

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI CONSTANTINE1
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

N° d'ordre :
Série :

**THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN SCIENCES
EN GÉNIE MÉCANIQUE
OPTION : CONSTRUCTION**

**THÈME
ANALYSE ET MODÉLISATION NUMERIQUE
DES DÉFORMATIONS ÉLASTIQUES
DES POUTRES EN MATÉRIAUX
PIÉZO - LAMINÉS**

Présenté par :

Monsieur LEBIED Abdelaziz

Soutenu le : 03 / 07 / 2017 devant le jury :

Président : Mr. K.TALBI

Rapporteur : Mr. B.NECIB

Examineur : Mr. A.BOUCHOUCHA

Mr. B.REDJEL

Mr. Y.KABAR

Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1

Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1

Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1

Prof. Université Badji Mokhtar Annaba

MCA. Ecole National Polytechnique Constantine

Invité : Mr.M.SAHLI

MA. Ecole National Polytechnique Constantine

REMERCIEMENTS

*J'exprime toute ma reconnaissance envers Monsieur **Brahim NECIB**, Professeur au département de génie mécanique, Université Mentouri Constantine pour son parfait encadrement et pour avoir toujours répondu à mes nombreuses sollicitations tout au long de la réalisation des travaux de thèse ainsi que pendant la rédaction de ce mémoire.*

*Je tiens vivement à remercier Monsieur **KAMEL TALBI**, Professeur au département de génie mécanique, Université des frères Mentouri Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Messieurs **Ali BOUCHOUCHA**, Professeur à Université des frères Mentouri Constantine, **REDJEL BACHIR**, Professeur à l'Université Badji mokhtar Annaba et **KABAR YACINE** Maître de conférence A l'école Nationale Polytechnique de Constantine, pour avoir accepté de rapporter ce travail de thèse ainsi que pour les corrections qu'ils y ont apportées.*

*Je remercie Monsieur **Mohamed Lakhdar SAHLI**, Ex Docteur Ingénieur à l'ENSM de France et Maître Assistant à l'école Nationale Polytechnique de Constantine pour les divers échanges et discussions scientifiques très instructifs dans le domaine que nous avons eu durant toute la période de ce travail et qu'il trouve ici aussi toutes mes profondes reconnaissances et remerciements.*

Que tous les membres trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Enfin, il me tient à cœur de remercier ma famille et surtout à mes trois enfants Meissa, Louei et Raid.

Résumé

Actuellement, les systèmes intelligents sont un domaine en plein développement et en pleine effervescence. Ils disposent d'un intérêt majeur : leur capacité d'adaptation au milieu ambiant, selon l'évolution des conditions environnantes. Dans ce cadre, on constate une envolée des publications dans ce domaine depuis le début des années 80. Depuis cette période, des efforts considérables en recherche fondamentale ont été consacrés au développement de nouvelles structures adaptables. L'intérêt de ces structures dites intelligentes se manifeste par le fait qu'elles apportent des réponses optimales à des problèmes extrêmes complexes, comme la micromanipulation de micro-objets dont la taille est comprise entre quelques μm et 1 mm, objets constituent le micro monde.

Nous avons ainsi pu obtenir par des solutions numériques à l'aide de méthode éléments finis, une analyse précise sur les différents modes de déformation des poutres piézoélectriques, relèvent un aspect majeur lié à la polarisation des poutres PZT. On s'est servi de cette étude numérique pour extraire le mode qui nous intéressait, le mode en flexion dans le plan et mettre en avant, d'une part, l'effet de la polarisation, et d'autre part, les propriétés mécaniques et piézoélectriques sur le fonctionnement de la micro-pince adaptable pour assurer la prise et la dépose des micro-objets de toute forme. Nous avons ensuite corroboré le tout avec l'analyse comparative pour confronter les trois études (analytique, numérique et expérimentale) pour une validation.

Mots clés: matériau intelligent PZT, potentiel électrique, élasticité, éléments finis.

Abstract

Currently, intelligent systems are a rapidly developing field and booming. They have a major advantage: their adaptability to the environment, according to changing environmental conditions. In this context, there is a surge of publications in this field since the early 80s. Since that time, considerable efforts in basic research has been devoted to developing new adaptive structures. The interest of these so-called smart structures is manifested by the fact that they provide optimal extreme problems complex responses, such as micromanipulation of micro-objects whose size ranges from a few microns to 1 mm, objects are the micro world.

We were able to obtain by numerical solutions using finite element method, a precise analysis of the different modes of deformation of the piezoelectric beams, are an important aspect related to the polarization of PZT beams. Was used in this study to extract the digital mode that interested us, the bending mode in the plan and highlight the one hand, the effect of polarization, and on the other hand, the mechanical properties and on operation of the piezoelectric micro-clamp suitable to secure the plug and removal of micro-objects of any shape. We then corroborated with any benchmarking to compare the three studies (analytical, numerical and experimental) for validation.

Key words: intelligent PZT material, electric potential, elasticity, finite elements.

المواد الذكية أو ما يسمى بالأحرى الأنظمة الذكية في هذا الزمان هي في تطور مستمر و ملحوظ و هذا نظرا لخاصيتها اللامعة بتأقلمها مع المحيط بمختلف أنواعه. نجد في هذا المجال كثير من المنشورات عرضت منذ الثمانينات. وبداية من تلك الفترة مجهودات كثيرة في البحث العلمي الاساسي خصصت في تطوير أنظمة جديدة قابلة للتكيف و التكيف. الهدف من هذه الأنظمة الذكية هو تطويرها وذلك للإستفادة من خاصيتها و إستعمالها في الأنظمة المعقدة، مثل جهاز ذو الحجم الصغير لرفع الأجسام الصغيرة جدا ذات الأحجام بين الميكرومتر و المليمتر.

لقد تحصلنا على عدة حلول عددية بإستعمال طريقة العناصر المحدودة، دراسة تحليلية دقيقة على حالات تشوه العارضة أو المادة الكهربائية الضغطية نتجت من خلالها أن لها علاقة مباشرة بتقطيب هذه المادة المذكورة آنفا. لقد إستخدمنا هذه الدراسة العددية لإستخلاص حالة أو حركة التشوه للمادة أو العارضة المرغوب فيها، حالة التشوه خلال الإنحناء في المستوى و حالة الإستقطاب من جهة و الخصائص الميكانيكية و الكهربائية الضغطية من جهة أخرى و هذا لإستغلال جهاز الرفع الصغير لضمان المسك و الوضع للأجسام الصغيرة جدا على إختلاف أشكالها. قمنا بإجراء تأكيدات بالمقارنة للنتائج التحليلية مع النتائج العددية ثم مع نتائج تجريبية.

