se rétracte, poussant le microfaisceau à se déplacer. Il retrouvera son ancien emplacement. Cet attribut est utilisé pour créer des micro-interrupteurs. Augmenter la constante de rigidité de la structure. De plus, à des tensions d'activation autour de 20 V, les périodes d'activation de ce type de structure sont assez courtes, de l'ordre de la microseconde. Le PZT (Lead Zirconate Titanate) a été le principal matériau piézoélectrique utilisé jusqu'à présent en raison de son coefficient piézoélectrique élevé [34]



**Figure II.7:** Schéma de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique de type bilame.

### II.3.4. Actionnement électrostatique:

L'actionneur électrostatique fonctionne en utilisant la force d'attraction entre les charges qui se produisent entre deux plaques parallèles, dont l'une correspond à une électrode fixe et l'autre à une électrode mobile (Figure II.8). Lorsqu'une tension électrique est appliquée aux bornes de ces deux plaques, la force électrostatique ( $F_e$ ) générée force la membrane de la micro-pompe à se déplacer. Cette force est fournie par

$$F_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 A E^2$$

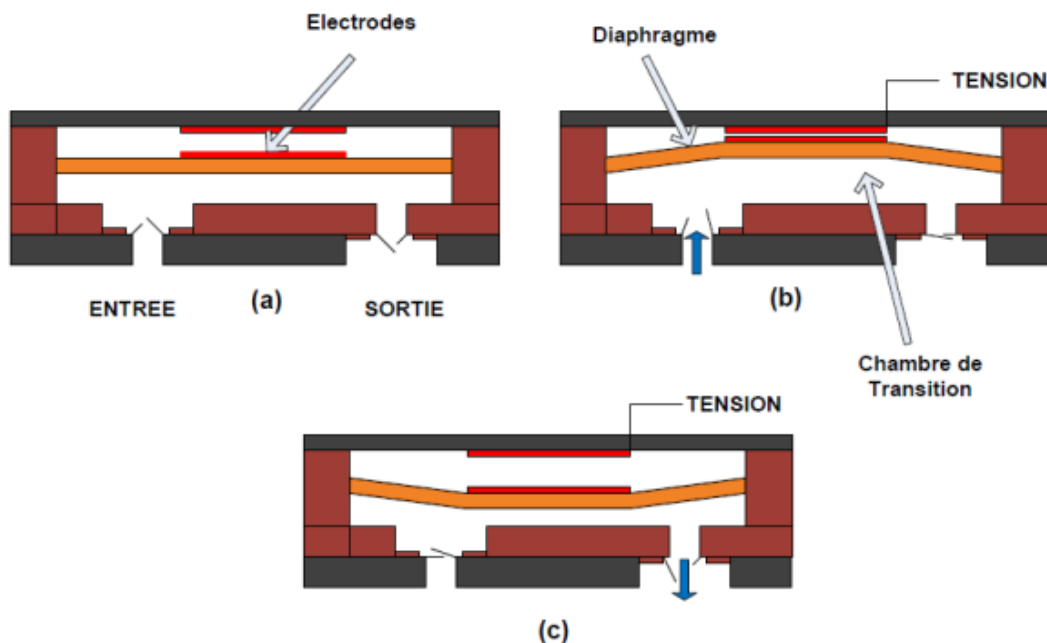
$\varepsilon_0$  est la permittivité de l'espace libre

$E$  est le champ électrique appliqué

$A$  est la surface entre les deux plaques parallèles. Lorsque la tension électrique d'actionnement serait diminuée, la membrane revient à sa position initiale.

Voici les principaux avantages des micro-pompes électrostatiques :

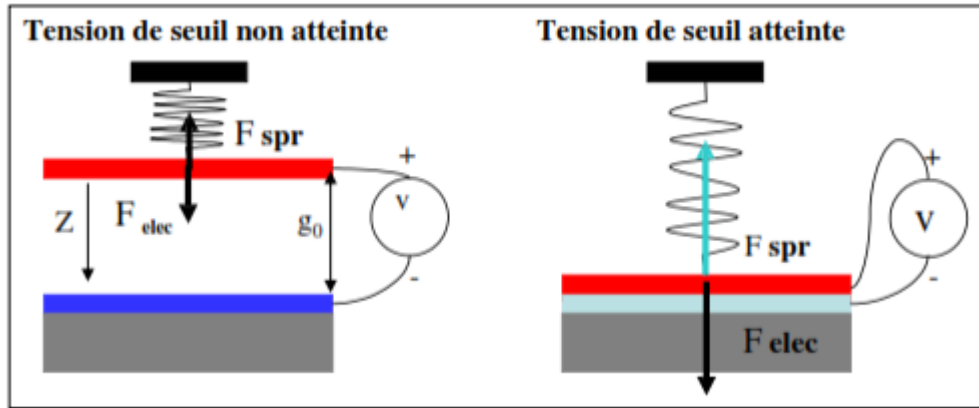
- Faible consommation d'énergie.
- Temps de réaction plus rapide que les autres types de micro-pompes.
- La déformation du diaphragme est simple à gérer.



**Figure II.8:** Fonctionnement d'une micro pompe à actionneur électrique.

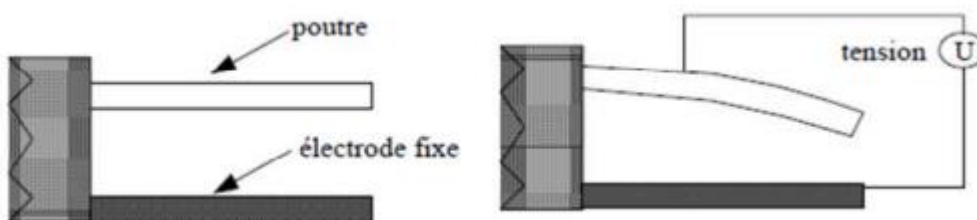
- (a) condition de démarrage (la tension est nulle)
- (b) déviation de la membrane vers le haut (aspiration de liquide)
- (c) déviation de la membrane vers le bas (pompage).

La Figure II.9 décrit le fonctionnement d'un actionneur électrostatique [9].



**Figure II.9:** Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un actionneur électrostatique.

Lorsque les électrodes sont polarisées, une différence de potentiel se forme entre elles et l'électrode mobile est attirée électro-statiquement par une force connue sous le nom de  $F^{\text{elec}}$ . La rigidité de la poutre mobile résiste à ce déplacement sous la forme d'une force de rappel  $F^{\text{spr}}$  qui est considérée comme linéaire avec le déplacement et peut être décrite comme l'effet d'un ressort.

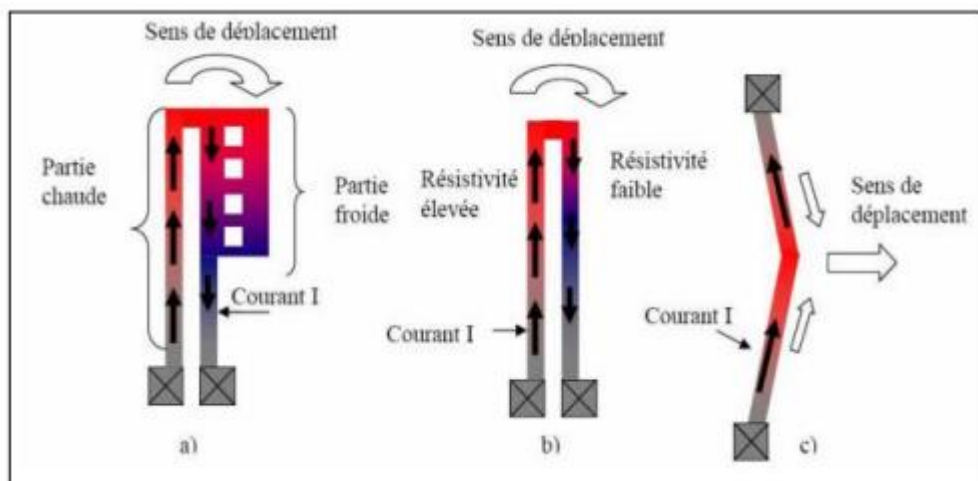


**Figure II.10:** Principe de fonctionnement de MEMS – RF.

### II.3.5. Actionnement thermique :

Lorsque la température d'un objet change, ses dimensions changent proportionnellement à son coefficient de dilatation thermique. Cela explique pourquoi, par exemple, verser un liquide chaud dans un verre froid peut entraîner des fractures. Les scientifiques utilisent ce phénomène pour contrôler le mouvement d'acteurs particuliers à l'échelle du micromètre. Un composant mécanique sera chauffé, provoquant le déplacement du matériau. Cependant, dans la grande majorité des cas, une simple augmentation de la température se traduit par une légère variation de volume. De ce fait, la structure de l'actionneur doit être optimisée. Dans la plupart des cas, les fondateurs utiliseront l'une des quatre stratégies énumérées ci-dessous.

[35]

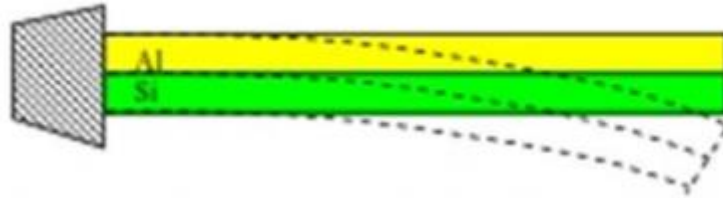


*Figure II.11: Schéma de fonctionnement de différents actionneurs thermiques dans le plan.*

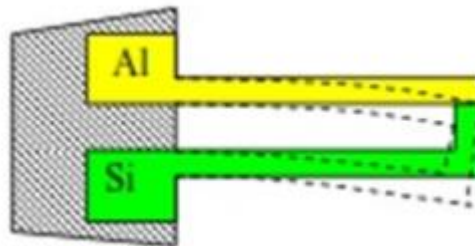
#### II.3.5.1. Utilisez les disparités des coefficients de dilatation thermique à votre avantage:

La première approche consiste à joindre deux matériaux qui ont des coefficients de dilatation différents. Ceux-ci sont connus sous le nom d'actionneurs bimétalliques. Si nous voulons que la partie mécanique monte, nous devons mettre le matériau avec le coefficient de dilatation thermique le plus élevé en bas. Un actionneur bimétallique, par exemple, pourrait être composé d'une couche inférieure de dioxyde de silicium et d'une couche supérieure de chrome. Lorsque l'ensemble est chauffé, la couche inférieure a un changement volumétrique plus important que la couche supérieure, provoquant une flexion, c'est-à-dire que l'actionneur se plie pour compenser la différence. Le problème est que cette technologie nécessite des

procédures de production sophistiquées en raison de la possibilité de séparation des deux matériaux. [35]



**Figure 41** : déformation d'un bilame thermique Si/Al

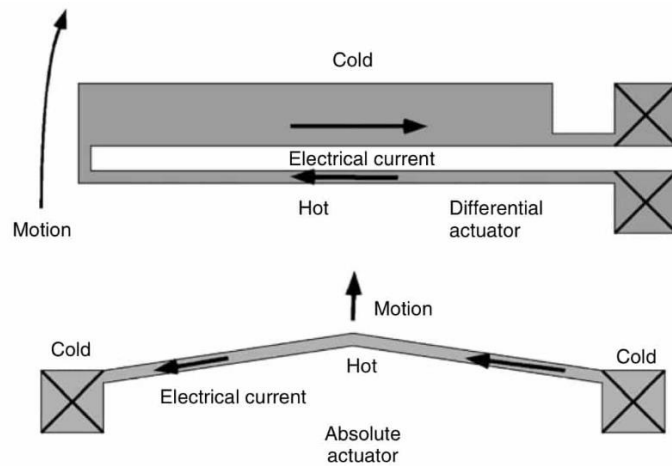


**Figure 403**: Schéma d'un actionneur thermique se déformant dans le plan par une différence de matériau des deux bras.

L'actionneur thermique traditionnel est le deuxième système. Contrairement au premier, un seul matériau est utilisé, ce qui entraîne un seul coefficient de dilatation thermique, bien que de nombreux composants soient produits. Le même matériau est vu dans le plan opposé, mais avec deux branches plus fines. La jambe fine chauffera plus rapidement, pliant l'actionneur. De ce fait, il fonctionne sur le même principe qu'un actionneur bimétallique, mais avec moins de limitations technologiques.

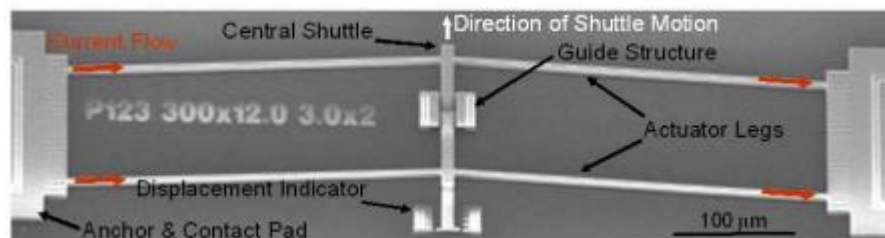
Les nouveaux micro-actionneurs thermiques classiques utilisent une construction considérablement modifiée qui comprend deux bras minces et un bras épais qui n'est pas traversé par le courant électrique. L'avantage de cette construction est qu'elle permet des mouvements plus importants tout en dépensant moins d'énergie. On parle souvent d'un déplacement de 12 m pour 30 mW. Les avantages des actionneurs thermiques bimétalliques et traditionnels, ainsi que la possibilité de plier des dizaines de micromètres avec une puissance inférieure à 50 mW. Les actionneurs électrostatiques ont des mouvements relativement limités, souvent inférieurs à 10 m. Les températures obtenues lors du mouvement de l'actionneur thermique peuvent dépasser 800°C dans des circonstances sévères.[36]





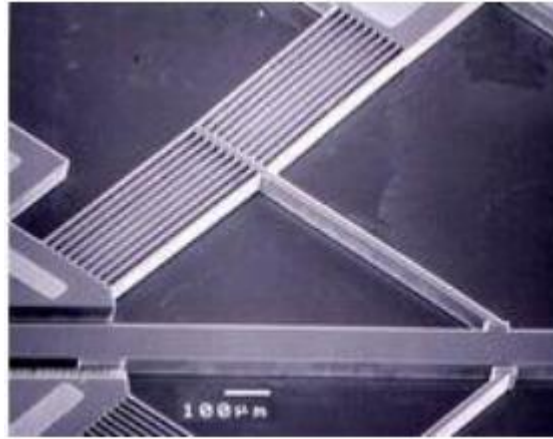
**Figure II.14:** Schémas des actionneurs thermiques absolus et différentiels.

La méthode du faisceau courbe est la troisième technique. Il consiste à prendre en sandwich une structure en V (la poutre) entre deux points de contact ancrés dans le substrat. Les deux extrémités de cette structure sont refroidies par le substrat et ont donc une température plus basse que le milieu de la poutre. L'électricité sera fournie à l'un des points de contact et traversera la poutre courbée jusqu'à l'autre. La température de la structure augmentera, provoquant le déplacement de l'actionneur dans la direction de la pointe du V. La courbure permet donc de guider le mouvement de flexion dans la direction souhaitée.[36]



**Figure II.15:** Microactionneur thermique à poutres courbées entraînées électriquement sous le microscope.

Enfin, la quatrième option est le micro-actionneur thermomécanique (Thermomechanical In-plane Microactuator, ou TIM), qui fonctionne sur les mêmes principes que la poutre courbe. De fines branches incurvées reliées à une poutre centrale sont légèrement incurvées et fixées à un point d'ancrage. Lorsque le courant traverse les branches, l'élévation de température les fait bouger et déplace ainsi le faisceau. Cette approche a l'avantage d'offrir plus de souplesse. Les efforts mis en jeu peuvent être modifiés pour augmenter ou réduire le déplacement de la poutre centrale en modifiant le nombre de branches.[37]



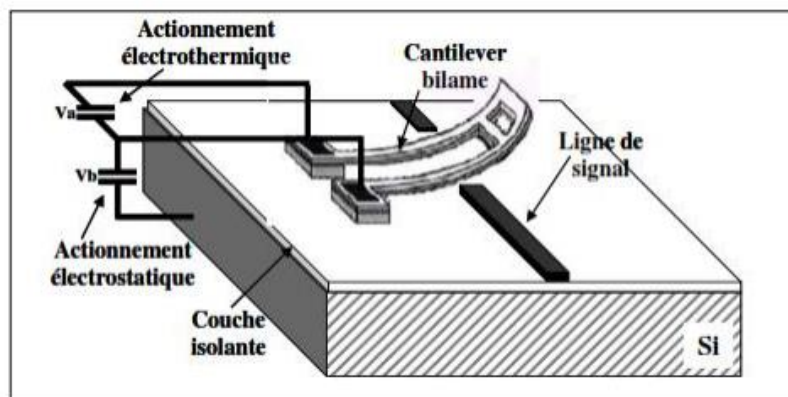
**Figure II.16:** Micro-actionneur thermomécanique

### II.3.5.2. Exemples de composants

Nous donnons quelques exemples de structures construits avec cette forme d'actionnement.

#### II.3.5.2.a. Déplacement hors plan :

La figure II.17 représente une structure réalisée avec un bilame en forme de U mono-poutre encastrée et une activation hybride. La poutre en porte-à-faux est composée de deux couches : oxyde de silicium et siliciure de tantale (TaSi). Les contraintes restantes de ces couches distinctes induisent un flambage précoce, ce qui assure une isolation efficace. Le siliciure de tantale ayant un coefficient de dilatation thermique plus élevé que l'oxyde de silicium, lorsqu'un courant traverse la structure, la température s'élève par effet Joule, provoquant un déplacement vertical dans le sens de la ligne à commuter. Le contact électrique est créé lorsque la température est suffisamment élevée.[15]

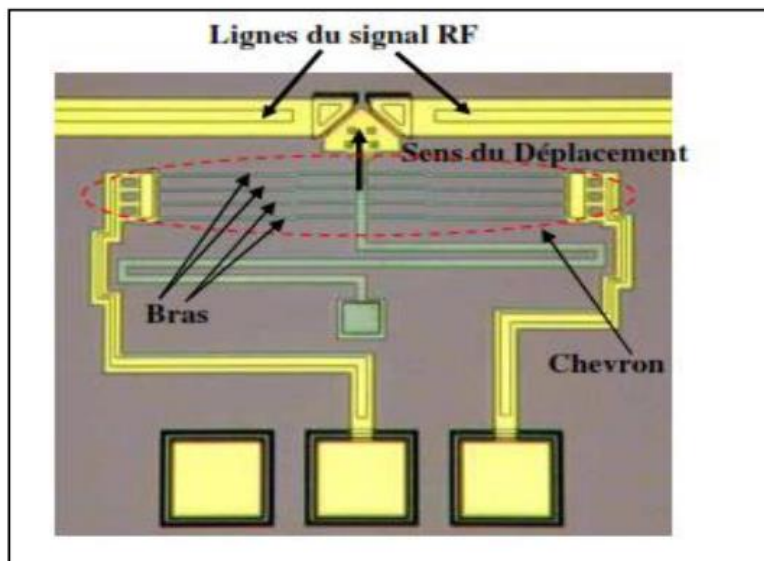


**Figure II.17:** Micro-relais à actionnement électrothermique et déplacement hors plan

Dans ce cas, l'actionnement thermique est complété par un actionnement électrostatique, ce qui signifie que lorsque la poutre atteint son emplacement de contact, une différence de potentiel est prévue entre le porte-à-faux et une électrode d'actionnement placée sur le substrat pour l'y maintenir. L'actionnement thermique peut maintenant être stoppé en interrompant la propagation du courant dans le cadre bimétallique. L'attrait de ce type d'actionnement hybride est la réduction de la consommation de courant élevée nécessaire pour maintenir le faisceau dans son état bas.