الكلمات المفتاح : المادة المركبة، المادة الكهربائية الضغطية الذكية ، الكمون الكهربائي ، المرونة ، العناصر المحدودة.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Matériaux Intelligents : matériaux piézoélectriques laminés	4
I.1 Introduction	5
I.2 Principe de fonctionnement d'un système intelligent	5
I.3 Description des éléments	7
I.3.1 Capteur	7
I.3.2 Transmission des données ou des instructions	7
I.3.3 Unité de commande et de contrôle	7
I.3.4 Actionneurs	8
I.4 Matériaux utilisés dans les systèmes intelligents	9
I.4.1 Caractéristiques principales	9
I.5 Matériaux principaux	9
I.5.1 Les Alliages à mémoire de forme	9
I.5.1.1 Domaines d'applications	10
I.5.2 Les matériaux magnétostrictifs	11
I.5.2.1 Domaines d'applications	12
I.5.3 Les fibres optiques	13
I.5.3.1 Domaines d'applications	14
I.5.4 Les matériaux piézoélectriques	15
I.5.4.2 Les principaux matériaux piézoélectriques	15
I.5.4.2.1 Les oxydes ferroélectriques	15
I.5.4.2.2 Le quartz et les composés analogues	16
I.5.4.2.3 Les semi-conducteurs	16
I.5.4.2.4 Les polymères	17
I.5.4.2.5 Les sels	17
I.5.4.2.6 Les laminés piézoélectriques	17
I.5.4.3 Mise en forme et procédés	17
I.5.4.3.1 Céramiques	17
I.5.4.3.2 Monocristaux	17
I.5.4.3.3 Composites	18
I.5.4.3.4 Couches minces	18
I.5.4.4 Domaines d'applications	18
I.5.4.5 Avantages éventuels	19
I.6 Conclusion	19
Chapitre II : les actionnaires piézoélectriques	21
II.1 Introduction	22
II.2 Découverte de l'effet piézoélectrique	22
II.2.1 Effet piézoélectrique direct et inverse	23
II.2.2 Origine cristallographique de la piézoélectricité	24
II.3 Propriétés physiques des matériaux piézoélectriques	25
II.3.1 Ferroélectricité	25
II.3.2 Polarisation des matériaux ferroélectriques	25
II.3.3 Dépolarisation	26
II.3.3.1 Dépolarisation électrique	26

II.3.3.2 Dépolarisation mécanique	27
II.3.3.3 Dépolarisation thermique	27
II.3.4 Cycle d'hystérésis des matériaux ferroélectriques polarisés (PZT)	27
II.3.5 Vieillessement	27
II.3.6 Température de curie et transition de phase	28
II.4 Les actionneurs piézoélectriques	28
II.4 .1 Actionneur axial	29
II.4 .2 Actionneur transversal	30
II.4 .3 Actionneur en cisaillement d'épaisseur	30
II.4 .4 Actionneur piézoélectrique bimorphe	31
II.4 .5 Actionneur piézo-laminé	31
II.5 Spécificités	32
II.6 Domaines d'utilisation de la piézoélectricité en ingénierie	32
II.7 Dispositifs piézoélectriques et leurs applications	33
II.7.1 Réduction des vibrations d'un bras de satellite et des ailes d'avions	34
II.7.2 Micro-commutateurs	35
II.7.3 Micro-pompe	36
II.7.4 Micro pinces actionnées par des matériaux piézoélectriques	36
II.7.5 Micro robots piézoélectriques	37
II.7.6 Chaussures piézoélectriques développées par le M.I.T	38
II.8 Conclusion	38
Chapitre III : Théorie linéaire de la piézoélectricité	39
III.1 Introduction	40
III.2 La loi de Hooke, les matériaux orthotropes	40
III.3 Transformation des axes par rapport aux plans de symétrie	42
III.4 Equations constitutives de la piézoélectricité	46
III.5 Coefficients piézoélectriques et modes de couplage électromécanique	49
III.6 Equations de la piézoélectricité en mode-33	50
III.7 Formalisme général et coefficients piézoélectriques	52
III.8 Le coefficient de couplage électromécanique	53
III.9 Déformation d'un élément piézoélectrique	54
III.9.1 Déformation axial	56
III.9.2 Déformation transversal	57
III.9.3 Déformation en cisaillement d'épaisseur	57
III.10 Choix du matériau piézoélectrique	58
III.11 Quel matériau pour l'actionneur?	59
III.12 Quelle structure d'actionneur choisi?	60
III.13 Conclusion	62
Chapitre IV : Identification de la loi de comportement	63
IV.1 Introduction	64
IV.1.1 La micromanipulation sans contact	64
IV.1.2 La micromanipulation par contact	64
IV.2 La micropince à deux doigts de serrage	65
IV.2.1 Micropinces actionnées par un principe électrostatique	66

IV.2.2 Micropinces actionnées par la pression d'un fluide	66
IV.2.3 Micropinces actionnées par des alliages à mémoire de forme	66
IV.2.4 Micropinces actionnées par des déformations thermiques	67
IV.3 Micropinces piézoélectriques	68
IV.3.1 Fonctionnalités d'un micropréhenseur	69
IV.3.2 Caractéristiques envisagées d'une micropince	69
IV.3.3 Quel principe d'actionnement ?	70
IV.4 Principe de fonctionnement d'une poutre bimorphe piézoélectrique	71
IV.5 Modélisation statique d'une poutre bimorphe	72
IV.5.1 Poutre soumise à un moment extérieur	74
IV.5.2 Poutre soumise à une force extérieure	76
IV.5.3 Poutre soumise à une charge uniforme	78
IV.5.4 Poutre soumise à une différence de potentiel	79
IV.6 Performances théoriques d'une poutre piézoélectrique	82
IV.6.1 Déflexions	83
IV.6.2 Influence des erreurs de centrage des électrodes a et b sur le couplage	84
IV.6.3 Influence du gap sans électrode w_0 sur les déflexions δz	86
IV.6.4 Influence du force concentrée et du potentiel électrique sur une poutre piézoélectrique	88
IV.7 Conclusion	89
Chapitre V : Modélisation et simulation numérique d'un micro-actionneur piézoélectriques	90
V.1 Simulations électromécaniques par la méthode des éléments finis	91
V.2 Choix d'un matériau piézoélectrique	92
V.3 Hypothèse de simulation	93
V.4 Résultats de la simulation	93
V.4.1 Simulation du comportement électromécanique sous déplacement imposé	94
V.4.1.1 Déplacement	94
V.4.1.2 Potentiel électrique	94
V.4.1.3 Contrainte σ_{yy}	95
V.4.2 Simulation du comportement électromécanique sous champs électrique	96
V.4.2.1 Déformé en mode de traction	96
V.4.2.1.1 Déplacement	96
V.4.2.1.2 Potentiel électrique	97
V.4.2.2 Déformé en mode de flexion	98
V.4.2.2.1 Champ électrique	98
V.4.2.2.2. Déplacement globale	99
V.4.2.2.3 Déplacement du PZT PIC 141 pour différent voltage	100
V.5 Conclusion	101
Chapitre VI : Caractérisation par modélisation et simulation de la déformée d'un microsystème intelligent pour la micro-robotique	103
VI.1 Introduction	104
VI.2 Présentation du prototype de micro-pinces intelligente	105
VI.2.1 Description du prototype	105

VI.2.2 Adaptation des organes terminaux	106
VI.3 Simulations par éléments finis	107
VI.3.1 Doigt piézoélectrique simplement supporté soumis à un champ électrique	108
VI.3.2 Validation expérimentale et comparaison analytique	111
VI.3.3 Micro-pince piézoélectrique à deux doigts de serrage soumis à un champ électrique	115
VI.3.3.1 Modèle EF sans organes terminaux	115
VI.3.3.2 Modèle EF avec organes terminaux	119
VI.3.4 Exemple d'application à la manipulation de micro-objets	123
VI.4 Conclusions	128
Chapitre VII Modélisation et simulation numérique d'un micromanipulateur à base d'actionneurs à mémoire de forme pour la manipulation de micro-objets en milieu liquide	129
VII.1 Introduction	130
VII.2 Présentation des composites adaptables utilisés	131
VII.3 simulation numérique d'un matériau adaptable TiNi/epoxy	132
VII.4 Analyse des résultats numériques	134
VII.5 Analyses expérimentales	134
VII.5.1 Matériaux de l'étude	134
VII.5.2 Analyse DSC de la transformation martensitique	135
VII.5.3 Conception des matériaux adaptables TiNi/epoxy	136
VII.5.4 Analyse expérimentale du comportement mécanique par traction	136
VII.6 Validation expérimentale	138
VII.7 modélisation d'un système de micromanipulation immergée par changement de phase	138
VII.7.1 Modélisation et simulation par éléments finis	139
VII.7.2 Résultats de la simulation et discussions	139
VI.6 Conclusions	141
Conclusion générale	142
Annexe 1	149
Bibliographie	150

Liste des figures

Figure I.1 : Structure intelligente	6
Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une structure adaptative	8
Figure I.3 : Schéma représentatif de l'effet mémoire de forme	10
Figure I.4 : Télescope Hubble lancé en avril 1990	10
Figure I.5 : Micro actuateur pour la robotique	11
Figure I.6 : Stent cardiovasculaire comprimé et Stent cardiovasculaire relâché	11
Figure I.7 : Un transducteur magnétostrictif	12
Figure I.8 : Système de mesure magnétique linéaire	13
Figure I.9 : Principe d'une fibre optique	13
Figure I.10 : Une seule paire de fibre optique transporte un débit 10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre	14
Figure I.11 : Un endoscope	14
Figure I.12 : Chirurgie	15
Figure I.13 : Maille cristalline d'un cristal de structure pérovskite : PbTiO_3	16
Figure I.14 : Haut parleur de film piézoélectrique transparent	18
Figure II.1 : Illustration du comportement d'une pastille piézoélectrique : la contrainte appliquée crée un signal électrique	22
Figure II.2 : Structure cristalline d'un cristal ferroélectrique	23
Figure II.3 : Représentation de l'effet direct et inverse de la piézoélectricité	24
Figure II.4 : Représentation schématique de la polarisation à l'échelle cristalline	24
Figure II.5 Organigramme des classes cristallines	25
Figure II.6 : Domaines dipolaire électriques dans les matériaux piézoélectriques	26
Figure II.7 : Cycle d'hystérésis d'un matériau ferroélectrique	27
Figure II.8 : Principe de fonctionnement d'une poutre piézoélectrique de type cantilever	29
Figure II.9 : Actionneur axial	30
Figure II.10 : Actionneur transversal	30
Figure II.11 : Actionneur en cisaillement d'épaisseur	30
Figure II.12 : Déformation de la poutre Bimorphe	31
Figure II.13 : Déformation laminaire	32
Figure II.14 : Dispositif de contrôle actif de vibration d'un : (a) bras de satellite, (b) aile d'avion Boeing-US Air Force	35
Figure II.15 : (a) Poutre à ancrage simple, (b) poutre à double ancrage	35
Figure II.16 : Principe de fonctionnement d'un microsystème MEMS : (a) composant au repos - état haut (aucune tension n'est appliquée), (b) et (c) application de la tension d'actionnement : la poutre s'affaisse, (d) la poutre est totalement affaissée - état bas	35
Figure II.17 : Micro pompe piézoélectrique	36
Figure II.18 : Bilame en polymère piézoélectrique	37
Figure II.19 : Une micro-pince à poutres piézoélectriques : (a) unimorphes, (b) bimorphes	37
Figure II.20 : Robot nageur à propulsion ICPF (Laboratoire d'Automatique de Besançon)	37
Figure II.21 : Le bruit en voiture, réduit grâce à la piézoélectricité	38
Figure III.1 : Composantes d'un tenseur de déformation	40
Figure III.2 : (x_1-x_2) plan de symétrie	43
Figure III.3 : (x_2-x_3) plan de symétrie	44
Figure III.4 : Structure piézoélectrique	46
Figure III.5 : Mode longitudinal (mode-33)	50
Figure III.6 : Barreau piézoélectrique en mode-33	50
Figure III.7 : Décharge à déformation constante	53