### **II.3.5.2.b. Déplacement Latéral :**

La figure II.18 représente une structure en poly-silicium sous la forme d'un chevron qui permet un mouvement mécanique dans le plan. Dans cette forme, la distorsion augmente proportionnellement à l'angle formé par les bras. La dilatation thermique provoque la dilatation du matériau lorsqu'un courant électrique le traverse. Cela provoque l'extension des bras, entraînant un déplacement latéral jusqu'à ce qu'ils entrent en contact avec la ligne à commuter.[18]



**Figure II.18:** Micro-relais à actionnement électrothermique et déplacement dans le plan .

L'actionnement de ce relais micro-thermique est assuré par une combinaison de quatre bras en chevron couplés ensemble comme illustré sur l'image. (Figure II.18), l'association de ces bras n'augmente pas le déplacement dû à l'échauffement, mais améliore fortement la force de contact, impliquant un meilleur contact, ici de type ohmique, cette amélioration de la résistance de contact se traduisant par une diminution de pertes d'insertion. Cependant, les

performances de ce type de relais sont limitées par le flambage structurel lors du fonctionnement à des températures élevées [18].

### **Conclusion:**

Ce panorama des actionneurs rappelle brièvement les modes de fonctionnement des grands types de micro-actionneurs, ainsi que les utilisations spécifiques pour chacun d'entre eux. Plusieurs types Cette comparaison montre que chaque technologie a des dimensions idéales en termes d'efficacité énergétique pour un système spécifique. On peut également montrer que l'efficacité de chaque étape change de manière significative en fonction du type d'actionnement.

Nous proposons deux tableaux comparatifs qui couvrent les paramètres, les avantages et les inconvénients de chaque forme d'actionnement. [15]

**Tableau 2:** cahiers de charges des différents types d'actionnements.

	<b>Actionnement électrostatique</b>	<b>Actionnement magnétique</b>	<b>Actionnement piézoélectrique</b>	<b>Actionnement thermique</b>
<b>Consommation</b>	+++	++	+++	---
<b>Amplitude Déplacement</b>	+	+++	<b>Moyenne</b>	<b>Grande</b>
<b>Force de contact</b>	+++	++	+	++
<b>Tension d'actionnement</b>	-	+++	++	+++
<b>Sensibilité à T°</b>	+++	+++	+	+
<b>Temps commutation</b>	+++	++	++	--
<b>Intégration</b>	+++	---	+	+
<b>Collage</b>	---	+++	+++	+++

**Tableau 3:** avantages et inconvénients des différents types d'actionnement.

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Electrostatique</b>	Faible consommation Intégration aisée Commutation rapide	Tension d'actionnement importante Problème de collage Faible densité d'énergie
<b>Magnétique</b>	Déplacement important Densité d'énergie importante Intrinsèquement bistable	Intégration difficile Consommation importante
<b>Thermique</b>	Forte densité énergétique Intégration aisée	Relativement lent Consommation importante
<b>Piézoélectrique</b>	Faible consommation Intégration aisée Potentiellement bistable	Sensible à la température



**CHAPITRE III**

## **CHAPITRE III : MATERIAUX DE BASE POUR LA FABRICATION DE MEMS**

### **Introduction :**

Notre micro-actionneur sera composé de pièces mécaniques qui se déplacent ou se déforment en réponse à une force électrothermique. Dans le dernier chapitre, nous nous sommes penchés sur des systèmes rudimentaires constitués de micro-poutres rigides. Cette dernière est déterminée par la forme géométrique des poutres ainsi que les qualités des matériaux. Des fluctuations importantes de ces mêmes qualités, telles que le module de Young et les propriétés thermiques, se retrouvent au cours des processus de production. Dans cette vision des choses, nous expliquerons synthétiquement certains matériaux nécessaires à nos recherches, en mettant l'accent sur les matériaux poly-silicium et Half-Heusler employés à l'intérieur des microsystèmes, et leurs propriétés.

### **III.1. Matériaux utilisés en microsystèmes compatibles avec les circuits intégrés :**

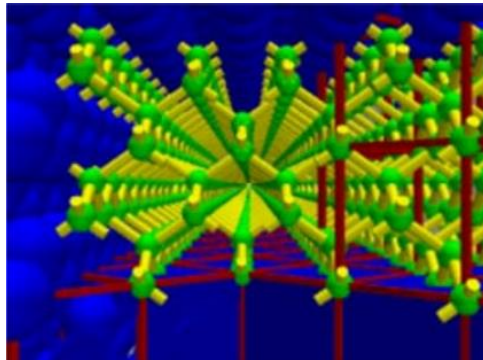
Le procédé de production des dispositifs de microsystèmes est basé sur des processus de fabrication de circuits intégrés réguliers. Le silicium (Si) et ses dérivés tels que l'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), le nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), le carbure de silicium (SiC) et les oxy-nitrures servent de base ( $\text{SiN}_x\text{O}_y$ ). Ces matériaux sont déposés sous la forme d'une couche mince dont l'épaisseur varie de 10 Angströms à plusieurs dizaines de micromètres.

Des métaux tels que l'aluminium, le titane, l'or, le chrome, le platine, l'argent, le tungstène ou le cuivre peuvent également être utilisés comme connecteurs électriques ou comme surface de fixation biologique.

#### **III.1.1. Silicium :**

Le silicium est un matériau fantastique dont les qualités justifient son application préférée. Pour commencer, c'est le matériau de choix pour les circuits intégrés, permettant d'utiliser des procédés de fabrication de circuits intégrés. Il est accessible dans sa forme la plus pure ("neuf neuf": 99,999999999 pour cent de pureté). Ses caractéristiques sont largement connues. Il est capable d'intégrer de l'électronique. Il possède des qualités extraordinaires, notamment une résistance élevée (limite élastique de 7109 N/m<sup>2</sup> contre 4,2 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup> d'acier) et une faible densité (2,3 g/cm<sup>3</sup> contre 7,9 g/cm<sup>3</sup> d'acier). C'est un semi-conducteur (sa résistivité varie entre 0,5.cm (dopé) et 230 k.cm). C'est aussi un excellent conducteur thermique. Cependant, il est cassant, ce qui pose certains problèmes précautions de fabrication des MEMS Il n'est pas

optiquement actif, ce qui rend problématique l'émission de lumière. Le silicium est uniquement utile pour détecter la lumière.[15]



*Figure III.1: Réseau cristallin du Silicium.*

Le silicium peut être trouvé sous trois formes différentes dans les applications : monocristallin, polycristallin (également connu sous le nom de polysilicium) et amorphe. Le silicium polycristallin et amorphe est souvent déposé en couches minces de moins de 5 m d'épaisseur. Leurs caractéristiques, identiques à celles des monocristaux, sont déterminées par le processus de dépôt. Ceci est particulièrement vrai pour les contraintes mécaniques résiduelles, qui peuvent être assez élevées (des centaines de MPa) si un traitement de recuit à haute température ( $>900^{\circ}\text{C}$ ) n'est pas effectué. Les substrats cristallins sont proposés sous forme de galettes circulaires de 100 mm de diamètre (525  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) ou de 150 mm de diamètre (650  $\mu\text{m}$  d'épaisseur). Des largeurs plus importantes (200 ou 300 mm) pour les MEMS ne sont pas encore économiquement justifiées. Le réseau cristallin de silicium est cubique et les tranches disponibles sont généralement orientées selon le plan (1, 0, 0) et dopées n ou p. Le type spécifie le plan cristallin de la face plane de la plaquette Si.

### **III.1.2. Polymères :**

Malgré le fait que le secteur de l'électronique offre des économies d'échelle pour l'activité du silicium, le silicium cristallin reste un matériau compliqué et quelque peu coûteux à produire. Les polymères, en revanche, peuvent être produits en masse en grand nombre et avec une large gamme de propriétés matérielles. Les dispositifs MEMS sont particulièrement bien adaptés aux applications de micro-traitement car ils peuvent être fabriqués à partir de polymères en utilisant des procédures telles que le moulage par injection, le gaufrage ou la stéréo-lithographie. Les cartouches de test sanguin jetables sont des exemples de fluidique [38].

### **III.1.3. Céramiques :**

A température normale, une matière céramique est solide et ni métallique ni biologique. Les objets en céramique sont créés par solidification d'une pâte plastique humide à haute température ou agglutination par chauffage d'une poudre sèche préalablement compactée sans passer par une phase liquide ; par conséquent, le nom "céramique" fait référence aux articles eux-mêmes [38]. Ce sont des oxydes, des carbures, des nitrures et d'autres matériaux.

L'oxyde d'aluminium est un matériau céramique fascinant en raison de sa dureté inhérente, de son inertie chimique, de sa stabilité à haute température et de son isolation électrique et thermique. Son utilisation comme revêtement sur des pièces métalliques permet d'ajouter des qualités utiles (résistance à l'usure et aux agressions chimiques, isolation thermique et électrique) pour des applications à fortes contraintes dans les domaines mécanique, aéronautique et médical [39] [39]

De plus, ce matériau présente des caractéristiques bien adaptées à son application comme diélectrique dans les composants MEMS en couches de 0,2 µm à 1 µm déposées à basse température (300°C).

### **III.1.4. Métal :**

Les métaux peuvent également être utilisés pour fabriquer des composants MEMS. Bien que les métaux n'aient pas tous les avantages mécaniques du silicium, ils peuvent fournir un très haut niveau de fiabilité dans les limites des MEMS. La galvanoplastie, la pulvérisation sous vide et la pulvérisation peuvent toutes être utilisées pour appliquer des métaux. L'or, le nickel, l'aluminium, le cuivre, le chrome, le titane, le tungstène, le platine et l'argent sont tous des métaux couramment utilisés [39].

## **III.2. Le Silicium et ses caractéristiques :**

Le silicium (Si) est le matériau le plus souvent utilisé dans la production de microsystèmes puisqu'il est :[40]

- Très grande pureté (99,9999999%)
- Facilement micro usiné
- Fortement piézorésistif
- Semi-Conducteur
- Très bonnes propriétés électriques
- Très bonnes propriétés mécaniques
- Très répandu (fabrication de Ci)



### III.3. Généralités sur les half-Heusler :

L'une des familles de matériaux les plus fascinantes a une histoire qui remonte à 1903, lorsque Fritz Heusler a découvert qu'un alliage de composition  $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  agit comme un ferromagnétique malgré le fait que ses composants constitutifs ne sont pas magnétiques [41]. Cette substance étonnante et ses homologues, qui se comptent aujourd'hui par milliers, sont appelés composés ou alliages de Heusler. Ce sont des matériaux ternaires métalliques ou semi-conducteurs ayant une stœchiométrie de 1:1:01 (appelé aussi "SemiHeusler") ou 2:1:01 (appelé aussi "FullHeusler"). Les attributs de nombreux composés de Heusler peuvent être anticipés simplement en comptant la quantité d'électrons de valence [42].

#### III.3.1. Alliages Heusler :

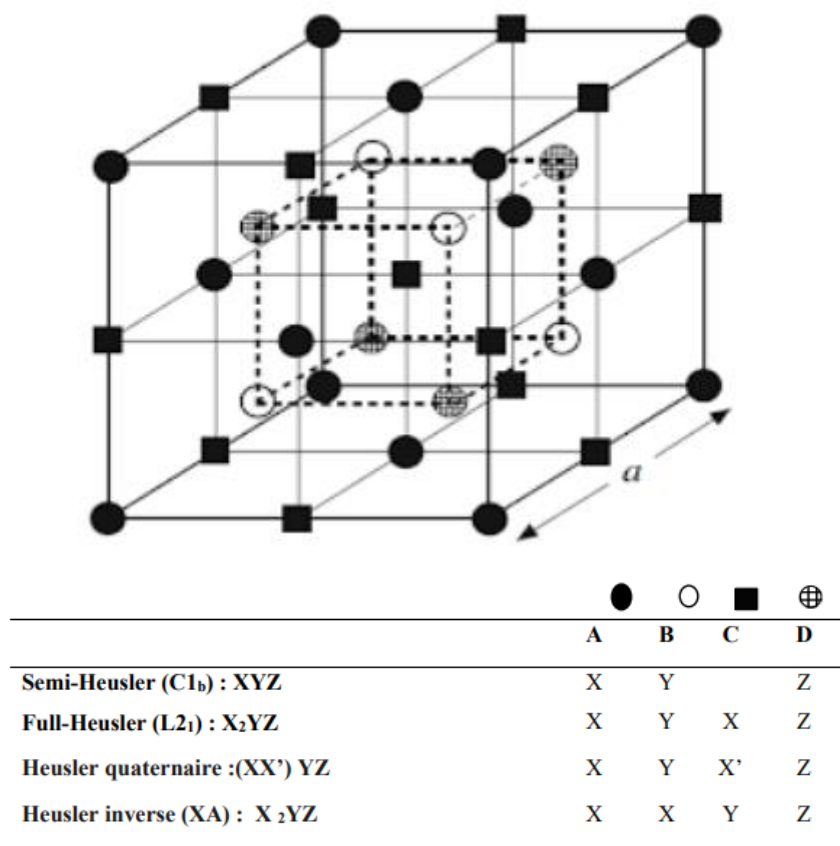
La Figure III.2 décrit les nombreuses combinaisons de composants qui peuvent être utilisées pour créer ces matériaux. En effet, en combinant les différents composants selon le schéma de couleurs, une grande variété d'alliages Heusler peut être produite.[43]

**X<sub>2</sub>YZ Heusler compounds**

H 2.20																	He	
Li 0.98	Be 1.57											B 2.04	C 2.55	N 3.04	O 3.44	F 3.98	Ne	
Na 0.93	Mg 1.31											Al 1.61	Si 1.90	P 2.19	S 2.58	Cl 3.16	Ar	
K 0.82	Ca 1.00	Sc 1.36	Ti 1.54	V 1.63	Cr 1.66	Mn 1.55	Fe 1.83	Co 1.88	Ni 1.91	Cu 1.90	Zn 1.65	Ga 1.81	Ge 2.01	As 2.18	Se 2.55	Br 2.96	Kr 3.00	
Rb 0.82	Sr 0.95	Y 1.22	Zr 1.33	Nb 1.60	Mo 2.16	Tc 1.90	Ru 2.20	Rh 2.28	Pd 2.20	Ag 1.93	Cd 1.69	In 1.78	Sn 1.96	Sb 2.05	Te 2.10	I 2.66	Xe 2.60	
Cs 0.79	Ba 0.89			Hf 1.30	Ta 1.50	W 1.70	Re 1.90	Os 2.20	Ir 2.20	Pt 2.20	Au 2.40	Hg 1.90	Tl 1.80	Pb 1.80	Bi 1.90	Po 2.00	At 2.20	Rn
Fr 0.70	Ra 0.90																	
		La 1.10	Ce 1.12	Pr 1.13	Nd 1.14	Pm 1.13	Sm 1.17	Eu 1.20	Gd 1.20	Tb 1.10	Dy 1.22	Ho 1.23	Er 1.24	Tm 1.25	Yb 1.10	Lu 1.27		
		Ac 1.10	Th 1.30	Pa 1.50	U 1.70	Np 1.30	Pu 1.28	Am 1.13	Cm 1.28	Bk 1.30	Cf 1.30	Es 1.30	Fm 1.30	Md 1.30	No 1.30	Lr 1.30		

**Figure III.2:** Tableau périodique des éléments. Le grand nombre de matériaux Heusler peut être formé par la combinaison des différents éléments selon le schéma de couleurs.

Il existe différents types d'alliages Heusler décrits dans la littérature, tels que la figure. III.3 représente les types d'alliages suivants : [43]



**Figure III.3 :** Représentation schématique des différentes structures des composés Heusler.

### III.3.2. Alliages Heusler inverses :

Les composés inverses de Full-Heusler ont la formule  $X_2YZ$ , où la valence de l'atome de métal de transition X est inférieure à celle de l'atome de métal de transition Y. En conséquence, les composés inverses de Heusler cristallisent dans la structure XA ou X, où la séquence d'atomes est X-X-Y-Z et le prototype est  $Hg_2TiCu$  [42]

### III.3.3. Alliages Heusler quaternaires :

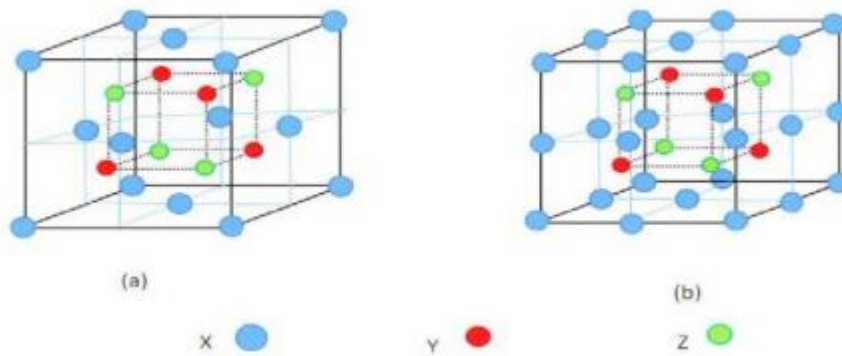
Une autre classe de Heuslers de type  $LiMgPdSn$  est les Heuslers quaternaires, également connus sous le nom de composés Heusler de type  $LiMgPdSb$  [41]. Ce sont des composés quaternaires répondant à la formule  $(XX')YZ$ , dans laquelle X, X' et Y sont des atomes de métal de transition. La valence de X' est inférieure à celle de X, et la valence de l'élément Y est inférieure à celle de X et de X'.

### III.3.4. Alliages Full-Heusler :

Le type Full-Heusler  $X_2YZ$  cristallise dans le groupe d'espace cubique  $Fm-3m$  (groupe d'espace N° 225) en utilisant  $Cu_2MnAl$  (L21) comme prototype [43]. Les atomes X sont en position 8c ( $1/4, 1/4, 1/4$ ), les atomes Y sont en position 4a ( $0, 0, 0$ ) et les atomes Z sont en position 4b ( $1/2, 1/2, 1/2$ ). L'atome X occupe deux des quatre sous-réseaux fcc interpénétrés dans cette structure. Les composants les moins et les plus électropositifs se combinent pour produire une structure de sel gemme (atomes Y et Z). Ces éléments ont des coordonnées octaédriques en raison de la nature de leur interaction. L'atome X, quant à lui, occupe toutes les positions tétraédriques. Cette structure est également connue sous le nom de structure de blende de zinc. Une superstructure CsCl est fréquemment utilisée pour caractériser les composés de Heusler dans la littérature.

### III.3.5. Alliages Semi Heusler :

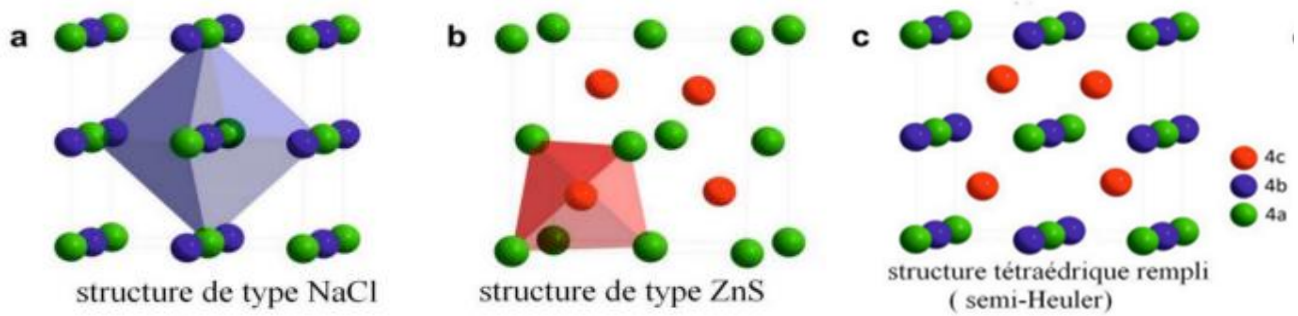
Les alliages Semi-Heusler "Half-Heusler" contiennent la formule chimique XYZ et sont composés de deux parties : une covalente et une ionique. Les atomes X et Y présentent des propriétés cationiques uniques, alors que Z est l'équivalent anionique. C1b avec le groupe d'espace cubique  $F-43m$  sont leurs structures cristallines (groupe d'espace n° 216).[42]



**Figure III.4:** Structure cristalline de Half Heusler alliage XYZ (a) et de Full Heusler alliage  $X_2YZ$  (b).

### III.3.6. Structure cristalline :

Les alliages demi-Heusler ont la formule générale XYZ et cristallisent dans une structure cubique non Centro-symétrique (groupe d'espace numéro 216,  $Fm-3m$ , C1b) qui peut être formée en remplissant les sites octaédriques du réseau (Figure. III.5).



**Figure III.5:** (a) la structure Rock Salt, (b) la structure zinc blende et leurs relations avec la structure semi-Heusler (c)

L'interpénétration de trois sous-réseaux cubiques à faces centrées (cfc), dont chacun est occupé par des atomes X, Y et Z, caractérise cette forme de demi-structure de Heusler. 4a (0, 0, 0), 4b (1/2, 1/2, 1/2) et 4c (1/4, 1/4, 1/4) sont les emplacements occupés. Dans ce type de structure, trois configurations atomiques non équivalentes sont possibles, comme détaillé dans le tableau.

	4a	4b	4c
<b>Type I</b>	X (0, 0,0)	Y (1/2,1/2,1/2)	Z (1/4,1/4,1/4)
<b>Type II</b>	Z (1/4,1/4,1/4)	X (0, 0,0)	Y (1/2,1/2,1/2)
<b>Type III</b>	Y (1/2,1/2,1/2)	Z (1/4,1/4,1/4)	X (0, 0,0)

**Figure III.6:** Différents type d'occupations des sites non équivalents dans la structure de type C1b.

### III.3.7. Les applications :

Les alliages Heusler ont suscité beaucoup d'attention au cours des dernières décennies en raison de leurs caractéristiques uniques qui les rendent idéaux pour une utilisation dans les équipements électriques et mécaniques. Le caractère semi-métallique est l'une des qualités qui a conduit à l'essor des travaux sur ces alliages. De Groot et al. ont prédit cette caractéristique pour Half-Heuslers en 1983 [44] Galanakis et al. [45] ont prédit en 2002 que les alliages Full-Heusler sont également des demi-métaux. Pour cette raison, ils sont d'excellents candidats pour les électrodes dans les jonctions tunnel magnétiques.

Une autre caractéristique remarquable de ces alliages est leur température de Curie élevée, en particulier dans les alliages Full-Heusler. Cela s'explique par une forte interaction interatomique entre les différentes espèces de l'alliage, ce qui explique pourquoi les Full-Heusler, qui n'ont pas de sites vides dans leur réseau, ont des températures de Curie plus élevées que les Half-Heusler. La température de Curie a été déterminée comme étant de 985 K dans l'alliage  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  et supérieure à 1100 K dans l'alliage  $\text{Co}_2\text{FeGa}$ [46] . Alors que la température de Curie d'autres semi-métaux, tels que la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), est proche de la température ambiante, la température de Curie élevée des alliages Heusler les rend attrayants pour les applications de stabilité thermique en électronique.

De plus, des études théoriques montrent que les alliages Heusler auront un faible facteur d'amortissement magnétique. En effet, Liu et al. ont calculé que la valeur d'amortissement magnétique de l'alliage  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  était de 0,6104. Étant donné que le facteur d'amortissement est directement lié à la réponse en fréquence, ces alliages pourraient remplacer le YIG dans les dispositifs à micro-ondes contemporains. L'alliage  $\text{Co}_2\text{FeAl}$ , avec une valeur de 103 [47], et l'alliage  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ , avec une valeur de 3.103 [48], ont les valeurs expérimentales documentées les plus basses. Les valeurs mesurées sur les alliages Heusler, bien que modestes, sont bien au-delà des prédictions théoriques. Cette variation est fréquemment attribuée à des défauts cristallins ou à un désordre dans les matériaux créés.

Cependant, il existe de nombreux procédés dans ces alliages qui sont encore mal connus, et une meilleure connaissance devrait les rendre plus adaptés aux exigences des technologies contemporaines.

Une autre propriété intrigante de certains alliages Heusler est leur capacité à modifier leur forme en réponse à un champ appliqué. Un champ magnétique déforme le maillage cristallin, et lorsque le champ est supprimé, l'alliage retrouve sa structure d'origine. Cette propriété, connue sous le nom de mémoire de forme magnétique, a été largement explorée dans l'alliage  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ , qui peut se déformer jusqu'à 9 % dans des champs relativement doux.

## **Conclusion :**

Ce chapitre a fourni une revue complète des alliages Heusler, en particulier des alliages semi-Heusler, ainsi que de nombreuses utilisations de ces alliages.

Étudier comment un thermo-actionnaire réagit lorsque son matériau d'origine est remplacé par un nouveau matériau (Half-Heusler). Dans le deuxième chapitre, nous utiliserons ANSYS pour simuler l'efficacité d'un demi-heusler.



**CHAPITRE IV**

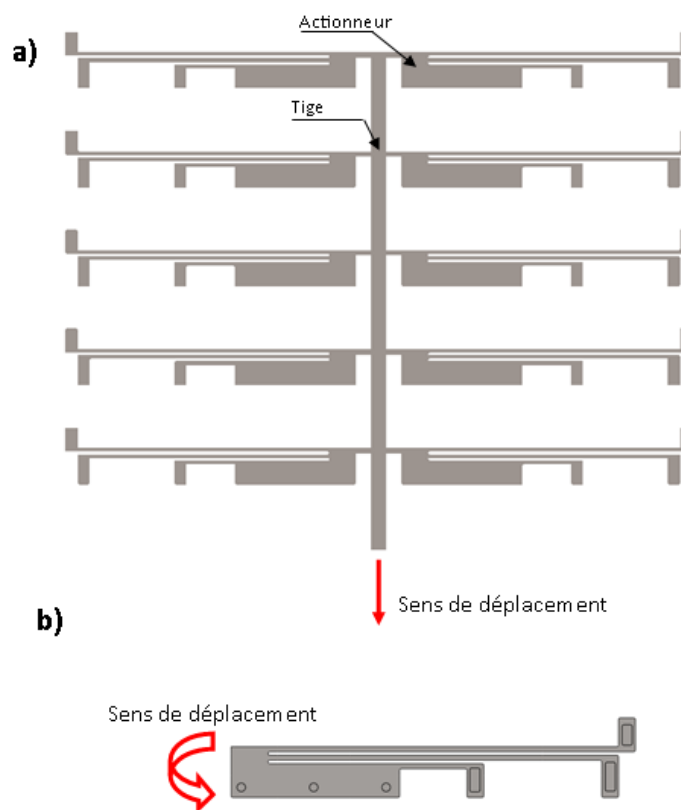
## CHAPITRE IV: SIMULATION DE MICRO-ACTIONNEUR ELECTROTHERMIQUE

### Introduction :

Les actionneurs électrothermiques dans les MEMS ont suscité l'intérêt des chercheurs car ils induisent un mouvement physique à l'échelle nanométrique et micrométrique. Ils mesurent des centaines de micromètres et sont en grande partie composés de silicium.

Les actionneurs électrothermiques sont utilisés pour déplacer des micros dispositifs et positionner des micros miroirs. Il est également possible d'employer un groupe d'actionneurs électrothermiques pour obtenir un déplacement de dispositif extrêmement précis et compliqué. (Voir Fig. IV.1.a)

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le déplacement du bras de l'actionneur (voir Fig. IV.1.b) lorsque son matériau d'origine (poly-silicium) est remplacé par un nouveau matériau (Half-Heusler (FeAsNb)) proposer et modéliser leur propriétés physiques par notre chercheur Mr KADRI Salim. Il est déterminé par leurs formes: une dilatation thermique a été observée dans le bras avec un petit segment. Pour étudier ce phénomène, une analyse multi physique couplée prenant en compte l'interaction des domaines thermique, électrique et structurel doit être effectuée.



**Figure IV.1:** a) Un groupe d'actionneurs électrothermiques b) Actionneur électrothermique.



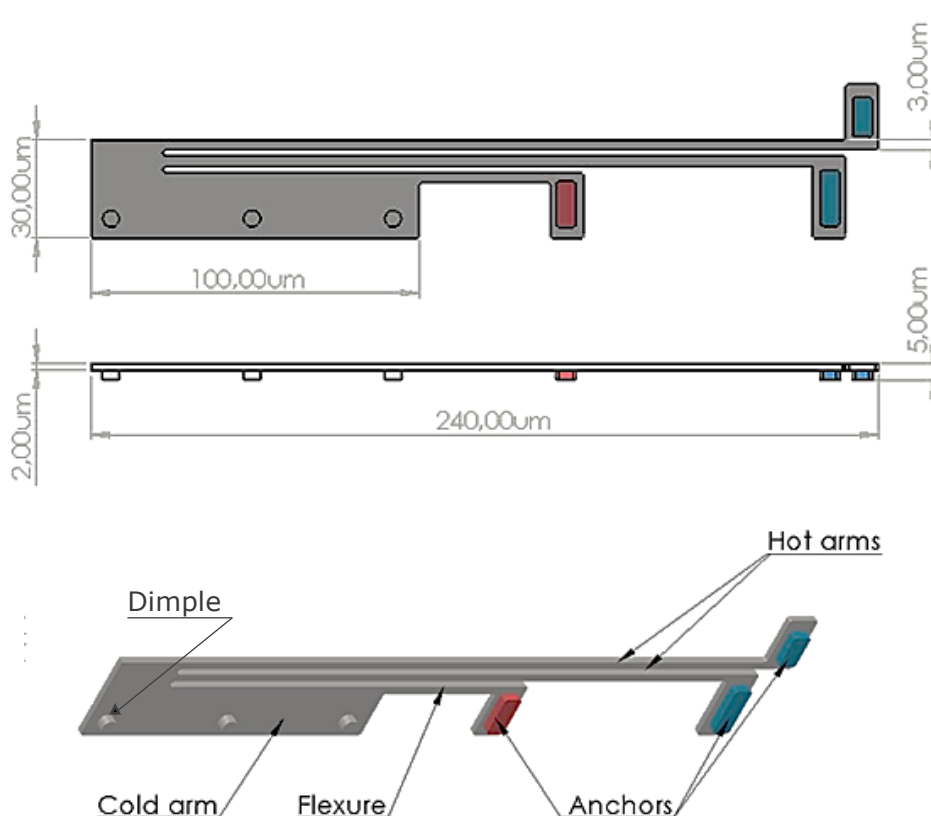
Le flux e courant à travers les bras de l'actionneur est causé par la différence de potentiels électriques fournis à ses contacts (ancres). La chaleur causer par de Joule est produite par la résistivité du silicium poly-cristallin en conjonction avec le flux de courant dans le bras mince (faisceau).

La plage de température des bras dépasse 400C à 700C. La résistance du bras le plus fin est supérieure à celle du bras le plus large. En conséquence, le bras plus fin se réchauffe plus rapidement, ce qui fait plier l'actionneur. La plus grande déviation se produit vers la fin. Elle est proportionnelle à la tension appliquée. En conséquence, la tension peut être utilisée pour régler avec précision la valeur de la déflexion du bras.[1]

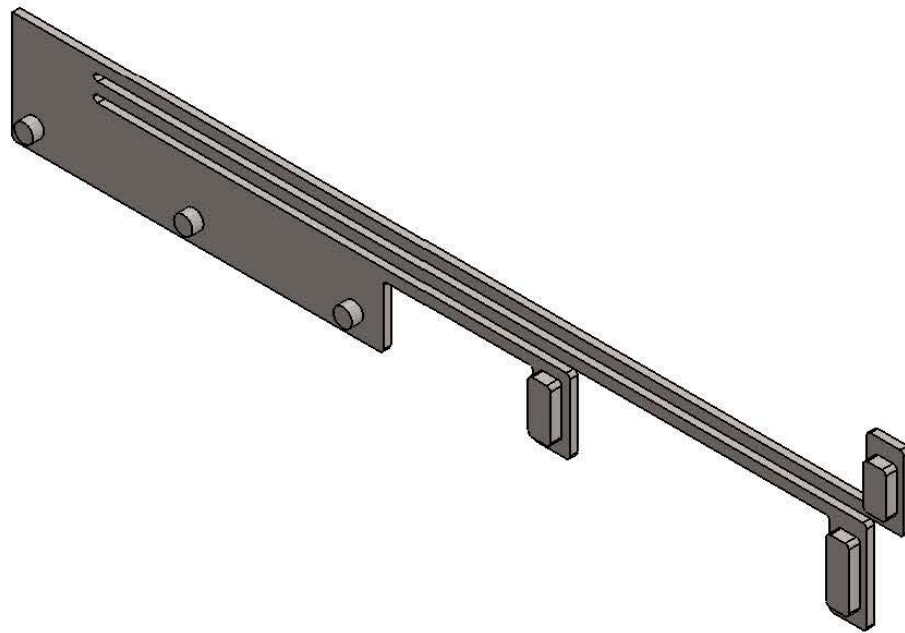
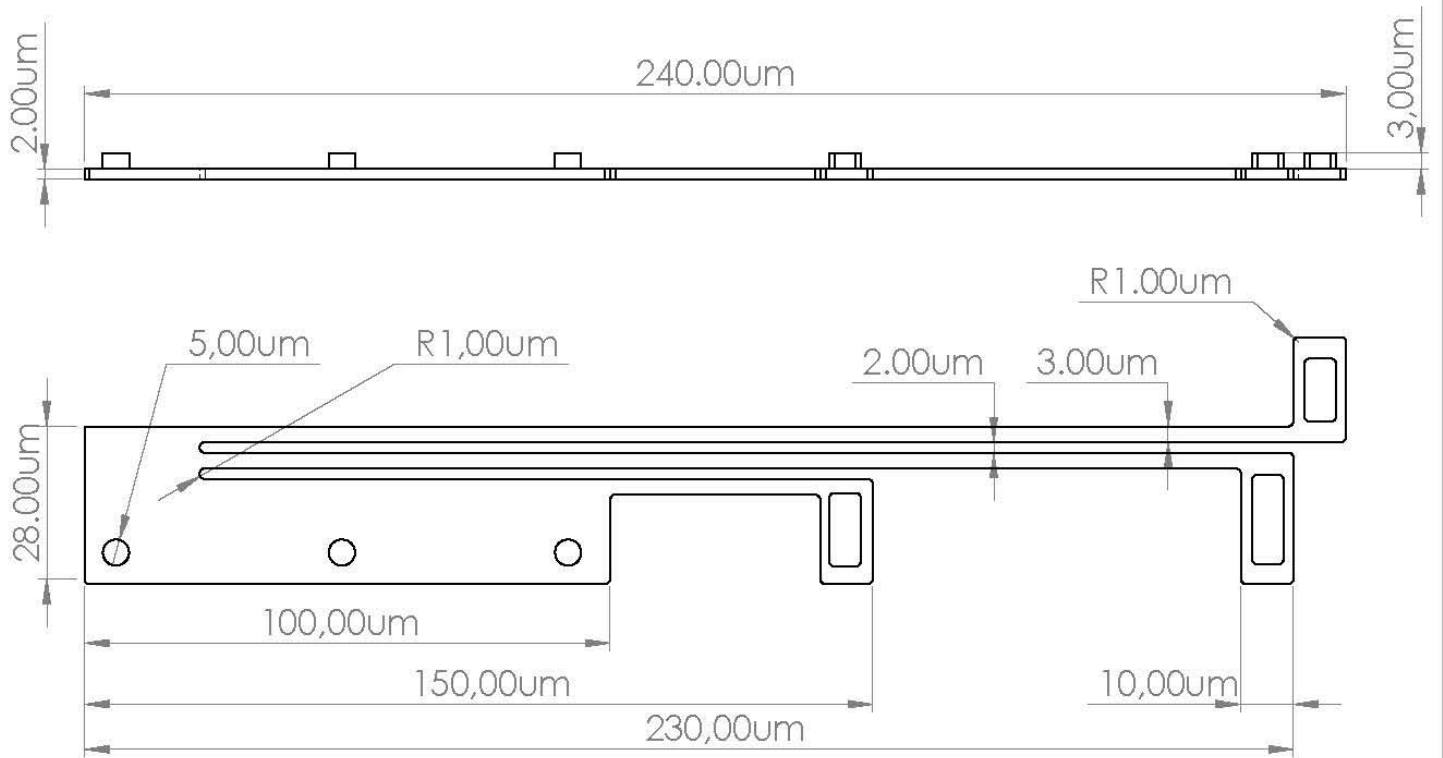
L'état initial des actionneurs est récupéré par des micros amortisseurs sous forme de micro tiges qui fonctionnent comme un ressort de rappel.

#### IV.1. Définition du modèle :

La figure suivant montre les pièces et les dimensions des actionneurs.



**Figure IV.2:** Le micro actionneur thermique.



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:											
TOLERANCES:											
LINEAIRES:											
ANGULAIRES:											
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:					
AUTEUR		belkhir		5/5/21		<b>ACTIONNEUR ELECTROTHERMIQUES</b>					
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.				MATERIAU:				No. DE PLAN		A4	
				<b>FeAsNb</b>				acc1			
				MASSE:				ECHELLE:200:1		FEUILLE 1 SUR 1	

## IV.2. Données matérielles

Dans le tableau 4 nous avons présenté tous les propriétés nécessaires calculés pour exécuter notre modélisation du composé FeAsNb, et les propriétés déjà connus de poly silicium[1].

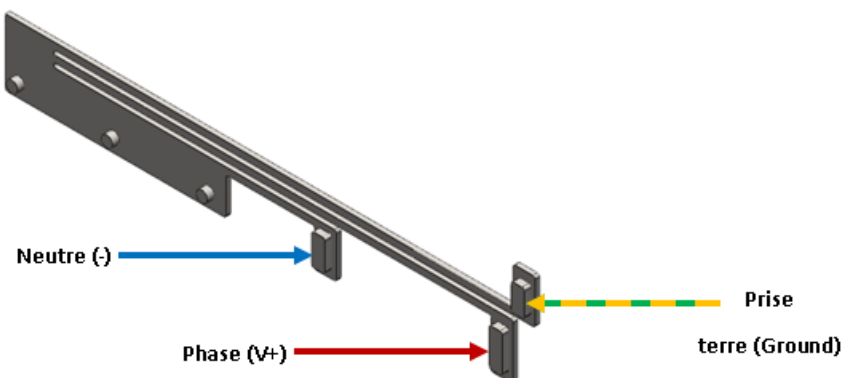
- Fe: Fer.
- As: Arsenic.
- Nb: Niobium.

**Tableau 4:**  $E$ : Young modulus in GPa;  $\nu$ : Poisson's ratio;  $\alpha$ : Thermal expansion coefficient in  $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ;  $\varpi$ : Electrical resistivity in  $\Omega\text{m}$ ;  $K_L$ : Thermal conductivity in  $\text{W.m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$ .