Figure III.8 : Modes fondamentaux de déformation des céramiques piézo-électriques: a) déformation axiale, b) transversale, c) en cisaillement d'épaisseur et d) en cisaillement de face	55
Fig. III.9 : Déformation parasite par conservation du volume. Pour une déformation Longitudinale, la conservation du volume introduit un mode transversal mécanique	55
Figure III.10 : Barreaux en céramique piézo-électrique: a) actionneur axial, b) actionneur transversal	56
Figure III.11 : Influence d'une force extérieure sur la déformation d'un barreau: a) force constante, b) force proportionnelle au déplacement	57
Figure III.12 : Actionneur en cisaillement d'épaisseur	57
Figure III.13 : Cycle de fabrication des céramiques PZT par voie solide	58
Figure III.14 : Céramiques piézoélectriques (source Ferroperm)	60
Figure III.15 : Empilements piézoélectriques : schéma de principe ; Actionneur commercial (source Polytec-PI)	60
Figure III.16 : Unimorphe piézoélectrique : schéma de principe ; actionneur commercial Quickpack® (source ACX)	61
Figure III.17 : Un actionneur piézoélectrique monolithique et le détail d'une charnière élastique..72	61
Figure IV.1 : Schéma fonctionnel d'une micropince	65
Figure IV.2 : Architecture mécanique et principe de fonctionnement des actionneurs à interaction de contact de type "Scratch Drive Actuator"	66
Figure IV.3 : Effet mémoire de forme	67
Figure IV.4 : Pince à mémoire de forme localisée	67
Figure IV.5 : Principe de fonctionnement et prototype de micropince	68
Figure V.6 : bilame en polymère piézoélectrique	68
Figure IV.7 : Mobilités envisagées des doigts d'une micropince	70
Figure IV.8 : Structure perovskite d'une céramique piézoélectrique	71
Figure IV.9 : Principe de fonctionnement d'une poutre piézoélectrique (bimorphe)	71
Figure IV.10 : Schéma d'une poutre piézoélectrique (bimorphe)	72
Figure IV.11 : La coupe transversale de la poutre bimorphe	72
Figure IV.12 : Paramètres externes M_z , F_z , p_z , et paramètres internes α_z , δ_z et v_z (Selon l'axe z)	73
Figure IV.13 : Déformation de la poutre selon un cercle	75
Figure IV.14 : Exemple de simulation par éléments finis d'une micropince (ouverture et fermeture symétriques des doigts)	82
Figure IV.15 : Déflexions libres δ_z de la poutre piézoélectrique en fonction de la tension de commande V_z	83
Figure V.16 : Déflexions δ_z en fonction de V_y pour plusieurs erreurs de centrage tel que $a=b$ et $V_z=100V$	85
Figure IV.17 : Déflexions δ_z en fonction de V_z pour plusieurs erreurs de centrage tel que $a=b$ et $V_y=100V$	86
Figure IV.18 : Déflexions δ_z en fonction de V_z pour plusieurs erreurs de centrage tel que $a=b$ et $V_y=100V$	86
Figure IV.19 : Courbe de Paschen dans l'air (température 20°C)	87
Figure IV.20 : Déflexion δ_z en fonction de l'intervalle w_0 entre les électrodes adjacentes, pour $V_y=V_z=100V$	87
Figure IV.21: Caractéristique de la poutre piézoélectrique de type cantilever	88
Figure IV.22 : Déformées des poutres bimorphes actionnées par extension (a) 50 volts (b) 200 volts	88

Figure IV.23: Comparaison de l'évolution de la déformée d'une poutre bimorphe sous différentes sollicitations électrique et mécanique	89
Figure V.1 : Définition géométrique de l'élément fini PLANE 13	91
Figure V.2 : Définition géométrique de l'élément SOLID5	92
Figure V.3 : Définition géométrique de l'élément fini SOLID98	92
Figure V.4 : (a) élément SOLID226, (b) configuration de l'éprouvette utilisée lors du test de traction – maillage de l'éprouvette et conditions aux limites	93
Figure V.5 : Isovaleurs de déplacement U_{y-y} dans une éprouvette de traction en extension: (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255	94
Figure V.6 : Isovaleurs du potentiel électrique cumulé dans une éprouvette de traction en extension : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255	95
Figure V.7 : Isovaleurs de la contrainte σ_{yy} cumulée dans une éprouvette de traction en extension : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255	96
Figure V.8 : Isovaleurs de déplacement U_{xx} dans une éprouvette de traction en extension: (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255	97
Figure V.9 : Isovaleurs du potentiel électrique cumulé dans une éprouvette de traction en extension : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255	98
Figure V.10 : Isovaleurs du champ électrique cumulé dans une éprouvette en mode de flexion : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255	99
Figure V.11 : Isovaleurs de déplacement global cumulé dans une éprouvette en mode de flexion : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255	100
Figure V.12 : Isovaleurs de différents voltages en mode de flexion pour PZT PIC 141	101
Figure VI.1 : Organisation d'un microsystème intelligent	104
Figure VI.2 : Séquence (a) de dépose et prise d'un pignon de montre, (b) auto-centrage d'un grain de sel entre les mors de la pince et (c) saisie et dépose d'un micro-objet de forme sphérique de 200 μm de diamètre (photo MEB)	105
Figure VI.3 : Déflexion totale selon y d'une micro-pince composée de deux poutres PZT et des organes terminaux en polymère thermoplastique	106
Figure VI.4 : Exemples d'organes terminaux de micro-pincettes : (a) plat/encoche en V, (b) encoche circulaire/appendice en Λ et (c) plat/surface rugueuse	107
Figure VI.5 : (a) Dimensions en mm de l'un des deux doigts piézoélectrique d'une micro-pince intelligente à serrage parallèle, (b) une poutre PZT de type encastrée libre, maillée sous Ansys [®]	108
Figure VI.6 : Modèle de l'élément sensible	109
Figure VI.7 : Déformée d'une poutre piézoélectrique de type encastrée libre en PZT PIC 141 : (a) en mode de flexion hors plan x-y (b) en mode de flexion dans le plan x-y et (c) en mode proche du mode d'extension	109
Figure VI.8 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée suivant l'axe y dans Ansys [®] d'une poutre piézoélectrique de type encastrée libre en PIC 141, en mode de flexion dans le plan x-y	110
Figure VI.9 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée suivant l'axe y dans Ansys [®] d'une poutre piézoélectrique de type encastrée libre en PIC 255, en mode de flexion dans le plan x-y	110
Figure VI.10 : Visualisation de la déformée suivant l'axe y dans Ansys [®] d'une poutre PZT de type encastrée libre en PIC 255, en mode de flexion dans le plan x-y soumise à différentes valeurs de tension électrique : (a) 1Volt, (b) 20Volts, (c) 60 et (d) 80Volts	111
Figure VI.11 : (a) Vue isométrique du dispositif expérimental (dimensions en mm), (b) maillage EF 3D sous Ansys [®] de la poutre encastrée libre	112
Figure VI.12 : Visualisation de la déformée suivant l'axe z du modèle 3D pour le cas d'une poutre PZT de type encastrée/libre	112