Matériau	$E$	$\nu$	$\alpha$	$\varpi$	$K_L$
Poly-silicium	169	0.22	$2.9 \times 10^{-6}$	0.23	50
FeAsNb	297.37	0.26	$1.94 \times 10^{-5}$	0.224	47.8

## IV.3. Conditions aux limites et contraintes

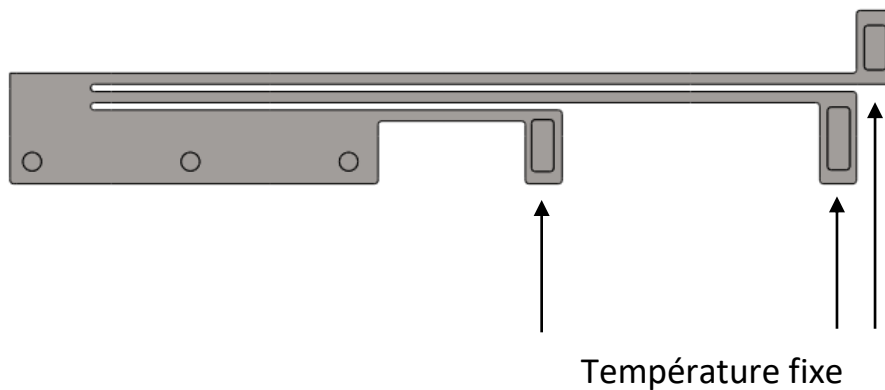
Un potentiel électrique est fourni entre les bases d'ancrage (Anchors) des bras chauffants. Toutes les surfaces, y compris l'ancrage du bras froid, sont isolées électriquement.[49]



**Figure IV.3 :** Conditions électriques aux limites.

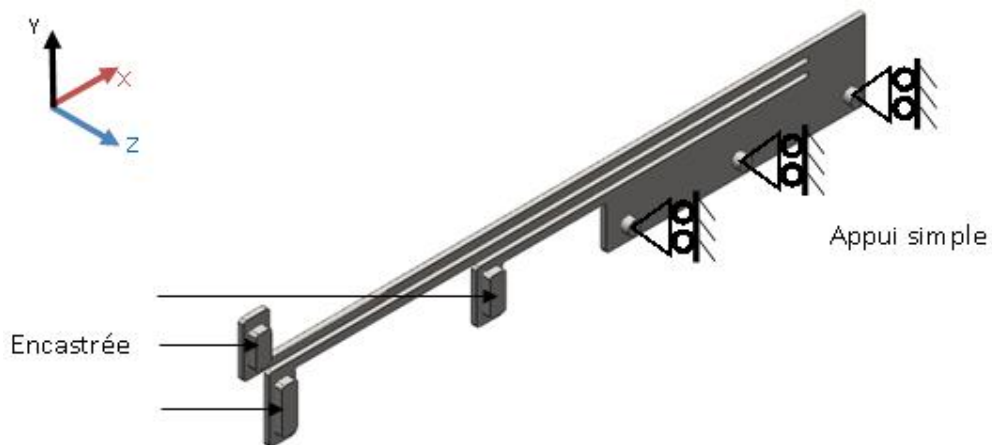
La température des bases des trois ancres (Anchors) est fixée à la température constante du substrat. Cela peut être fait en utilisant des conditions de contact thermique ou des conditions de flux de chaleur convectif, où le coefficient de flux de chaleur est de valeur de un sur la résistance thermique. Nous avons choisi d'utiliser une condition de flux de chaleur dans ce modèle. Le coefficient de transfert de chaleur est calculé en divisant la conductivité thermique de l'air par la distance entre les surfaces environnantes du système. Cette application utilise différents coefficients de transfert de chaleur pour les surfaces supérieure et inférieure de l'actionneur.[50]

$$\text{Heat flux } \perp = h(T - T_{amb})$$



**Figure IV.4:** Conditions de transfert de chaleur aux limites.

Les trois bras sont liés mécaniquement aux trois bases d'ancrage. Les tétons (Dimple) peuvent se déplacer librement dans le plan du substrat (le plan xy dans l'illustration), mais pas perpendiculairement au substrat (la direction z).[49]



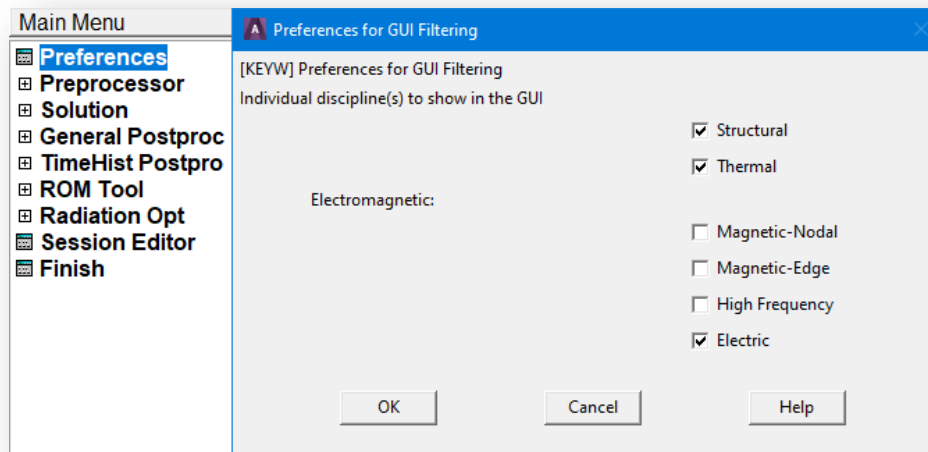
**Figure IV.5:** Conditions et contraintes structurelles aux limites.

#### **IV.4. Modélisation dans ANSYS:**

##### **IV.4.1. Mise en route :**

Nous devons définir le répertoire de travail et le nom de fichier après le démarrage de l'application principale APDL ANSYS Mechanical. Ensuite, nous ne devons définir que les commandes nécessaires à la modélisation de notre actionneur. Nous choisissons des champs structurels, thermiques et électriques[1]. Pour faire ça:

1. Dans le menu principal, sélectionnez Préférences.
2. Sélectionnez les disciplines suivantes dans la fenêtre de dialogue Préférences pour le filtrage de l'interface graphique : structurelle, thermique et électrique (Fig. IV.6).
3. Appuyez sur le bouton OK.

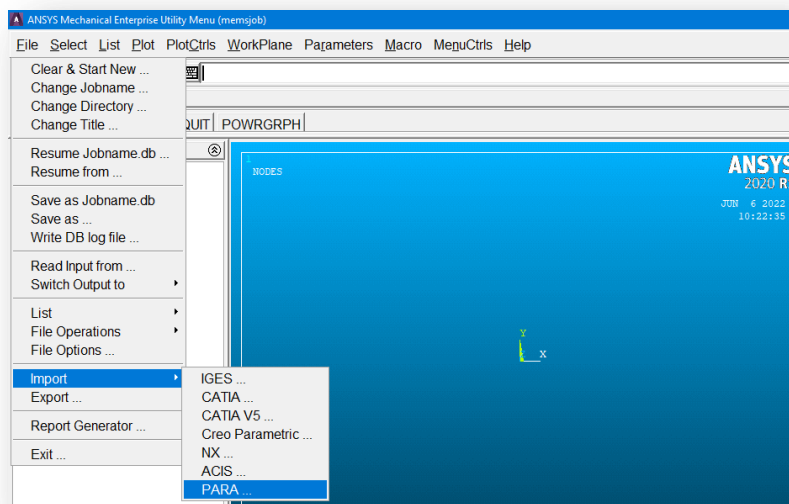


*Figure IV.6: Préférences pour la fenêtre de dialogue de filtrage de l'interface graphique.*

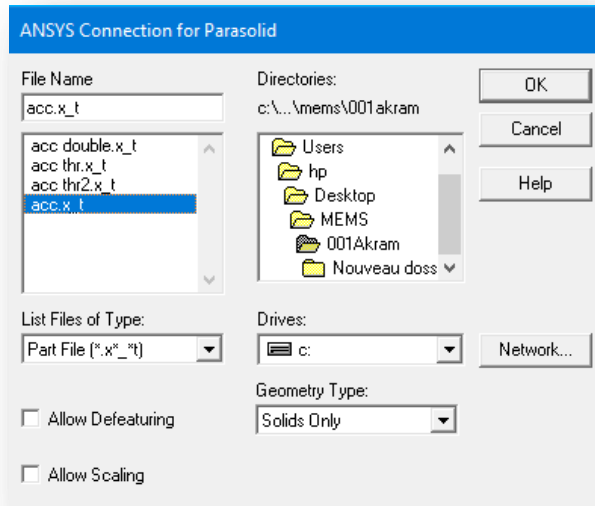
#### **IV.4.2. Définition de la géométrie :**

Nous insérons le modèle sure ANSYS après avoir modélisé l'actionneur sure SolidWorks et l'avoir enregistré sous forme PARASOLID (.x t). Commencez par faire ce qui suit :

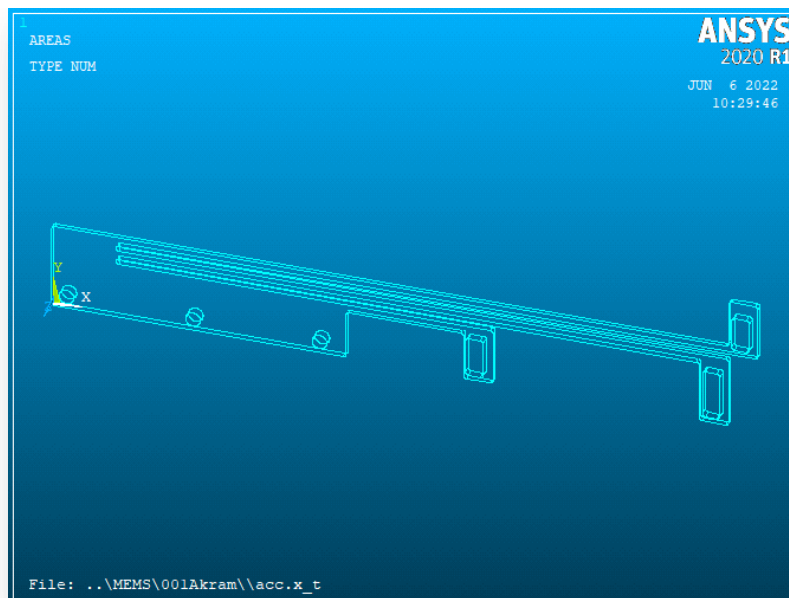
1. Sélectionnez File > Import > Para... (Fig. IV.7).
2. Sure fenêtre ANSYS connexion pour PARASOLID choisie le fichier de model 3D. (Fig. IV.8).
3. Appuyez sur le bouton OK.



*Figure IV.7: Etapes pour insérer fichier PARASOLIDE.*



**Figure IV.8:** Fenêtre ANSYS connexion pour PARASOLID.



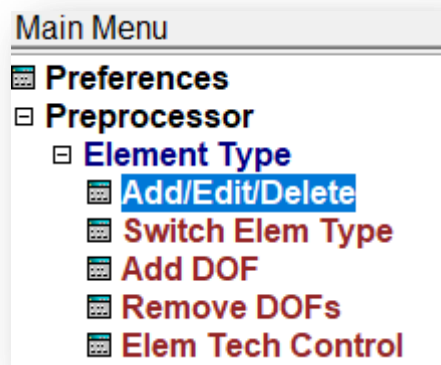
**Figure IV.9:** Modèle 3D de l'actionneur.

#### **IV.4.3. Définition des types d'éléments finis :**

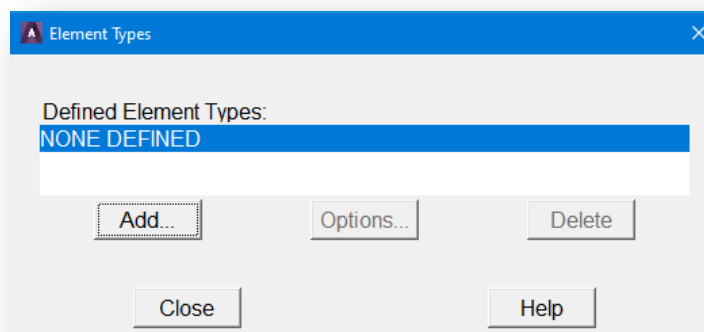
L'analyse de notre concept nécessite des simulations enchaînées dans trois domaines. Nous devrions utiliser l'élément SOLID227, qui possède tous les degrés de liberté essentiels (DOF) : UX, UY, UZ, TEMP, VOLT. Pour ce faire, commencez par :

1. Dans le menu principal, choisissez Type d'élément de préprocesseur Ajouter/Modifier/Supprimer (Fig. IV.10).

2. Dans la boîte de dialogue Types d'éléments, cliquez sur Ajouter... pour ajouter l'élément nécessaire (Fig. IV.11).
3. Dans la fenêtre de dialogue Library of Element Types, localisez l'élément Tet 10node 227 dans l'ensemble d'éléments Champ couplé (Fig. IV.12).
4. Appuyez sur le bouton OK.
5. Sélectionnez SOLID227 dans le panneau Types d'éléments.
6. Sélectionnez Option...
7. Dans la fenêtre de dialogue des choix de type d'élément SOLID227, choisissez Structurel-thermoélectrique comme Type d'analyse K1 (Fig. IV.13).
8. Appuyez sur le bouton OK.

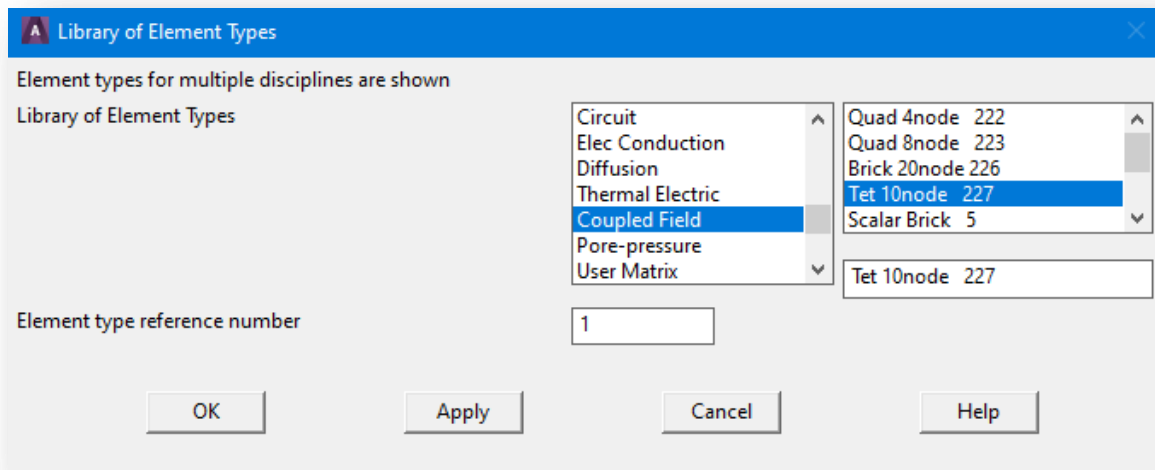


*Figure IV.10: Chemin du menu pour appeler le choix du type d'élément.*

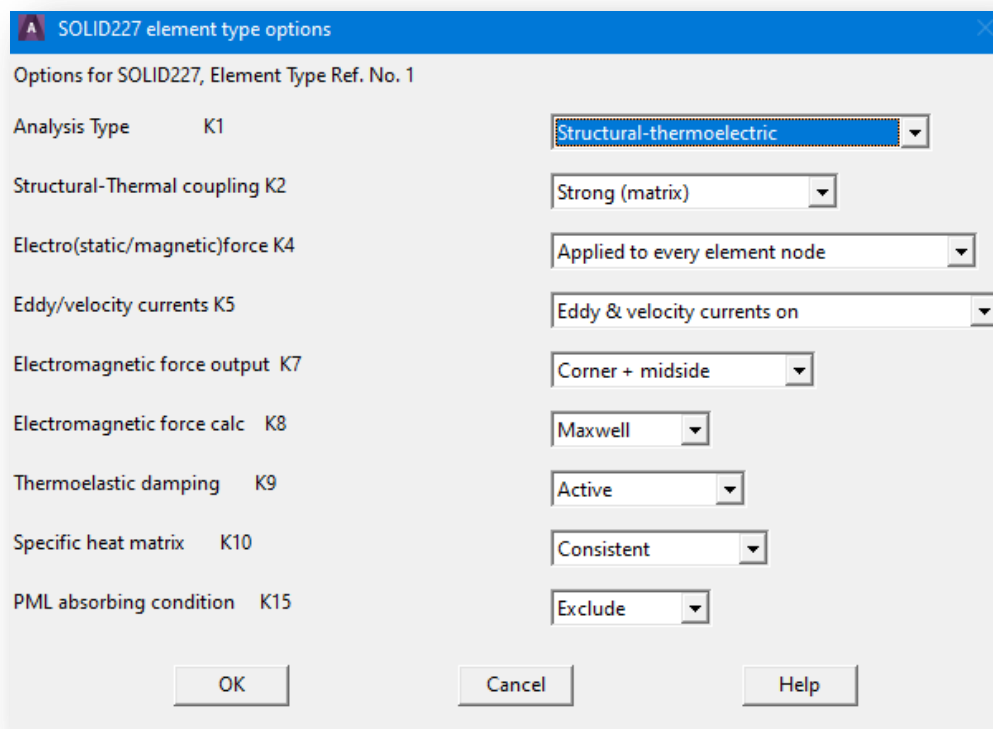


*Figure IV.11: ajouter un élément.*





*Figure IV.12: Bibliothèque de types d'éléments finis.*



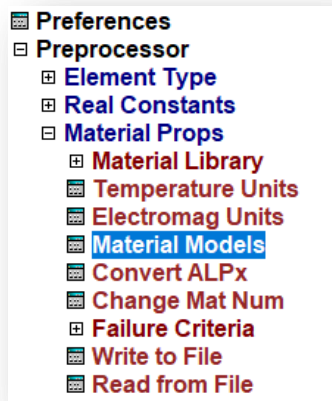
*Figure IV.13: Paramétrage des propriétés de l'élément sélectionné.*

#### **IV.4.4. Configuration des propriétés des matériaux :**

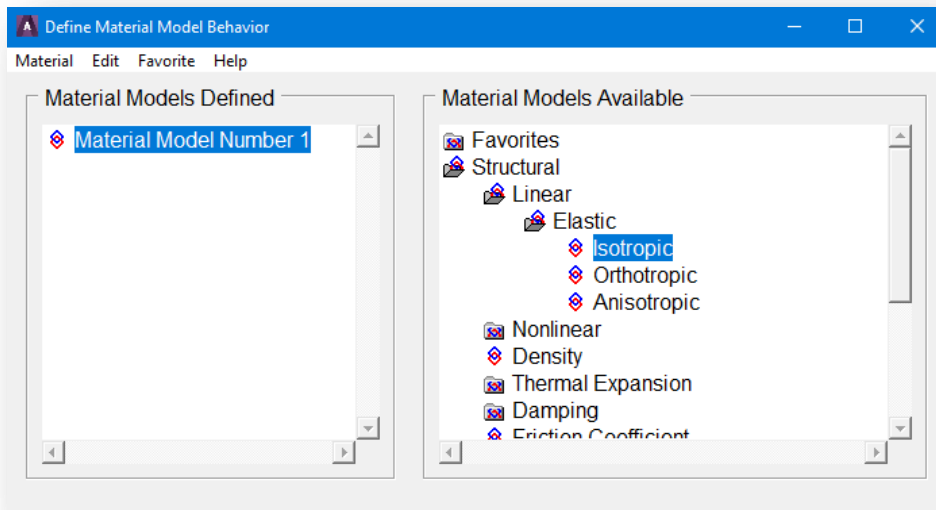
Les paramètres de matériau suivants doivent être spécifiés : module d'Young, coefficient de Poisson, coefficient de dilatation thermique, conductivité thermique et résistivité. Le Half-Heusler (FeAsNb) est utilisé dans notre situation. Le tableau 4 montre les caractéristiques les plus pertinentes de ce matériau.