Figure VI.13 : Visualisation de la déformée et du potentiel électrique du modèle EF 3D pour le cas d'une poutre de type encastree/libre soumise à différentes valeurs de tensions électriques : (a) -50 volts, (b) 25 volts et (c) 75 volts	113
Figure VI.14 : Déflexion libre d'une poutre piézoélectrique en fonction de la tension électrique	114
Figure VI.15 : Cycle d'hystérésis d'une poutre piézoélectrique commandé en tension électrique	114
Figure VI.16 : Cycle d'hystérésis d'une poutre piézoélectrique commandé en tension électrique	115
Figure VI.17 : Commande à tension constante d'un actionneur piézoélectrique	115
Figure VI.18 : (a) Dimensions en mm de la micro-pince piézoélectrique à serrage parallèle et (b) maillage de la structure de type encastree libre sous Ansys®	116
Figure VI.19 : Modes de déformation de deux doigts piézoélectrique d'une micro-pince adaptable : a) flexion dans le plan x-y ; b) flexion hors plan x-y	116
Figure VI.20 : Six modes de déformation caractéristiques de la micro-pince piézoélectrique : a) extension/contraction, b) extension/extension ou contraction/contraction, c) flexion hors plan x-y avec deux doigts PZT déformés dans le même sens, d) flexion hors plan x-y avec deux doigts PZT déformés dans deux sens opposés, e) flexion dans le plan x-y de deux doigts – même sens et f) flexion dans le plan x-y de deux doigts PZT– sens opposé	118
Figure VI.21 : Isovaleur de déplacement dans une micro-pince piézoélectrique soumise à un champ électrique de 100 Volts : a) flexion hors plan x-y des deux doigts PZT et orientés dans deux sens opposés, b) flexion dans le plan x-y des doigts PZT – même sens d'orientation	119
Figure VI.22 : (a) Dimensions en mm de la micro-pince piézoélectrique à serrage parallèle avec organes terminaux et (b) maillage de la microstructure adaptable de type encastree libre sous Ansys®	120
Figure VI.23 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée globale d'une poutre piézoélectrique en PZT PIC 255 avec organes terminaux en mode de flexion dans le plan x-y	120
Figure VI.24 : Schéma descriptif de la géométrie des éléments de contact de type CONTA174	121
Figure VI.25 : (a) Discrétisation de la micro-pince PZT à serrage parallèle avec la prise en compte des éléments de contacte de type CONTACT174, (b) mode de déformation de la micro-pince piézoélectrique en mode de flexion dans le plan x-y	121
Figure VI.26 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée globale obtenus sous Ansys® d'une poutre piézoélectrique en PZT PIC 255 liée par une liaison parfaite aux organes terminaux	122
Figure VI.27 : Visualisation de la densité du flux électrique (a) suivant l'axe y et (b) densité globale obtenue par modélisation sous Ansys® d'une poutre piézoélectrique en PZT PIC 255	122
Figure VI.28 : Maillage 3D de la micro-pince piézoélectrique à serrage parallèle équipée de deux organes terminaux pour manipuler des micro-objets de forme cube de 400 µm de cote ou de forme cylindre de 400µm de diamètre et de 500 µm de hauteur	123
Figure VI.29 : Visualisation de l'étape de fermeture et serrage à faible pression d'un micro-objet de forme cubique de 400µm de cote sous Ansys®	123
Figure VI.30 : Visualisation du potentiel électrique et du déplacement globale dans la micro-pince pendant le serrage à faible pression d'un micro-cube modélisé sous Ansys®	124
Figure VI.31 : Iso-valeurs de la contrainte σ_{yy} et la déformation ε_{yy} dans la micro-pince piézoélectrique pendant le serrage à faible pression d'un micro-objet de forme cubique	125
Figure VI.32 : Manipulation d'un micro-objet de forme cylindrique avec une micro-pince piézoélectrique réalisée sous Ansys®	126
Figure VI.33 : Iso-valeurs de la déformation ε_{yy} dans la micro-pince piézoélectrique pendant le serrage à faible pression réalisé sous Ansys® sans ou avec les éléments de contacte défini	127

entre l'objet à serrer et les organes terminaux

Figure VI.34 : Serrage à faible pression d'un micro-objet de forme cylindrique suivi d'un déplacement à gauche et à droite obtenu sous Ansys®	127
Figure VI.35 : Amplitude des forces exercées sur les micro-objets	128
Figure VII.1 : Schéma de principe d'une micromanipulation pour éliminer un caillou dans un milieu biologique [LIU 04]	131
Figure VII.2 : Alignement des fibres dans un matériau adaptable	131
Figure VII.3 : Conception d'une structure adaptable	132
Figure VII.4 : maillage de la structure au niveau de l'encastrement	133
Figure VII.5 : Représentation schématique de la loi de comportement des AMF	133
Figure VII.6 Champ de déplacements suivant la direction Z-Z d'une plaque mince adaptable à fibres actives en TiNi initialement à l'état austénitique	134
Figure VII.7 : Champ de déplacements suivant la direction Z-Z d'une plaque mince adaptable à fibres actives en TiNi initialement à l'état martensitique	134
Figure VII.8 : (a) Schéma calorimétrie différentiel, (b) thermogramme du TiNi obtenu en DSC	135
Figure VII.9 : le schéma du dispositif de mise en œuvre du matériau adaptable	136
Figure VII.10 : Système expérimental pour les essais de traction en température	137
Figure VII.11 : Eprouvette de traction en matériau adaptable à fibre active (AMF)	137
Figure VII.12 : Courbes de comparaison contrainte-déformation sur un matériau AMF avec des fibres pré-étirés a : (a) 5%, (b) 10% pour l'essai de traction à températures variable	137
Figure VII.13 : Courbe de comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour l'essai de traction pour un matériau adaptable à fibres actives	138
Figure VII.14 : Manipulation en milieu liquide d'un microcomposant avec une micro-pince à changement de phase	139
Figure VII.15 : Visualisation du déplacement globale dans la micro-pince pendant le serrage d'un micro-cube modélisé sous Ansys® : (a) micro-pince AMF, (b) micro-pince PZT	140
Figure VII.16 : Manipulation d'un micro-objet de forme cylindrique avec une micro-pince active ou une micro-pince PZT réalisée sous Ansys®	140

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Comparaison des performances fondamentales entre les effets thermique Magnétostrictif, piézoélectrique et électrostrictif	28
Tableau II.2 : Domaines d'applications des céramiques piézoélectriques	33
Tableau III.1 : Cosinus de direction	42
Tableau III.2 : Cosinus de direction	44
Tableau III.3 : Notation des indices de matrices	46
Tableau III.4 : Relations constitutives de la piézoélectricité	48
Tableau III.5 : Construction des matrices à partir d'un couple de variables choisis	49
Tableau III.6 : Matrices de coefficient des matériaux céramiques piézoélectriques	49
Tableau III.7 : Grandeurs des équations d'état de la piézoélectricité	52
Tableau III.8 : Caractéristiques des matériaux piézoélectriques massifs les plus rencontrés	54
Tableau III.9 : Principales caractéristiques de divers matériaux électroactifs	59
Tableau IV.1 : Caractéristiques types d'un bimorphe	83
Tableau VI.1 : Propriétés mécaniques et piézoélectriques des doigts à serrage parallèle et les organes terminaux thermoplastiques	106
Tableau VII.1: Propriétés mécaniques d'un matériau AMF pour les deux phases austénitiques et martensitique	133
Tableau VII.2: module d'Young ainsi que les paramètres de rupture (σ_R) et (ϵ_R)	135

Introduction générale

Les premières civilisations se sont construites grâce à des matériaux naturels : le bois, la pierre, le cuir, l'os, la corne, le lin ou le chanvre. Nous avons ensuite connu, mais plus récemment, l'émergence des matières plastiques, puis des composites. La société moderne est envahie d'objets en matières plastiques, dans le bâtiment, l'automobile, l'aéronautique, le sport ou le secteur militaire. Un objet naturel ou en matière plastique dépend des caractéristiques de la matière qui le constitue. Ainsi en est-il d'une chaise en bois ou d'un combiné téléphonique en plastique. Mais progressivement, les chercheurs et les ingénieurs ont eu le besoin d'utiliser des matériaux comportant eux-mêmes leurs propres fonctions. Des matériaux multifonctionnels capables de s'adapter à leur environnement. C'est l'évènement des matériaux intelligents, nés au début des années 80 de travaux menés principalement aux États-Unis dans le domaine de l'aérospatiale et qui concernent aujourd'hui tous les secteurs d'activités.

Depuis l'origine, les matériaux ont été classés en deux grandes catégories : les matériaux de structure qu'on utilise principalement pour leurs propriétés mécaniques (construction de bâtiments, armures...) et les matériaux fonctionnels dont la capacité à conduire le courant électrique par exemple, ou la transparence trouvent de nombreuses applications. Grâce aux matériaux intelligents les fonctions sont inscrites dans la forme et dans la matière. Les matériaux deviennent adaptatifs et évolutifs. C'est une véritable révolution pour le XXI^e siècle. Tout aussi importante que celle de la révolution de la communication ou des biotechnologies, beaucoup plus spectaculaires. Une révolution qui marque aussi le grand retour de la chimie. Discipline souvent mal connue, disposant d'une mauvaise image dans le public en raison des effets toxiques de certains produits ou des pollutions auxquelles elle peut conduire. Les matériaux intelligents célèbrent aussi le rôle grandissant des modèles biologiques dans la conception de produits nouveaux. Copier les systèmes vivants, les micromachines moléculaires ou cellulaires, les membranes actives ou sélectives, permet d'explorer de nombreuses voies d'applications nouvelles dans le domaine médical ou de l'informatique. Les matériaux intelligents s'imposent aujourd'hui dans les secteurs les plus divers, allant du bâtiment aux équipements sportifs en passant par la biomédecine, la robotique ou le secteur militaire.

Ces dernières années ont vu l'émergence de nombreux développements dans le domaine des structures dites *intelligentes*, c'est-à-dire des structures intégrant des capteurs et des actionneurs couplés à un calculateur et capables de réagir aux stimuli extérieurs. Parmi les nombreux types de matériaux que l'on peut trouver dans la nature, les matériaux piézoélectriques présentent des caractéristiques remarquables. Grâce à leur aptitude de conversion électromécanique et à leur faible encombrement, l'utilisation de transducteurs piézoélectriques ouvre la porte à un vaste choix d'applications en dynamique des structures.

Les matériaux adaptatifs ont des optiques, mécaniques et électriques, qui varient sous l'effet d'une contrainte ou d'une variation de l'environnement. Certains matériaux, céramiques ou polymères, dits thermo chromes. Les recherches portent également sur des matériaux qui assureraient, en association éventuellement avec des capteurs ou avec des actionneurs, les fonctions caractéristiques des matériaux issus du monde des espèces vivantes. Prenant modèle sur ces derniers, les matériaux biomimétiques pratiqueraient l'autodiagnostic, l'auto-réparation ou l'auto-destruction quand ils ne remplissent plus leurs fonctions. Ce travail consiste en une analyse théorique et une modélisation numérique des différentes modes de déformation des actionneurs piézoélectriques sous différentes sollicitations. Cette modélisation permettra de mettre en évidence et d'exploiter les propriétés des matériaux piézoélectriques, sous leur forme piézo-laminée. Le

premier chapitre de cette thèse présent une revue bibliographique concernant les matériaux intelligents, les notions générales sur le concept de ces matériaux, ainsi que les principaux matériaux utilisés et leurs domaines d'applications, ainsi qu'une introduction générale aux matériaux piézoélectriques laminés. Le deuxième chapitre est consacré tout d'abord à une définition de la piézoélectricité notamment les deux effets piézoélectriques directs et inverses, à la description des caractéristiques électromécaniques du matériau piézoélectrique et à la présentation Des différents actionneurs piézoélectriques. Notamment ces conditions aux limites, tel que pour un cantilever uniformément et simplement chargé, simplement supporté et un actionneur plan. Ce chapitre offre également un tour d'horizon de leurs nombreux domaines d'applications.