Nous commençons par sélectionner le système d'unités approprié, MKSV, puis nous entrons toutes les données. Pour y parvenir:

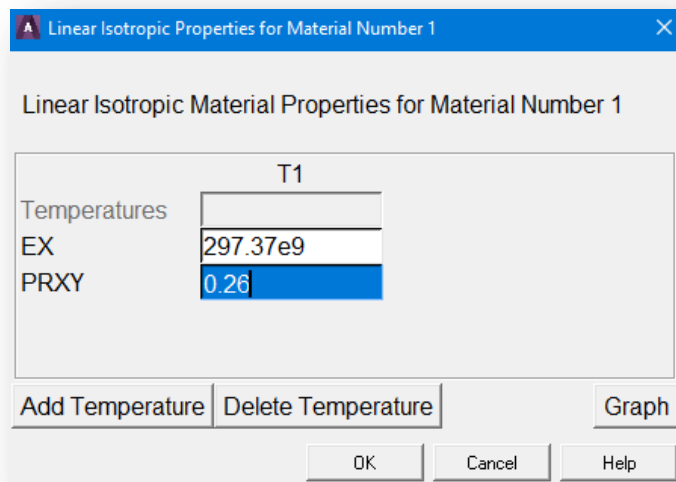
1. Dans le menu principal, choisissez Preprocessor Material Props Material Models (Fig. IV.14).
2. Dans la boîte Définir le comportement du modèle de matériau (Material Models Available), trouvez le module de Young EX et le coefficient de Poisson PRXY dans Structural Linear Elastic Isotropic (Fig. IV.15).
3. Dans la fenêtre Propriétés isotropes linéaires pour le matériau numéro 1, entrez **EX = 297.37e9** et **PRXY = 0,26**. (Fig. IV.16).
4. Appuyez sur le bouton OK.
5. Dans la fenêtre Définir le comportement du modèle de matériau (Material Models Available), recherchez le coefficient de dilatation thermique ALPX dans Structural Thermal Expansion Secant Coefficient Isotropic et saisissez **ALPX = 1.94e-6**.
6. Appuyez sur le bouton OK.
7. Localisez la conductivité thermique KXX le long de l'itinéraire. Dans la zone Définir le comportement du modèle de matériau, choisissez Conductivité thermique isotrope et **KXX = 47.8**. (Modèles de matériau disponibles).
8. Appuyez sur le bouton OK.
9. Dans la fenêtre Définir le comportement du modèle de matériau, recherchez Résistivité RSVX dans le chemin Constante de résistivité électromagnétique et saisissez **RSVX = 2.24e-1** (Modèles de matériau disponibles).
10. Appuyez sur le bouton OK.



*Figure IV.14: Chemin du menu pour définir les propriétés du matériau.*

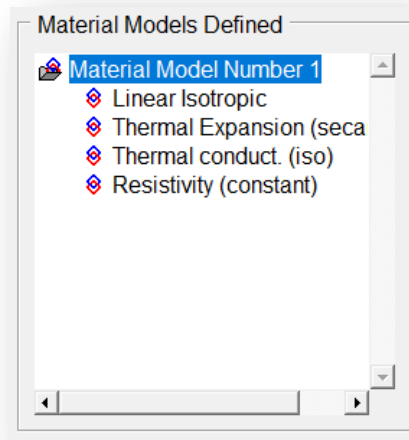


*Figure IV.15: Définition des propriétés physiques et mécaniques des matériaux.*



*Figure IV.16: Module de Young **EX** et le coefficient de Poisson **PRXY***

La Figure IV.17 représente une fenêtre avec une liste de tous les paramètres requis. Sélectionnez Matériel Exit pour le fermer.

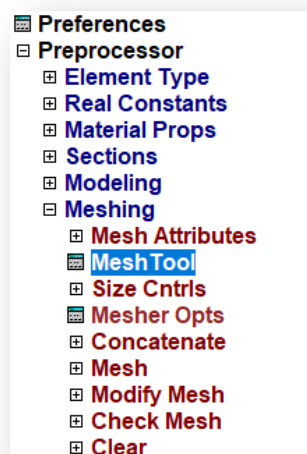


*Figure IV.17: Liste des paramètres définis*

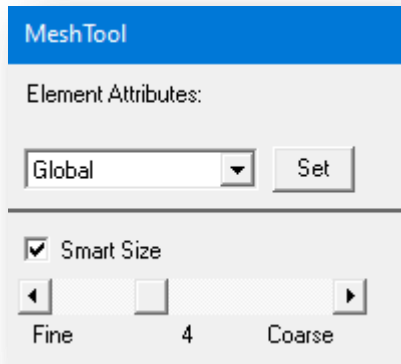
#### **IV.4.5. Maillage :**

L'étape suivante consiste à créer un maillage de notre Framework. Pour y parvenir:

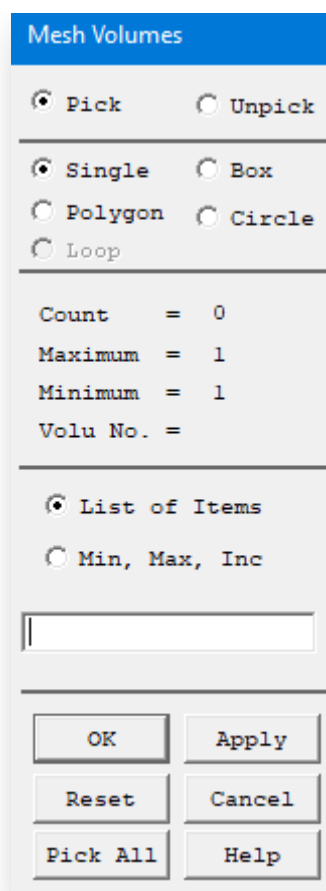
1. Dans le menu principal, sélectionnez Outil de maillage de maillage du préprocesseur (Fig. IV.18).
2. Sélectionnez l'option Smart Size et entrez 4 comme taille de l'élément fini dans la boîte à outils Mesh (Fig. IV.19).
3. Sélectionnez Maillage.
4. Dans la zone Mesh Volumes, cliquez sur Pick All pour créer un maillage (Fig. IV.20).
5. Cliquez sur le bouton Fermer.



*Figure IV.18: Chemin de menu pour invoquer les opérations de maillage.*

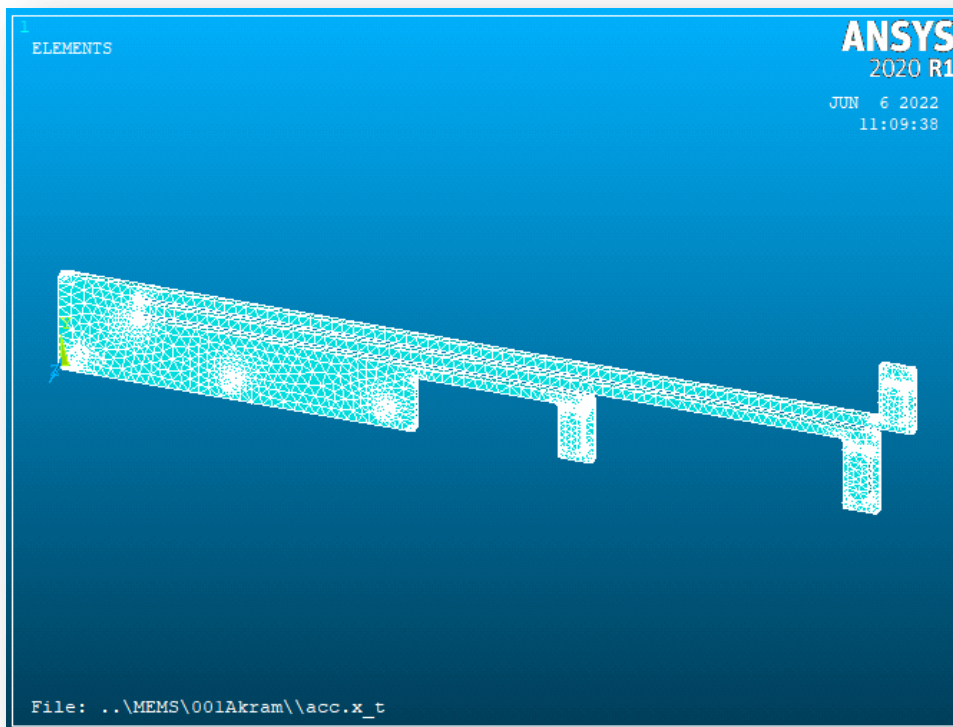


*Figure IV.19: Fenêtre de dialogue Outil de maillage.*



*Figure IV.20: Boîte de dialogue Volumes de maillage.*

Nous obtenons l'actionneur maillé illustré à la Fig. IV.21



*Figure IV.21: Résultat de maillage.*

#### **IV.4.6. Mise en place des conditions aux limites :**

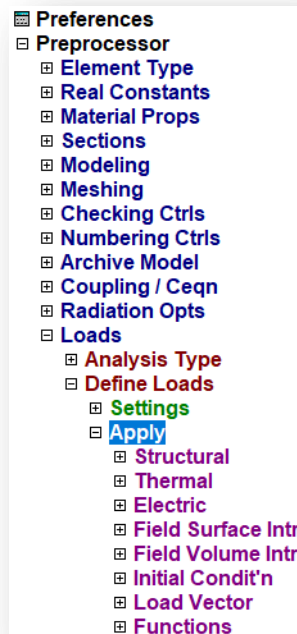
Dans cette partie, nous verrons comment utiliser les conditions aux limites dans notre modèle.

##### **IV.4.6.1. Structurel :**

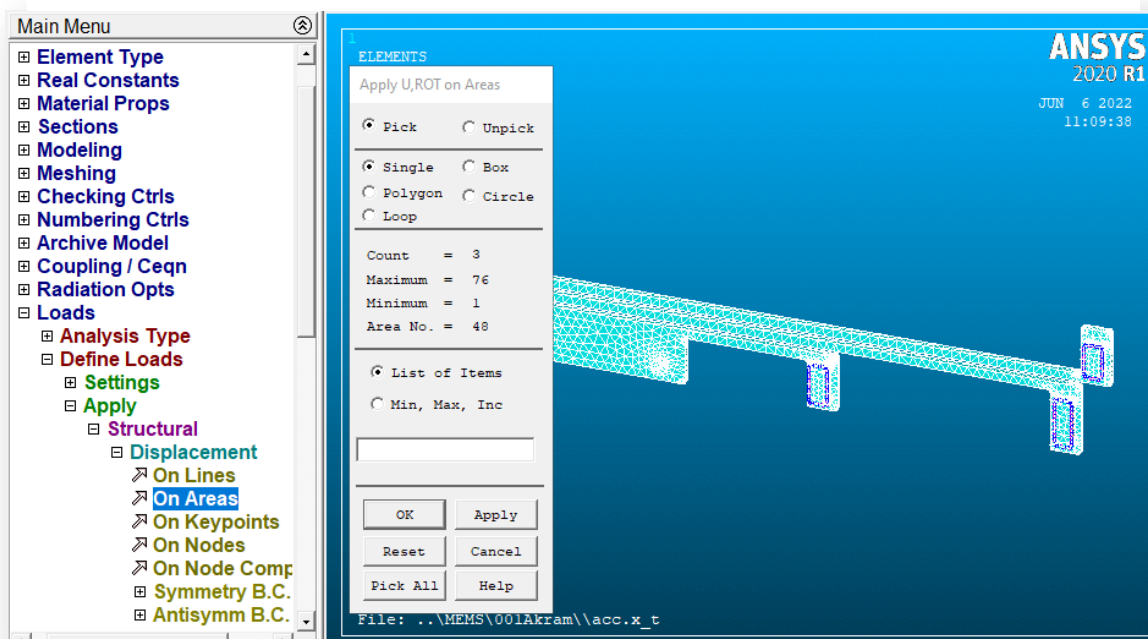
Pour commencer, nous réglons le déplacement de l'ancre dans les axes OX, OY et OZ à 0 pour fixer notre actionneur au châssis. Pour y parvenir:

1. Dans le menu principal, choisissez Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply Structural > Displacement > On Areas (Fig. IV.22 et IV.23).
2. Dans la case Apply U, ROT on Areas, nous pouvons également utiliser le curseur de la souris pour sélectionner les trois régions. Pour fixer les trois ancrés (Fig. IV.23).
3. Appuyez sur le bouton OK.
4. Dans la case suivante, sélectionnez TOUS DOF qui doivent être limités et définissez la valeur de déplacement VALUE = 0. (Fig. IV.24).
5. Appuyez sur le bouton OK.

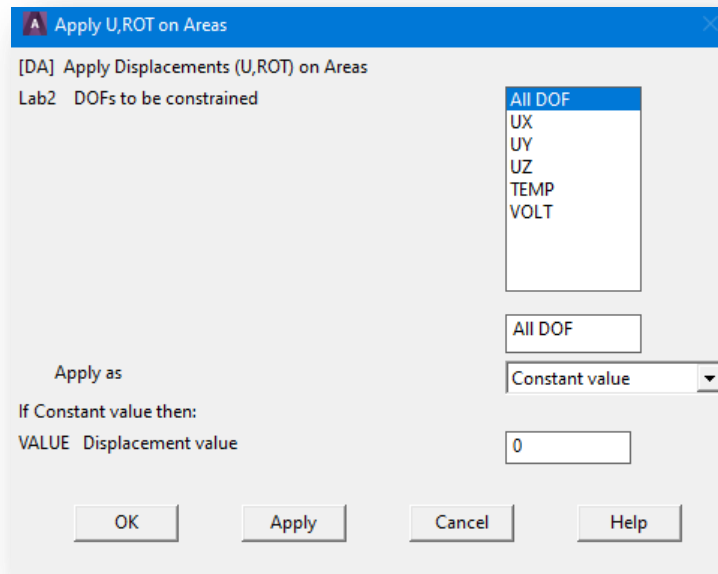
6. Utiliser le curseur de la souris pour sélectionner les trois régions. Pour éliminer le déplacement dans la direction z pour les trois têtes. (Fig. IV.25).
7. Appuyez sur le bouton OK.
8. Dans la case suivante, sélectionnez UZ qui doivent être limités et définissez la valeur de déplacement VALUE = 0.
9. Appuyez sur le bouton OK.



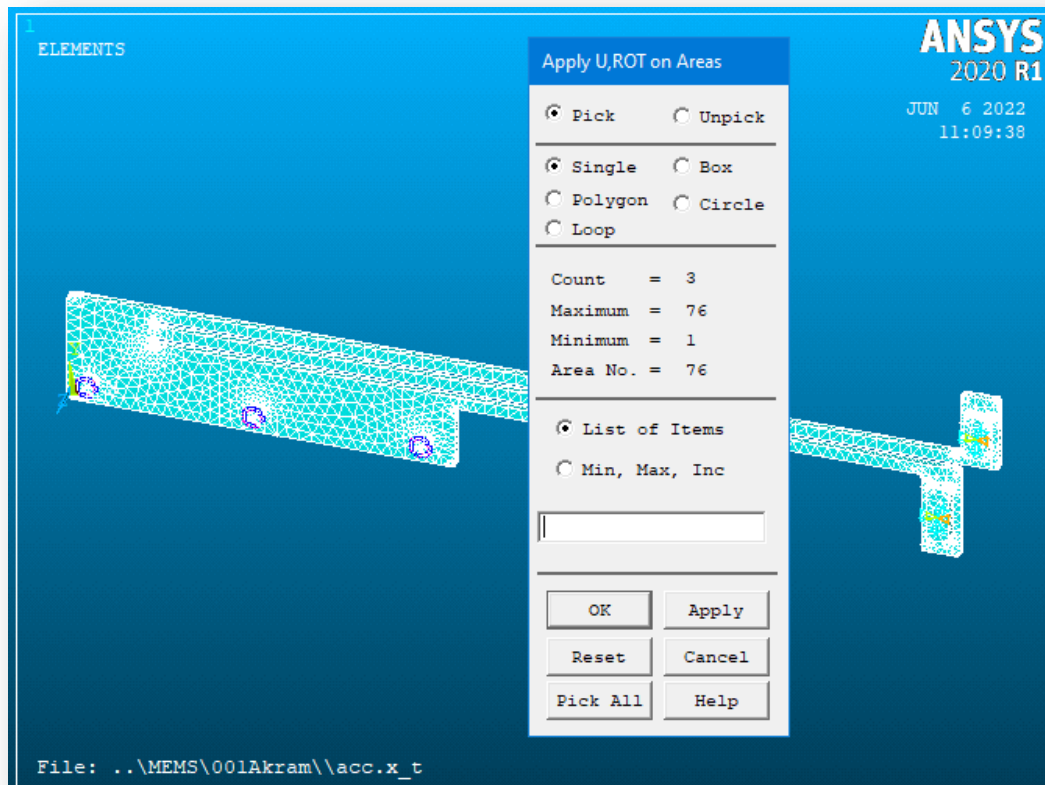
*Figure IV.22: Chemin de menu pour appeler les opérations de définition des charges.*



*Figure IV.23: Sélection des surfaces pour l'application des conditions aux limites (Déplacement).*



**Figure IV.24:** Application des conditions aux limites (Déplacement).



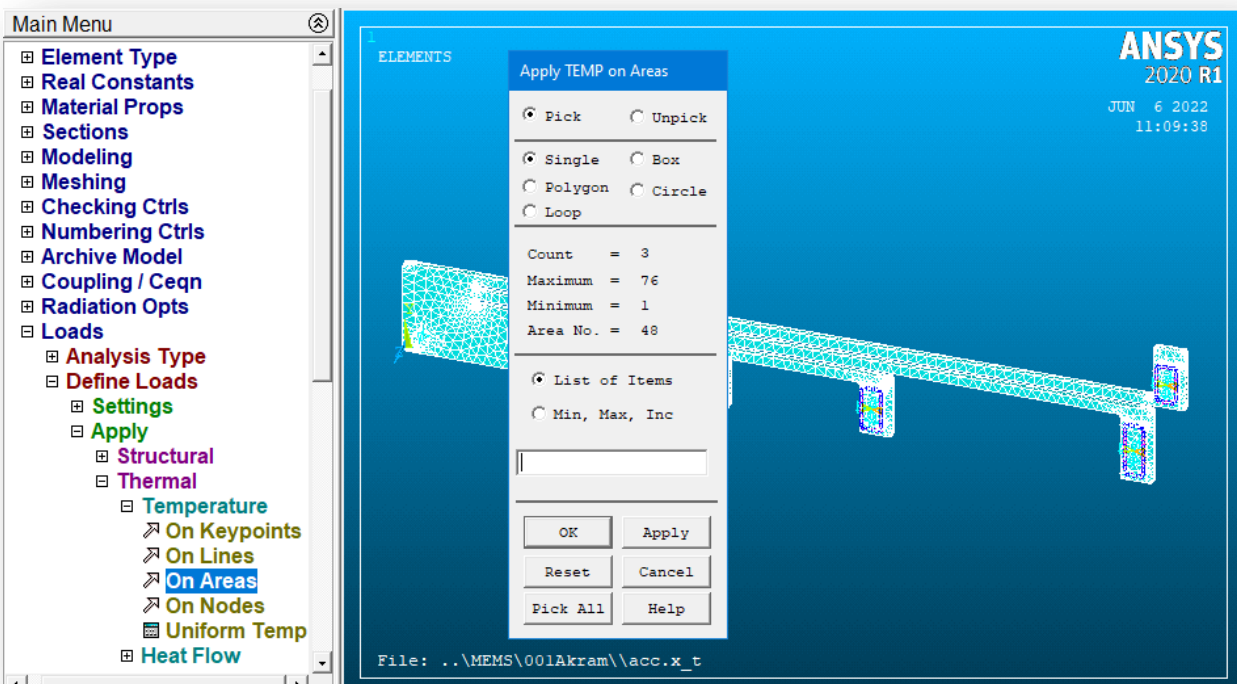
**Figure IV.25:** Sélection des surfaces pour l'application des conditions aux limites (Déplacement).



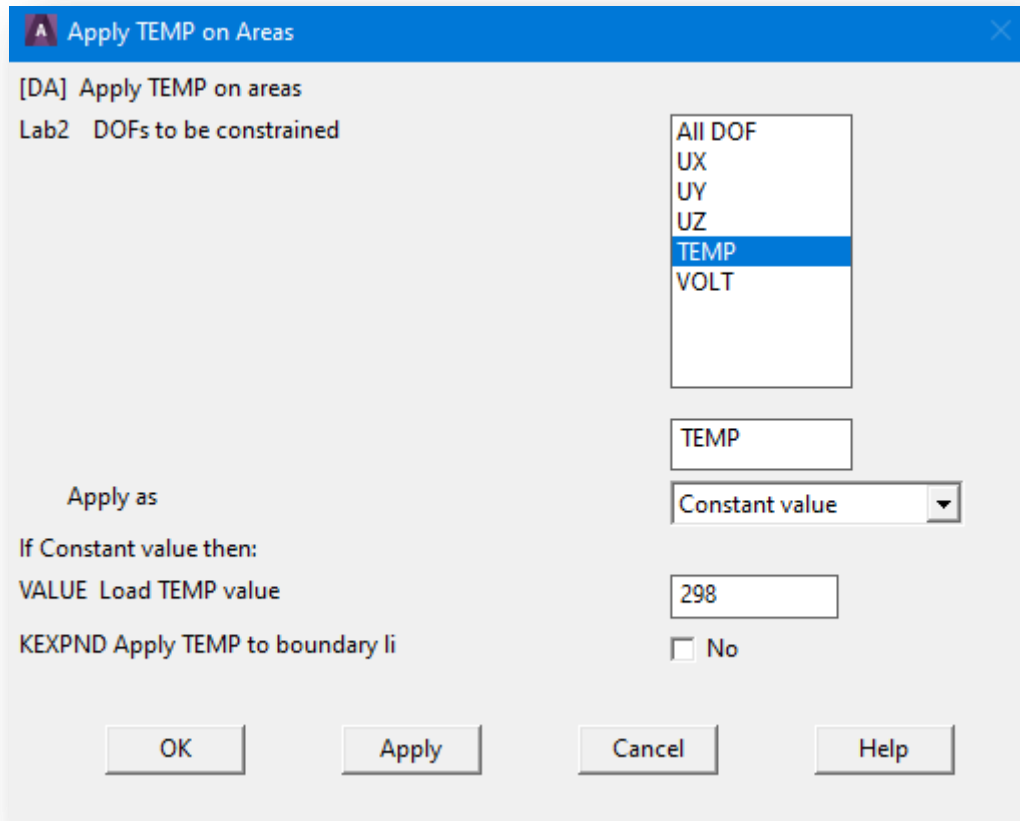
#### IV.4.6.2. Température :

La température de l'actionneur doit alors être spécifiée. Faire:

1. Choisissez les charges du préprocesseur Définir les charges Appliquer la température thermique sur les zones
2. Utilisez le curseur de la souris pour sélectionner les zones des trois ancres (Fig. IV.26).
3. Appuyez sur le bouton OK.
4. Sélectionnez la TEMP qui doit être limitée et entrez la VALEUR. Dans la fenêtre suivante, entrez TEMP = 298. (298°K = 25 °C = Température ambiante) (Fig. IV.27).
5. Appuyez sur le bouton OK.



*Figure IV.26: Sélection des surfaces pour l'application des conditions aux limites (température).*

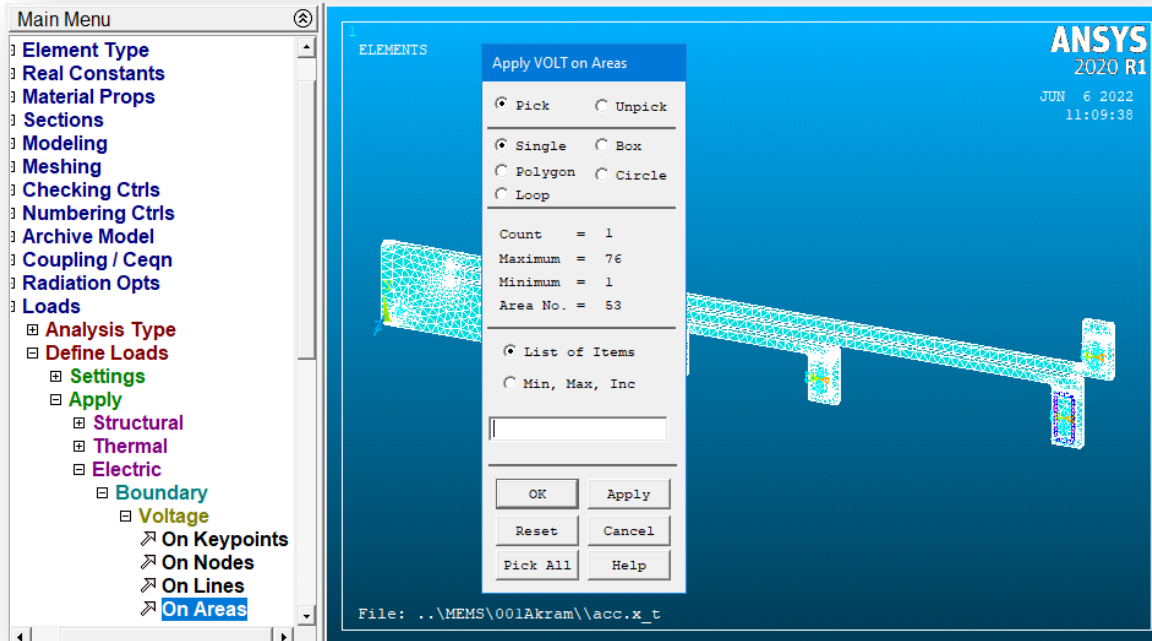


**Figure IV.27:** Application des conditions aux limites (température).

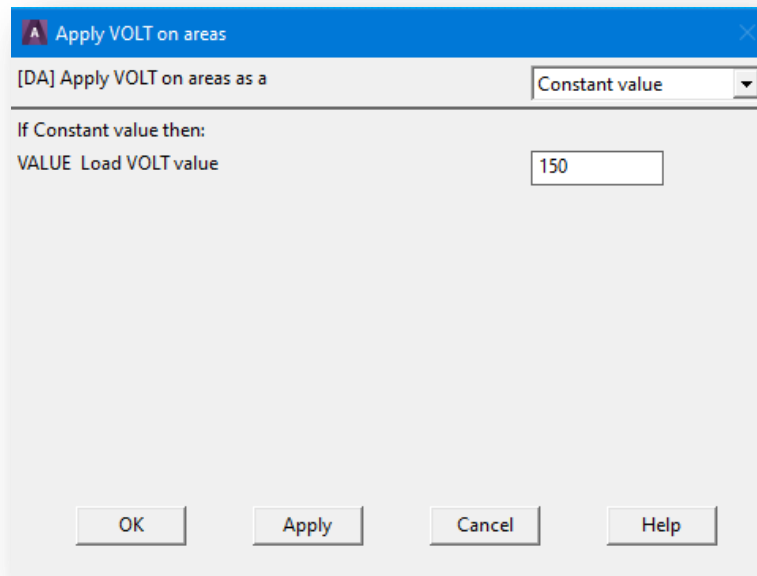
#### **IV.4.6.3. Tension :**

Il faut maintenant appliquer la tension aux ancrs. Faire:

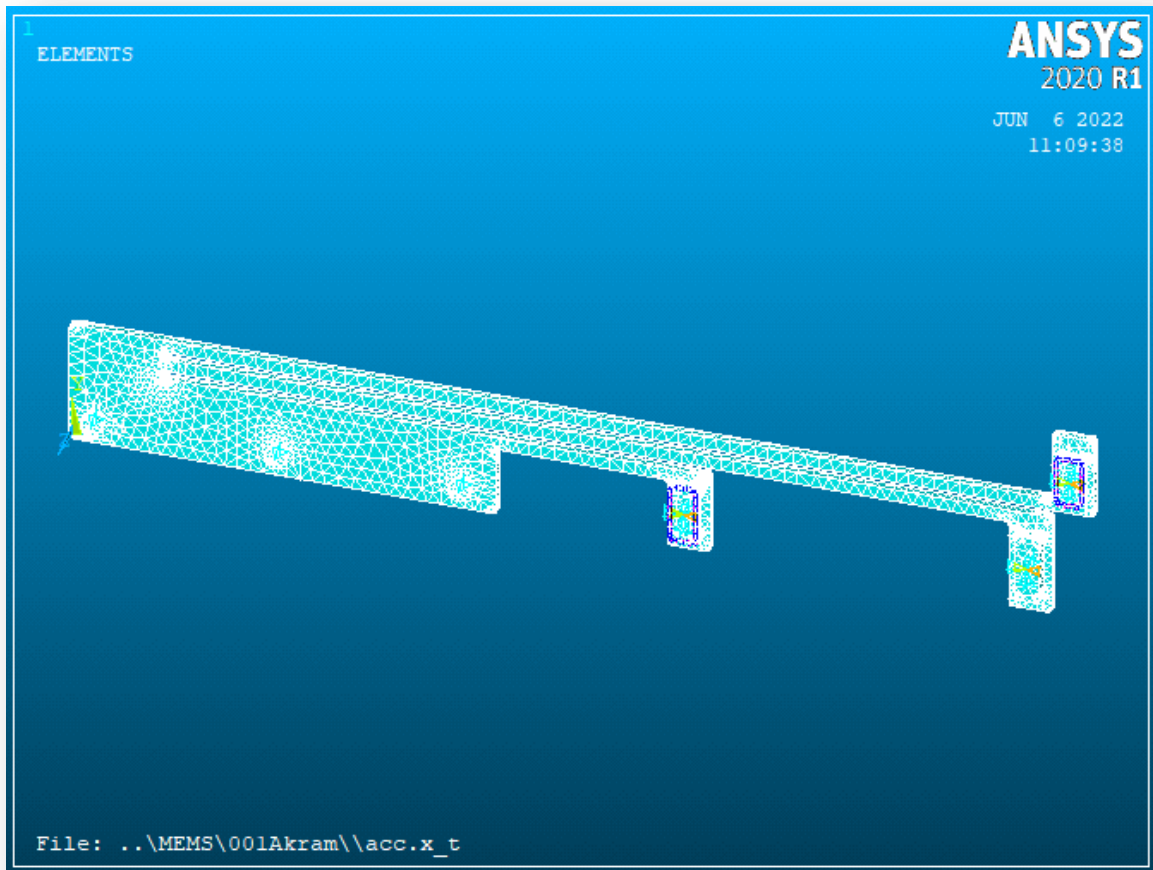
1. Choisissez les charges du préprocesseur Définir les charges Appliquer la tension limite électrique sur les zones
2. Dans la fenêtre Apply VOLT on Areas, Utilisez le curseur de la souris pour sélectionner la région d'ancr en milieu. (Fig. IV.28).
3. Appuyez sur le bouton OK.
4. Choisissez la VOLT qui doit être limitée et entrez la VALEUR. Dans la fenêtre suivante, entrez la valeur VOLT = 150. (Fig. IV.29).
5. Appuyez sur le bouton OK.
6. Choisissez Preprocessor Loads Define Loads Apply Electric Boundary Voltage On Areas une fois de plus.
7. Utilisez le curseur de la souris pour sélectionner les restes région d'ancr (Fig. IV.30).
8. Appuyez sur le bouton OK.
9. Choisissez le VOLT à limiter et réglez la valeur VALUE Load VOLT sur 0. (Fig. IV.31).
10. Appuyez sur le bouton OK.



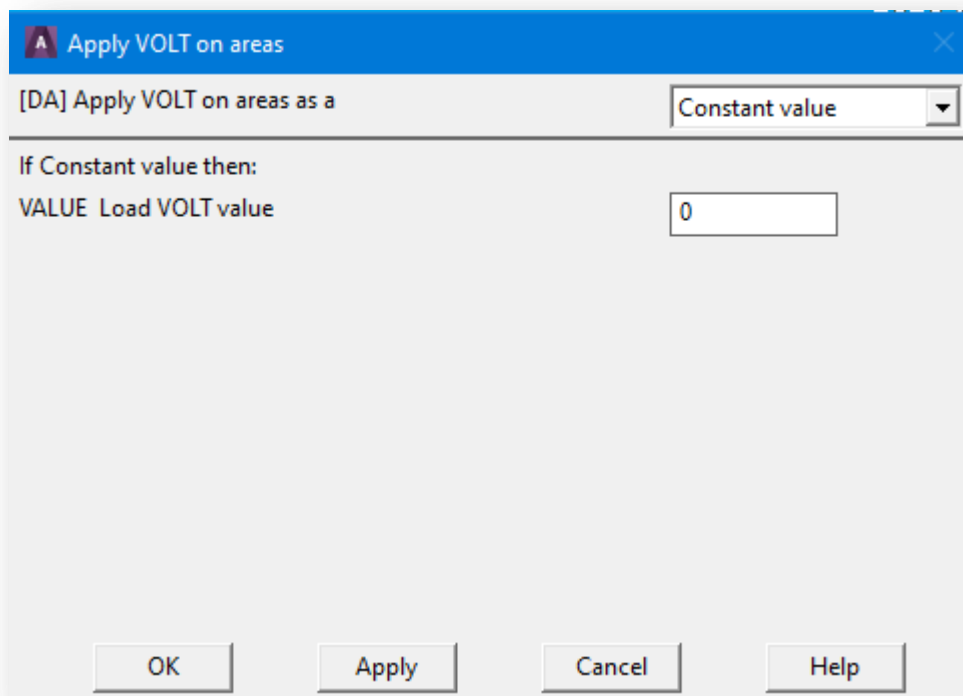
*Figure IV.28: Sélection de la surface pour l'application des conditions aux limites (Tension).*



*Figure IV.29: Application des conditions aux limites (Tension).*



**Figure IV.30:** Sélection de la surface pour l'application des conditions aux limites (Tension).

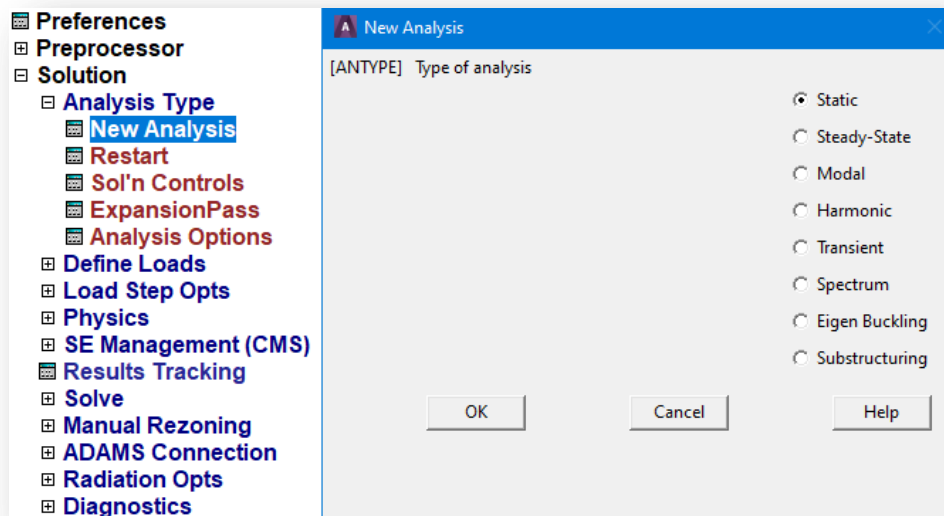


**Figure IV.31:** Application des conditions aux limites (Tension).

#### IV.4.7. Choisir une méthode d'analyse :

Pour résoudre le problème, modifiez le type d'analyse en statique. Pour ce faire, commencez par :

1. Dans le menu principal, choisissez Solution Nouvelle analyse (Fig. IV.32).
2. Dans la fenêtre Nouvelle analyse, sélectionnez Statique comme type d'analyse et cliquez sur OK (Fig. IV.32).

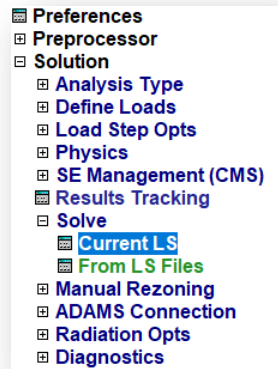


*Figure IV.32: Chemin de menu pour appeler les opérations de définition du type d'analyse (Sélectionnez le type d'analyse).*

#### IV.4.8. Analyse en cours :

Nous commençons les simulations après avoir ajouté les conditions aux limites. Étant donné que la procédure de calcul peut prendre beaucoup de temps, nous devons attendre que le calcul soit terminé. Pour y arriver:

1. Sélectionnez Solution Solve Current LS dans le menu principal (Fig. IV.33).
2. Appuyez sur le bouton OK.



*Figure IV.33: Chemin de menu pour appeler les opérations d'exécution de l'analyse.*

#### **IV.4.9. Affichage des résultats de la simulation :**

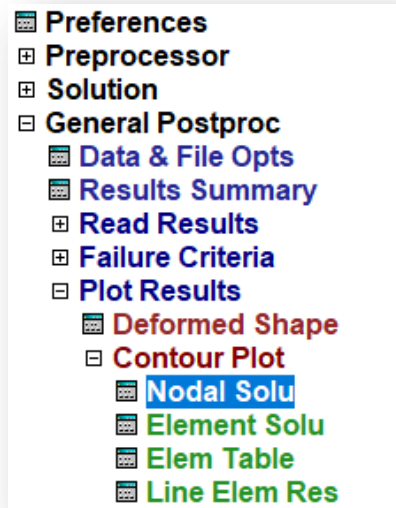
Nous pouvons voir la distribution du déplacement, de la tension et de la température dans notre actionneur après simulations. Comment y parvenir est démontré dans le point suivant.