Dans le chapitre trois pour mettre en place les équations de la piézoélectricité. La piézoélectricité étant à un croisement entre différents domaines des sciences, tels que la mécanique, la cristallographie, et l'électromagnétisme. La lecture de ce chapitre permettra de comprendre la physique de l'effet piézoélectrique et l'application de cet effet à la réalisation des actionneurs piézoélectriques. L'enjeu d'une orientation cristalline parfaite apparaîtra clairement au détour de notre cas d'étude portant sur le Zirconate-titanate de plomb. Le quatrième chapitre montre l'identification de la loi de comportement en définissant des différents modèles qui pourront être employés pour la simulation de ces mêmes actionneurs piézoélectrique, Ces modèles sont basés, pour les plus simples, sur une modélisation unidimensionnelle de la piézoélectricité. Nous présenterons notre modèle analytique unidimensionnel, dérivé à partir des équations couplées (S,E). Pour conclure sur l'analyse unidimensionnelle, nous détaillerons les avantages et les inconvénients de chacun de ces modèles. Le cinquième chapitre présente la " Modélisation et simulation numérique d'un micro-actionneur piézoélectriques" offrant un degré de liberté. Nous avons réalisé des simulations numériques de l'essai de traction avec le logiciel Ansys[®] sur des éprouvettes de forme haltère avec différents types des matériaux piézoélectrique de différentes propriétés physique et piézoélectrique Nous poursuivons ce chapitre par une comparaison des performances des matériaux piézoélectriques et choisir le matériau massif le plus intéressant et performant. Le chapitre six présente une caractérisation par modélisation et simulation de la déformée d'un micro-système intelligent de type poutre piézoélectrique à deux doigts de serrage parallèle pour la micromanipulation des micro-objets, quelques hypothèses simplificatrices requis pour la simulation de ces micro-systèmes pour faire étude de l'influence de plusieurs paramètres sur les performances de la micro-pince afin de faire évoluer leurs fonctionnalités, nous avons comparé ce dernier avec des études de références pouvant servir à valider notre modèle numérique. Enfin, nous avons exploité cette étude dans le cadre de la micromanipulation de deux micro-objets de forme cubique ou cylindrique dont la taille maxi mesure 500 μm . à la fin du dernier chapitre , on a modélisé une nouvelle pince hybride que nous avons proposée spécialement pour effectuer des taches de saisie, de maintien, de déplacement et de positionnement en milieu liquide est composée de deux bras en composite adaptable de type époxy/AMF. Pour parvenir à cet objectif, nous avons réalisé des simulations numériques des structures adaptables visant à améliorer les performances des micro-pinces AMF à positionner des micro-objets. La fin de ce mémoire est consacrée à la conclusion générale de notre étude doctorale, avec un résumé sur les principaux résultats ainsi que les perspectives ouvertes, a la fois vers le développement du concept propose, mener pour optimiser les performances des actionneurs et faire évoluer les fonctionnalités de la micropince.

Chapitre I

Matériaux Intelligents : matériaux piézoélectriques laminés

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les matériaux intelligents ainsi qu'une recherche bibliographique de l'ensemble des matériaux intelligents et leurs différents domaines d'applications ainsi qu'une introduction générale aux matériaux piézoélectriques laminés.

I.1 Introduction

La technologie des systèmes mécaniques intelligents s'intègre dans un domaine multidisciplinaire qui regroupe plusieurs sciences telles que la physique, la chimie, la mécanique, l'informatique et l'électronique. De ce fait, le progrès au niveau de l'application des structures intelligentes reste à présent limité malgré l'évolution relativement rapide de la science des matériaux intelligents. L'intérêt de cette technologie se manifeste par le fait qu'elle apporte des réponses optimales à des problèmes extrêmement complexes, comme la détection des comportements imprévus dans le but d'améliorer le cycle de vie. Ainsi, l'amélioration de certains produits mécaniques permet d'exercer un meilleur contrôle, une meilleure maintenance préventive et par conséquent, un meilleur rendement du système.

Les systèmes intelligents ont leurs applications dans différents domaines : transport terrestre et spatial (stabilité vibratoire et acoustique interne des voitures), ailes d'avion (modification de la forme selon la vitesse et la pression d'air pour améliorer la performance et la consommation du carburant [CUL 96]), génie civil (bâtiments qui résistent mieux aux tremblements de terre, ponts avec systèmes intelligents qui détectent et préviennent les déplacements non désirables [AMA 90]), domaine médical (Tensiomètre ; Analyseur de glucose [SRI 96]).

Aujourd'hui il est possible d'aller plus loin avec les matériaux dits « intelligents » : pilotés par de l'électronique, ils peuvent changer continuellement, rapidement et réversiblement certaines de leurs caractéristiques et s'adapter à un nouvel environnement [CAR 00]. Des matériaux aux appellations diverses (adaptables, sensibles, adaptatifs, hybrides, etc.) ont ainsi vu le jour. Lorsque les matériaux deviennent multifonctionnels et qu'ils sont capables de s'adapter à leur environnement, on aboutit aux matériaux « intelligents » dont les fonctions sont inscrites dans la forme et dans la matière. En résumé, le matériau réagit à un stimulus détecté à l'extérieur et adapte sa réponse. Les actionneurs en particulier fournissent une action mécanique ou changent d'aspect (déformation, changement de couleur ou de transparence... etc.) afin d'indiquer une modification de l'environnement et/ou de provoquer une action corrective.

Les matériaux piézoélectriques et les alliages à mémoire de forme, de part leurs propriétés intrinsèques remarquables, sont actuellement les matériaux les plus fréquemment intégrés dans ces structures. Un matériau capable de répondre à son environnement présente un profil très intéressant pour les applications industrielles [BAZ 92], [PAI 95], [KUR 86].