##### **IV.4.9.1. Déplacement :**

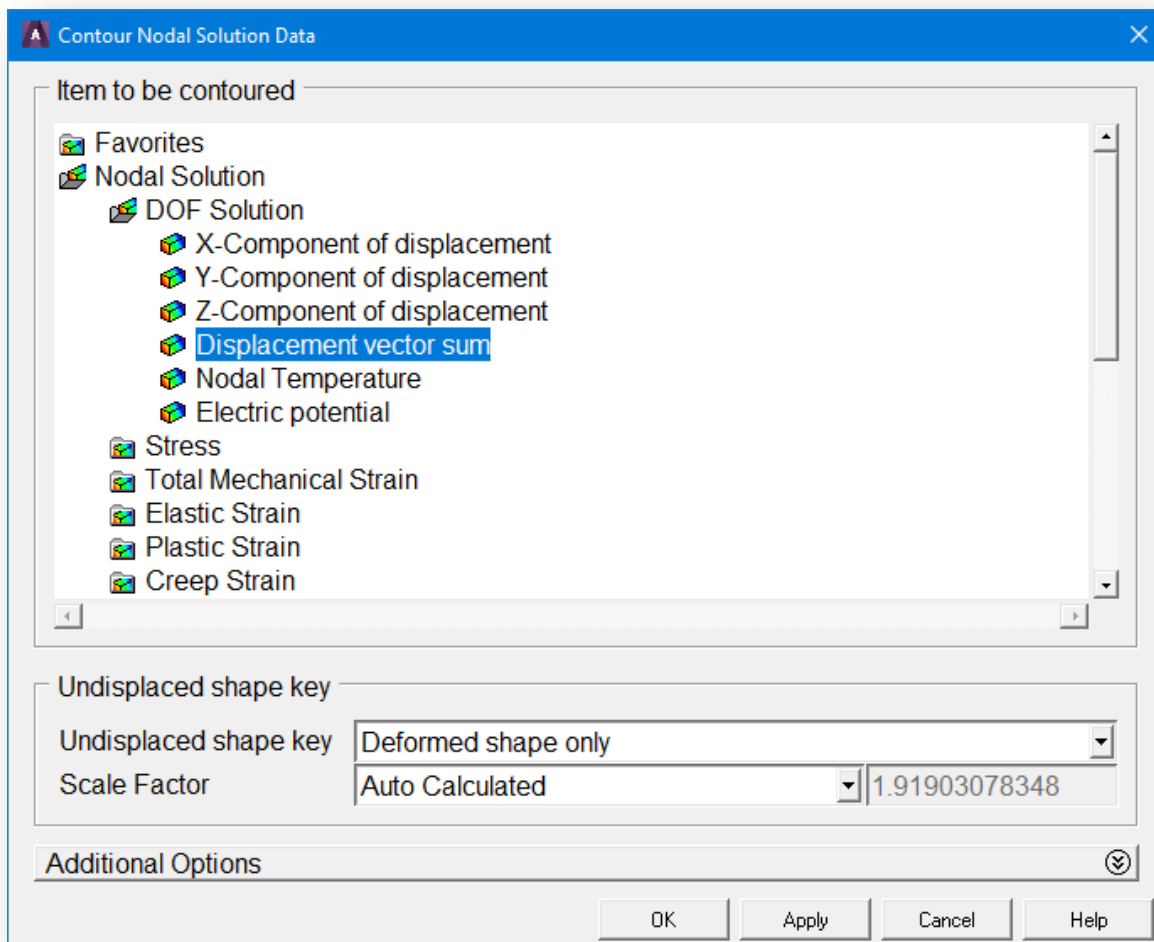
Pour voir le déplacement de l'actionneur électrothermique, effectuez les étapes suivantes :

1. Dans le menu principal, choisissez General Postproc Plot Results Contour Plot Nodal Solu (Fig. IV.34).
2. Dans la fenêtre Données de la solution nodale de contour, localisez et sélectionnez la somme des vecteurs de déplacement ou la composante Y du déplacement (Fig. IV.35).
3. Appuyez sur le bouton OK.

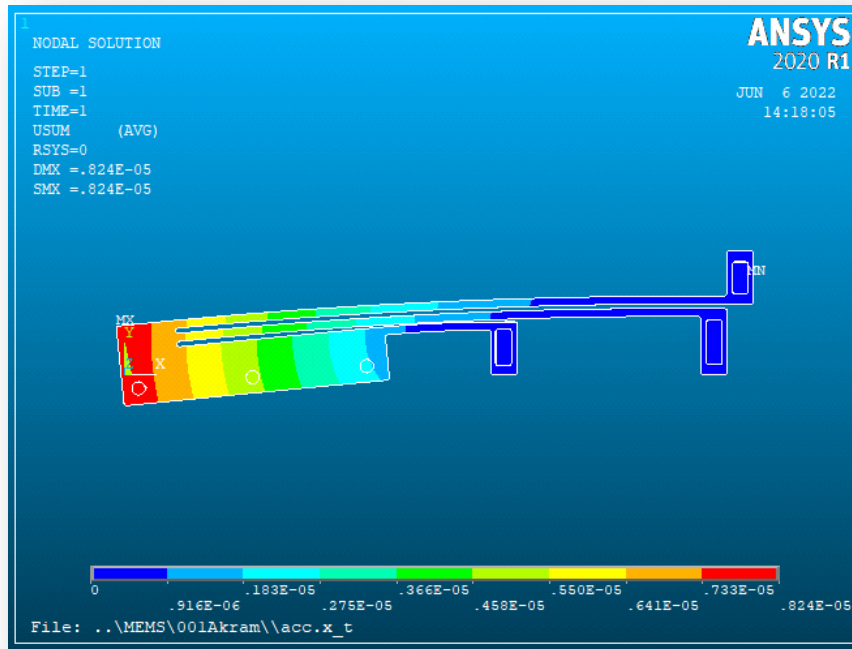
Les résultats seront affichés dans la fenêtre graphique (Fig. IV.36).



*Figure IV.34: Chemin de menu pour invoquer des opérations pour afficher les résultats de la simulation.*



*Figure IV.35: Fenêtre de données de solution nodale de contour.*



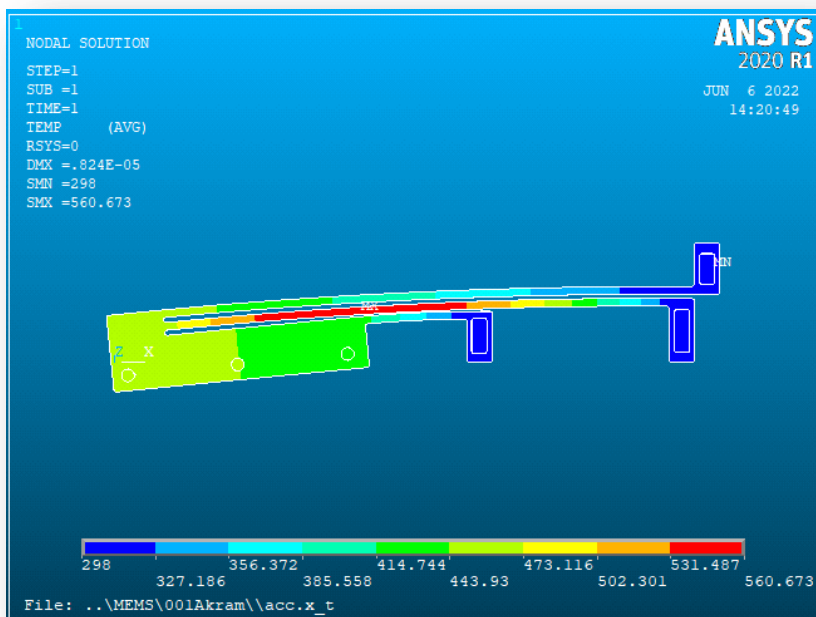
*Figure IV.36: Déplacement de l'actionneur électrothermique analysé pour alliage FeNbAs.*

#### IV.4.9.2. Température :

Pour voir la répartition de la température le long des bras de l'actionneur, nous devons effectuer les opérations suivantes :

1. Choisissez General Postproc Plot Results Contour Plot Nodal Solu.
2. Dans la zone Contour Nodal Solution Data, localisez et choisissez Nodal Temperature.
3. Appuyez sur le bouton OK.

La sortie sera affichée dans la fenêtre graphique (Fig. IV.37).

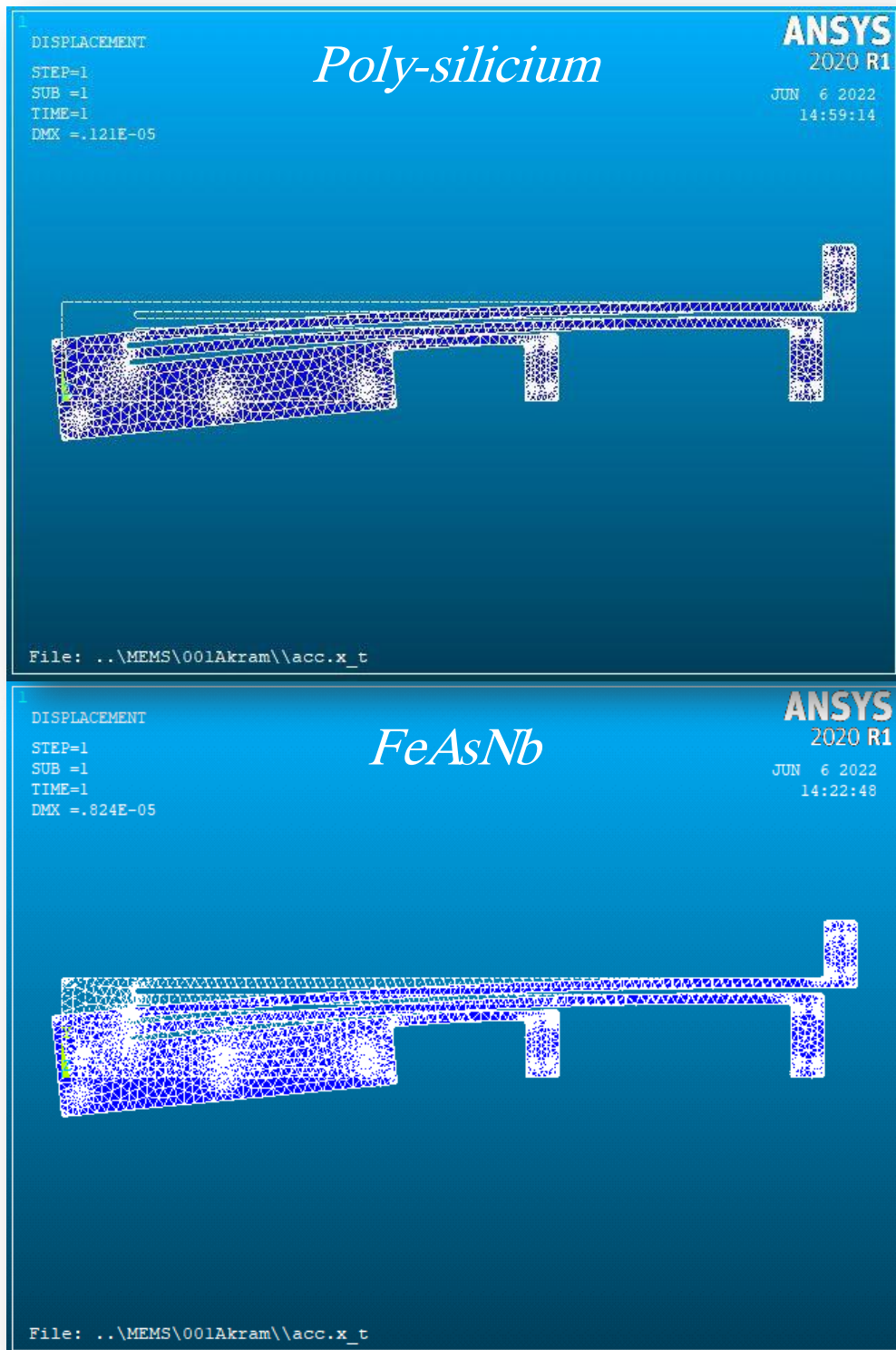


*Figure IV.37: Répartition de la température dans l'actionneur électrothermique analysé pour alliage FeNbAs.*

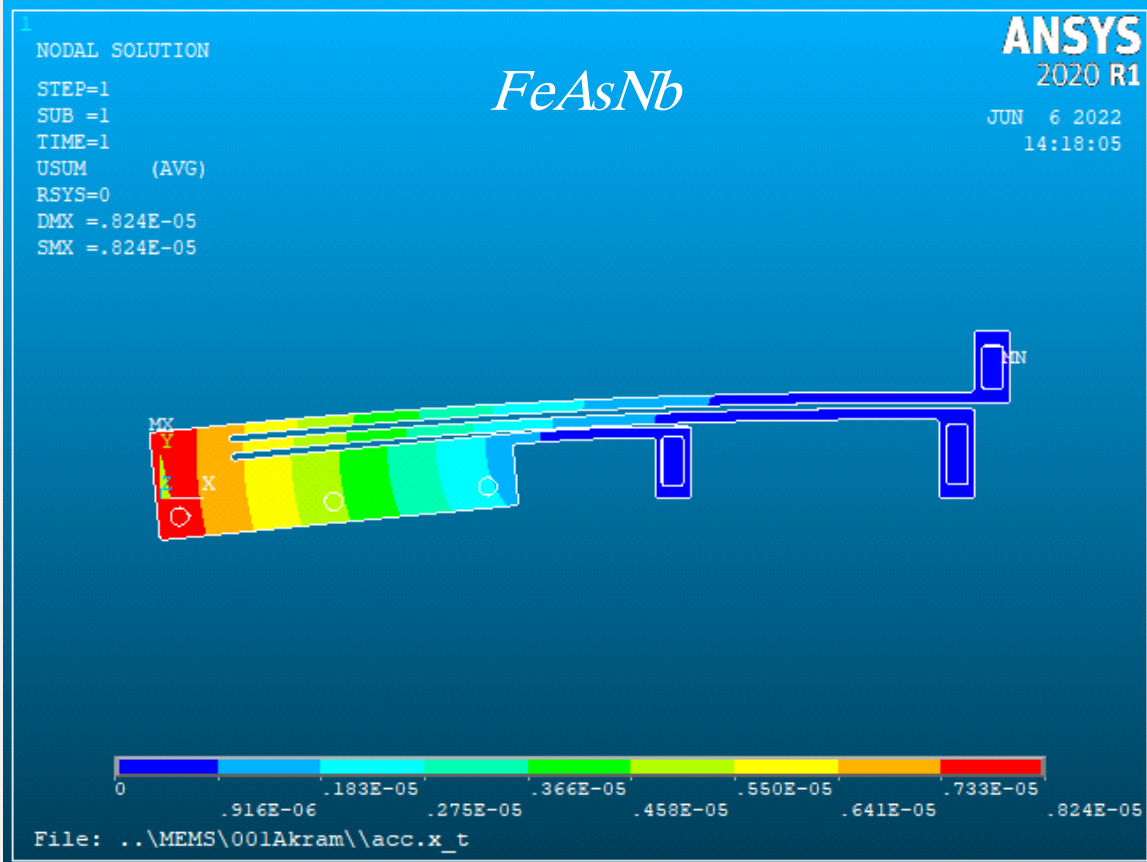
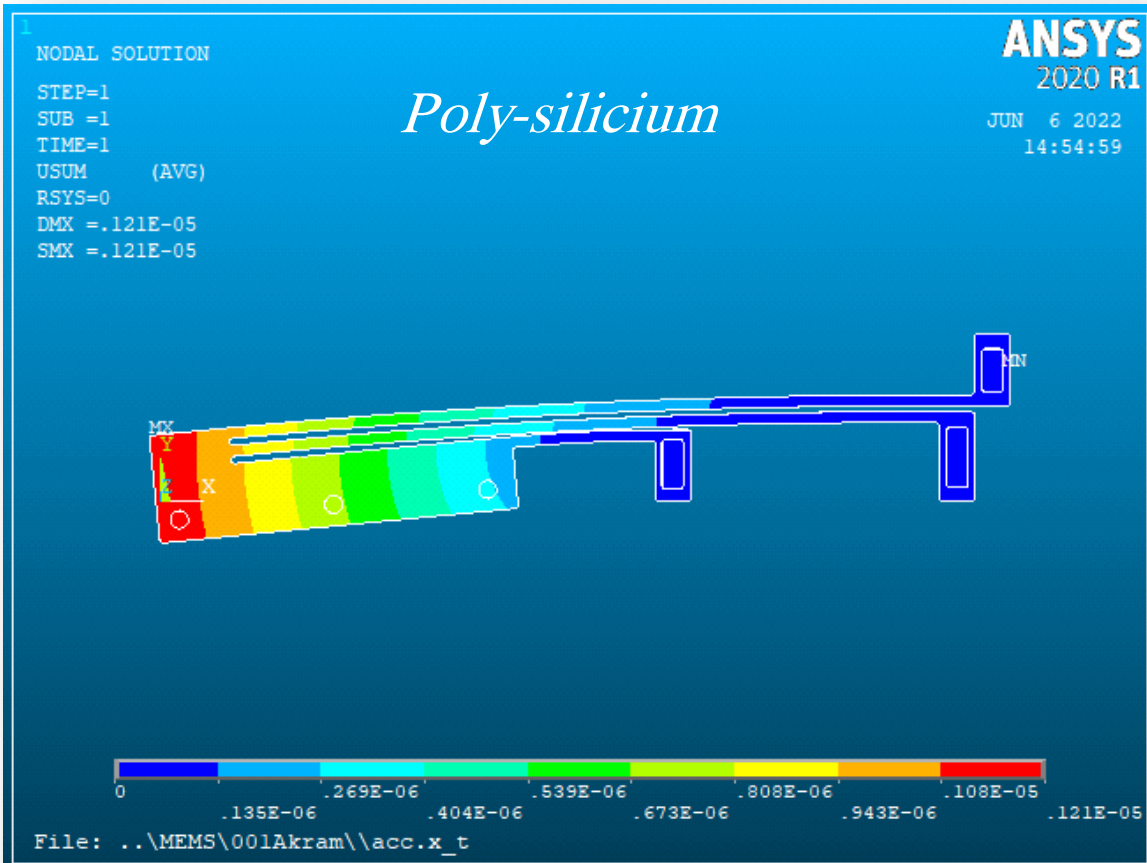


#### IV.5. Résultats :

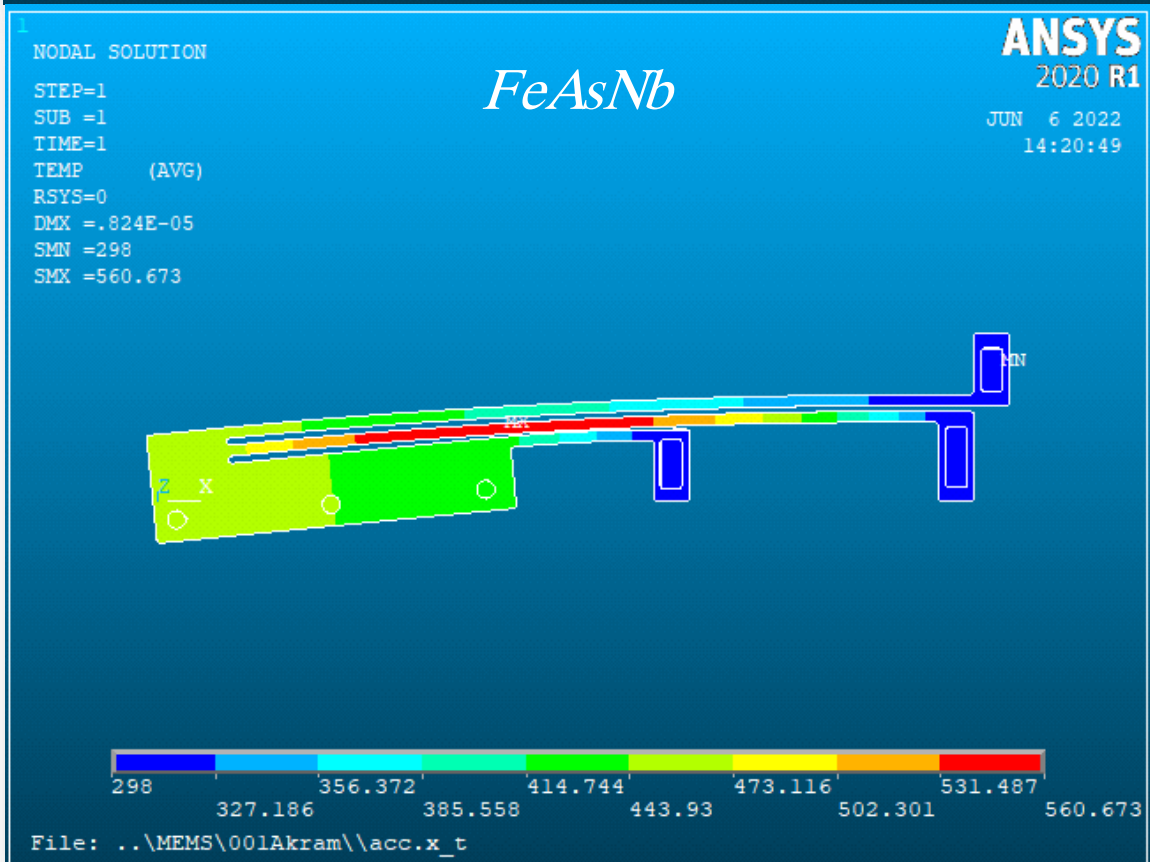
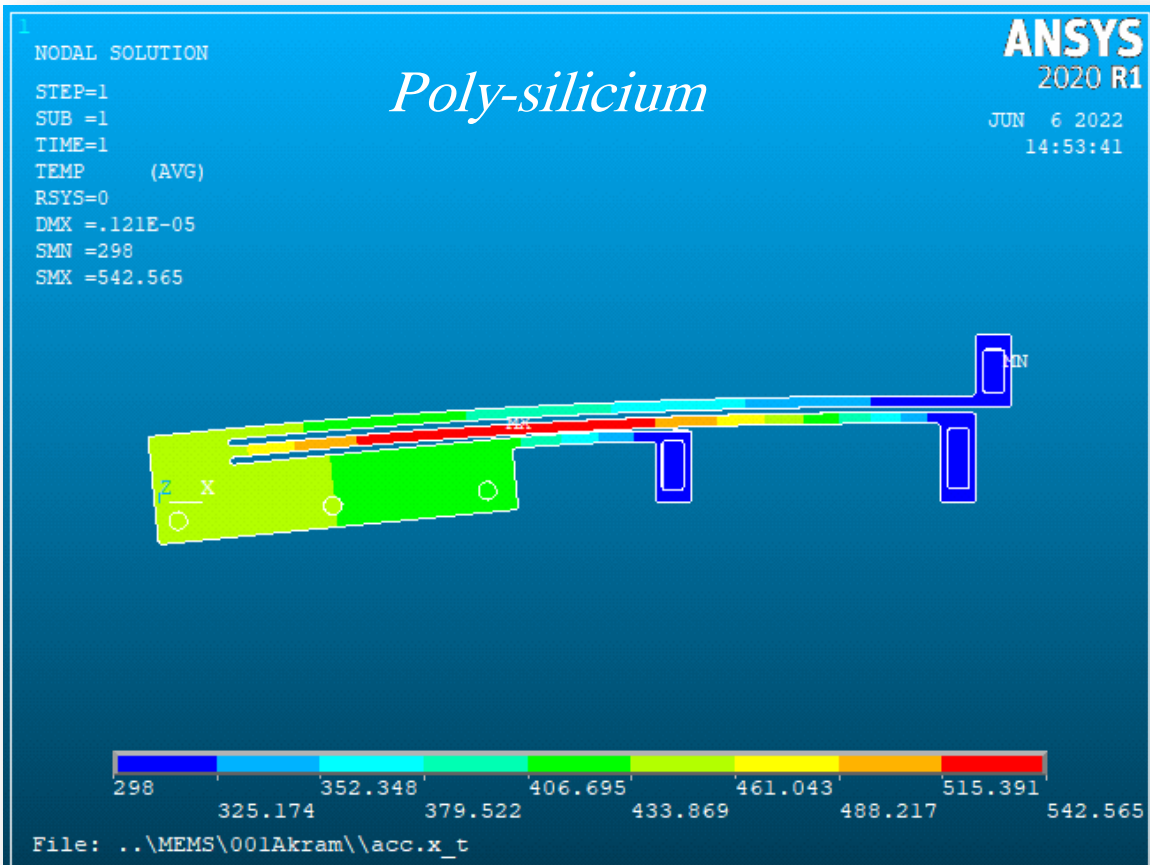
La figure IV.38 montre la forme déformée et la forme non déformée du poly-silicium et FeAsNb. La figure IV.39 montre la répartition de la température de surface pour l'actionneur. La figure IV.40 illustre le champ de déplacement à travers un tracé de couleur et déformation.



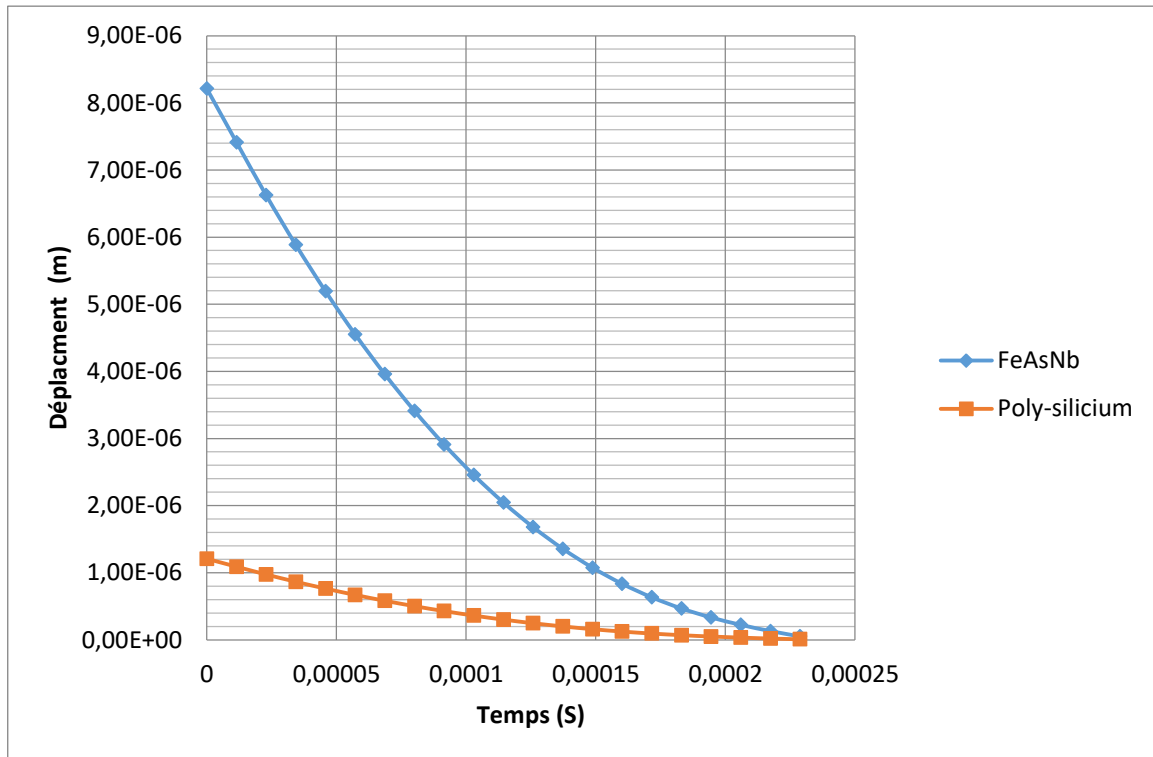
**Figure IV.38:** La réponse du contacteur (polysilicium et FeAsNb) avant et après chargement (charge électrique).



*Figure IV.39: Déplacement dans l'actionneur thermique.*



*Figure IV.40: Evolution de la température du substrat.*



**Figure IV.41:** Courbe de déplacement maximum pour les deux matériaux (Poly-Silicium et FeAsNb).

Dans Tableau 5 on a la comparaison entre les résultats de déplacement maximal et de température maximale des deux matériaux

**Tableau 5:** Tableau de comparaison entre les résultats de déplacement et de température des deux matériaux.

Matériaux	Déplacement (m)	Température (°K)
Poly-silicium	DMX= 0.121 e-05	SMX= 542.565
FeAsNb	DMX= 0.824e-05	SMX=560.673

#### IV.5.1. Discussion :

Dans les mêmes conditions, on a noté que le déplacement de l'alliage FeAsNb est sept fois supérieur à celle de poly-silicium. Avec la convergence des températures, qui était de 18,1 °K plus élevée dans FeAsNb que dans le poly-silicium en raison de la déformation considérable.

## **Conclusion:**

Selon les résultats obtenus par ANSYS, le déplacement du nouveau matériau FeAsNb était sept fois supérieur à celui du poly-silicium dans les mêmes conditions, indiquant que notre nouveau matériau FeAsNb est plus sensible et nécessite moins de courant électrique pour donner le même déplacement requis (l'intensité du courant peut être réduite en ajoutant une résistance), sachant que le nouveau matériau est constitué de fer, qui est un élément disponible, répandu et peu coûteux.

Il est également possible d'améliorer le modèle en étendant la largeur du bras chaud pour réguler le déplacement requis.



## Conclusion générale:

Le développement de nouvelles technologies de dispositifs dédiés à la caractérisation physique à l'échelle nanométrique et à la fabrication de microstructures est désormais un problème important faisant l'objet d'études approfondies.

Les technologies de la microélectronique sur silicium ont ouvert un champ d'investigation très important des microsystèmes, modifié les approches automatisées et introduit de nouvelles solutions. Ils permettent la production en masse d'un grand nombre d'instruments utiles à la caractérisation des microstructures. Ils permettent d'intégrer les opérations de lecture et de détection sur ces appareils.

Nous avons modélisé le comportement d'un bras d'actionneur thermique micro électrothermique dans le cadre de cet mémoire.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit quelques principes fondamentaux sur les microsystèmes et leurs applications. Nous avons également mis en place plusieurs processus de production.

Le deuxième chapitre traite des différents actionneurs et de leurs principes de fonctionnement, avec un focus sur les actionneurs thermiques dont nous modéliserons et examinerons le comportement plus tard.

Le troisième chapitre est consacré à l'une des questions les plus cruciales du mémoire, à savoir les matériaux de fabrication du microsystème, dont le plus important est le silicium. Nous avons également introduit des matériaux de la famille Heusler actuellement l'axe de recherche de plusieurs chercheurs grâce à leurs qualités élastiques, thermiques et transport très importantes, qui pourront être des candidats pour le remplacement de silicium, qui est à cause de son exploitation mondiale en cours d'épuisement.

Le quatrième chapitre est le cœur de cette recherche. Essentiellement, la compréhension de la déflexion du bras détermine le comportement de ce type de mouvement. La déformation est obtenue par action thermoélectrique à l'aide de silicium. Cela nous a permis d'étudier la déformation du bras des actionneurs thermiques dans les mêmes conditions mais avec un matériau de fabrication différent :

Nous commençons par générer le comportement du bras chaud. Cela nous a permis de calculer la valeur de déplacement et le changement de température le long du bras entier.

Dans la deuxième section, le silicium a été remplacé par un autre matériau Semi-Heusler, et nous avons reçu des données supplémentaires concernant la nouvelle substance.

Enfin, nous compilons les résultats dans un seul tableau et les comparons pour clore cette étude, et proposer ce nouveau alliage pour la fabrication des systèmes électromécaniques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] M. Szermer et A. Napieralski Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, *MEMS fundamentals with ANSYS simulation of basic sensors and actuators: a manual for laboratory work on computer-aided MEMS design*. Lodz: Lodz University of Technology Press, 2020.
- [2] P. par F. F. | 9 F. 2022 | - ECO -, CONJONCTURE, et SEMICONDUCTEUR, « La consommation de silicium a bondi de 14% en 2021 », *VIPress.net*, 9 février 2022. <https://vipress.net/la-consommation-de-silicium-a-bondi-de-14-en-2021/> (consulté le 12 juin 2022).
- [3] « Conception, modélisation, fabrication et caractérisation de composants MEMS RF ». <https://www.idref.fr/211062022#> (consulté le 11 juin 2022).
- [4] P. PUGET et P. NERIN, « Les microsystèmes : technologies et traitement de l'information' ». 15 septembre 1997.
- [5] « Nikola Tesla U.S. Patent 464,667 - Electrical Condenser ». <https://teslauniverse.com/nikola-tesla/patents/us-patent-464667-electrical-condenser> (consulté le 11 juin 2022).
- [6] G. Fleury, « Etude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable », p. 171.
- [7] « The resonant gate transistor | Semantic Scholar ». <https://www.semanticscholar.org/paper/The-resonant-gate-transistor-Nathanson-Newell/4916a2d35534dacbe87058a1930021278abb17d2> (consulté le 11 juin 2022).
- [8] « Introduction aux microsystème (MEMS) - PDF Free Download ». <https://docplayer.fr/208344244-Introduction-aux-microsysteme-mems.html> (consulté le 11 juin 2022).
- [9] G. Fleury, « Étude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable », p. 48, 2006.
- [10] « Définition MEMS (systèmes micro-électromécaniques) », *Actualité Informatique*, 13 avril 2020. <https://actualiteinformatique.fr/internet-of-things-iot/definition-mems-systemes-micro-electromecaniques> (consulté le 11 juin 2022).
- [11] « Bosch Sensortec », *Bosch Sensortec*. <https://www.bosch-sensortec.com/> (consulté le 11 juin 2022).
- [12] « Home - Vesper ». <https://vespermems.com/> (consulté le 11 juin 2022).
- [13] « test4.pdf ». Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://csidoc.insa-lyon.fr/these/1999/anthierens/test4.pdf>
- [14] M. Denoual, « Contexte de l'intégration des systèmes », p. 66.



- [15] B. Asmaa, « Etude de l'actionnement électrostatique d'une membrane en Silicium-Contrôle du volume injecté par une micro pompe », p. 97.
- [16] H. Rostaing, « CONCEPTION, MODELISATION ET FABRICATION D'UN MICRO-ACTIONNEUR BISTABLE, HORS PLAN ET MAGNETIQUE », p. 174.
- [17] R. Mahameed, M. A. El-Tanani, et G. M. Rebeiz, « A zipper RF MEMS tunable capacitor with interdigitated RF and actuation electrodes », *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, n° 3, p. 035014, févr. 2010, doi: 10.1088/0960-1317/20/3/035014.
- [18] J. Soen, « Contribution à la modélisation et à la commande des microsystèmes capteurs non linéaires », Phd thesis report, Université Joseph Fourier Grenoble1, France, 2007.
- [19] « 1386-172-p54.pdf ». Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/1386/1386-172-p54.pdf>
- [20] « ESIEE Paris, l'école de l'innovation technologique | Grande école d'ingénieurs | ESIEE Paris ». <https://www.esiee.fr/> (consulté le 11 juin 2022).
- [21] « New Line of MEMS Vision Digital Humidity Sensors ». <https://blog.servoflo.com/new-line-of-mems-vision-digital-humidity-sensors> (consulté le 11 juin 2022).
- [22] « Yole Group », *Yole Group*. <https://www.yolegroup.com/> (consulté le 11 juin 2022).
- [23] « document.pdf ». Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00627334/document>
- [24] A. L. Benabid, S. Chabardès, et E. Seigneuret, « Deep-brain stimulation in Parkinson's disease: long-term efficacy and safety – What happened this year? », *Current Opinion in Neurology*, vol. 18, n° 6, p. 623-630, déc. 2005, doi: 10.1097/01.wco.0000186839.53807.93.
- [25] « 200603parkinsonsynth.pdf ». Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.unilim.fr/campus-neurochirurgie/IMG/pdf/200603parkinsonsynth.pdf>
- [26] P. Caillat, A. Bourgerette, F. Vavherand, et A.-L. Benabid, *Patent No. WO 2005/039694 A1*. 2003.
- [27] « CD24.pdf ». Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/1482/CD24.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [28] A. Dudka, « Etude, optimisation et implémentation en silicium du circuit de conditionnement intelligent haute-tension pour le système de

- récupération électrostatique d'énergie vibratoire, » Paris 6, Paris, France, 2014.
- [29] « Publications référencées dans HAL (mise à jour en cours) », *LABORATOIRE DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ (LGEF)*, 25 août 2017. <https://lgef.insa-lyon.fr/fr/content/publications-referencées-dans-hal-mise-jour-en-cours> (consulté le 11 juin 2022).
- [30] « Principles of Microelectromechanical Systems | Wiley Online Books ». <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470649671> (consulté le 11 juin 2022).
- [31] M. Tabib-Azar, *Microactuators: electrical, magnetic, thermal, optical, mechanical, chemical & smart structures*. Boston; Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [32] D. J. Laser et J. Santiago, « A Review of Micro Pumps », *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, p. R35, avr. 2004, doi: 10.1088/0960-1317/14/6/R01.
- [33] « Ms.ELN.Belaidi+Douch.pdf ». Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/11591/1/Ms.ELN.Belaidi%2BDouch.pdf>
- [34] F. Lepoitevin, « Développement et réalisation de briques de base pour la conception de microrelais électromagnétiques et magnétostrictifs », p. 162.
- [35] N. GAURAV, *DYNAMIC SIMULATION AND DESIGN OF RF-MEMS SWITCHES MADE OF STEEL*. 2012.
- [36] « MEMS : le monde microscopique de votre smartphone - Page 8 sur 20 », *Tom's Hardware : actualités matériels et jeux vidéo*, 11 janvier 2012. <https://www.tomshardware.fr/mems-le-monde-microscopique-de-votre-smartphone/> (consulté le 12 juin 2022).
- [37] D. Peyrou, « Etude théorique et expérimentale des techniques d'assemblage et de mise en boîtier pour l'intégration de microsystèmes radio-fréquences », These de doctorat, Toulouse 3, 2006. Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2006TOU30130>
- [38] « Finite-Element Simulation of Micro-Electromechanical Systems (MEMS) by Strongly Coupled Electromechanical Transducers ». [https://www.researchgate.net/publication/3110784\\_Finite-Element\\_Simulation\\_of\\_Micro-Electromechanical\\_Systems\\_MEMS\\_by\\_Strongly\\_Coupled\\_Electromechanical\\_Transducers](https://www.researchgate.net/publication/3110784_Finite-Element_Simulation_of_Micro-Electromechanical_Systems_MEMS_by_Strongly_Coupled_Electromechanical_Transducers) (consulté le 12 juin 2022).
- [39] A. Delehelle, « Étude d'un concept innovant d'actionneur électromécanique linéaire à effets magnétique et piézoélectrique en vue d'applications dans le domaine des commandes de vol », p. 252.

- [40] « 200603parkinsonsynth.pdf ». Consulté le: 11 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.unilim.fr/campus-neurochirurgie/IMG/pdf/200603parkinsonsynth.pdf>
- [41] « thèse ZERD.pdf ». Consulté le: 12 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/20967/th%c3%a9se%20ZERD.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [42] Z. Charifi, B. Hakim, et G. Torkia, « Propriétés structurales, électroniques et magnétiques de l'état fondamentale des Alliages half Heusler », p. 91.
- [43] « MPHY26.pdf ». Consulté le: 12 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/3161/MPHY26.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [44] « Phys. Rev. Lett. 50, 2024 (1983) - New Class of Materials: Half-Metallic Ferromagnets ». <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.50.2024> (consulté le 12 juin 2022).
- [45] « Phys. Rev. B 66, 134428 (2002) - Origin and properties of the gap in the half-ferromagnetic Heusler alloys ». <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.66.134428> (consulté le 12 juin 2022).
- [46] « The magnetization distributions in some Heusler alloys proposed as half-metallic ferromagnets - IOPscience ». <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/12/8/325> (consulté le 12 juin 2022).
- [47] S. Mizukami *et al.*, « Low damping constant for Co<sub>2</sub>FeAl Heusler alloy films and its correlation with density of states », *Journal of Applied Physics*, vol. 105, n° 7, p. 07D306, avr. 2009, doi: 10.1063/1.3067607.
- [48] « Anisotropic Intrinsic Damping Constant of Epitaxial Co<sub>2</sub>MnSi Heusler Alloy Films - IOPscience ». <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.46.L205> (consulté le 12 juin 2022).
- [49] « models.mph.thermal\_actuator\_jh.pdf ».
- [50] « models.mems.thermal\_actuator\_tem\_parameterized.pdf ».