I.2 Principe de fonctionnement d'un système intelligent:

Aucune définition universelle n'est donnée pour les matériaux dits « intelligent ». Ils sont décrits également comme capable de sentir, multifonctionnels ou matériaux adaptatifs. Par exemple il pourrait s'agir des matériaux dont la résistance augmenterait en fonction d'un changement de contrainte lui évitant ainsi de se déformer. Il convient de préciser qu'un matériau n'a d'intérêt que s'il sert à fabriquer des structures. Une certaine confusion entre « matériaux intelligent » et « structures intelligente » existe dans le milieu scientifique. Le terme « Smart Materials » provenant des USA, pays où débutèrent les recherches, a été traduit littéralement par « matériaux intelligents ». Mais en fait, il désigne plus des « structures intelligentes » formées par l'assemblage de trois

composants principaux qui seront insérés dans un corps support. Ainsi les structures et matériaux systèmes possèderaient une forme élémentaire d'intelligence, leur conférant une sorte « d'autonomie de comportement ».

Les systèmes adaptatifs sont des systèmes qui interagissent avec leur environnement. Cette interaction se manifeste par leur capacité à s'adapter de façon appropriée afin d'aboutir à un état maîtrisé de la structure conforme aux objectifs de performance. Un système adaptatif ou intelligent met en œuvre des capteurs, des actionneurs et des microprocesseurs qui analysent les réponses obtenues auprès des différents capteurs et réagissent par différentes commandes logiques de contrôle induisant à l'aide des actionneurs, des déformations localisées visant au maintien fonctionnel de la structure. Les systèmes intelligents utilisent les propriétés fonctionnelles des matériaux avancés. Chaque composante d'un système adaptatif traditionnel présente une fonctionnalité spécifique. Comme l'indique la figure I.1, les quatre composants fondamentaux d'un système intelligent sont les suivants :

- Les capteurs qui sont des dispositifs qui fournissent des mesures représentant un état du système
- Les microprocesseurs qui traitent en temps réel les mesures des capteurs pour commander les actionneurs
- Les actionneurs qui sont les dispositifs d'activation. Commandé par le microprocesseur, ils exercent sur le système une action sous forme de travail mécanique
- La logique qui préside à la chaîne de retour (feedback). Elle est constituée des algorithmes de contrôle, de surveillance et de détection d'endommagements.

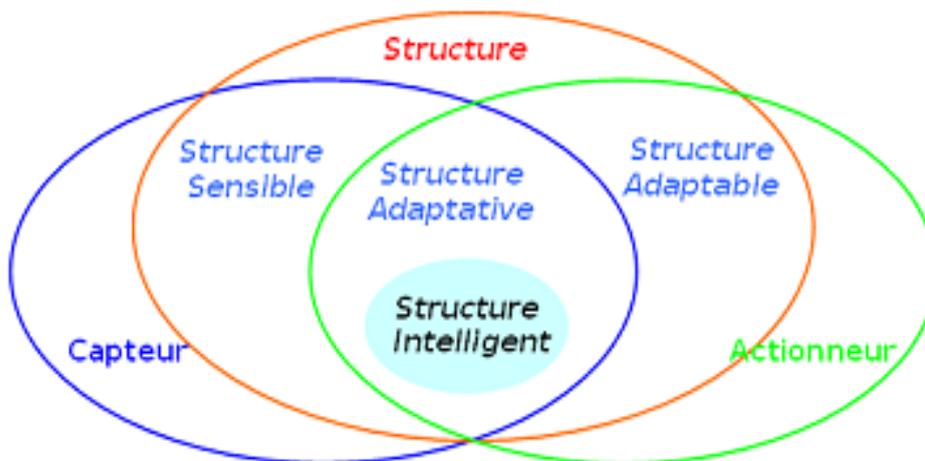


Figure I.1 : Structure intelligent [GOB 91, MEA 93]

Ce travail concerne les capteurs et les actionneurs qui sont intégrés à la structure. Cette configuration permet d'élever considérablement la fiabilité du système.

Remarque :

- Ces matériaux ont besoin d'être activés en temps réel.
- Un autre facteur important de l'ensemble du système est le temps de réponse celui-ci, c'est-à-dire l'intervalle entre l'instant où le capteur perçoit une modification du milieu

environnant et la réponse de l'actionneur. Ainsi un intervalle de temps optimal est un paramètre indispensable à prendre en considération lors de la conception d'une structure hybride adaptative ou intelligent [GAk 00].

Après avoir recensé les fonctions à intégrer dans ces nouveaux matériaux, nous décrivons ces différents éléments qui les composent.

I.3. Description des éléments :

I.3.1 Capteur

Les capteurs sont conçus en fonction de la nature du phénomène à capter - magnétique, thermique, optique, radiation, réaction mécanique ou chimique - ainsi que de la nature des résultats recherchés -thermiques, magnétiques, électriques, optiques ou mécaniques. D'autres caractéristiques entrent aussi en jeu : la taille, la configuration et les propriétés mécaniques de l'interface requise; les conditions environnementales (thermiques, magnétiques ou électriques, ou de corrosion). Finalement, les propriétés opérationnelles des données acquises (sensibilité, largeur de bande, linéarité, longueur étalon, portée). Les fibres optiques sont un excellent exemple de capteurs.

I.3.2 Transmission des données ou des instructions

Par le passé, l'implantation et le fonctionnement de cette unité a retardé de beaucoup l'adoption et l'utilisation des structures intelligentes. L'incorporation des câbles et fils de communication non seulement a provoqué des problèmes de mise en place mais a aussi créé des complications de design et conception. La venue des communications sans fils et la miniaturisation des puces correspondantes a grandement amélioré les avantages des structures intelligentes et augmenté les possibilités de son utilisation.

I.3.3 Unité de commande et de contrôle

L'unité de commande et de contrôle (une puce, un micro ou un ordinateur) gère les opérations de routine et surveille la santé et l'intégrité du système au moyen d'un réseau de communication qui pourrait fonctionner en temps réel. Cette unité contrôle aussi les capteurs, les actionneurs aussi bien que les instruments intégrés d'évaluation non destructive ou surveille les dispositifs opérationnels et les dispositifs de contrôle. C'est le cerveau de la structure intelligente, qui remplit deux fonctions élémentaires distinctes:

a. fonction de traitement:

L'unité reçoit l'information, l'analyse, la trie, l'arrange et la classe; ensuite, elle la stocke et/ou la traite en fonction de la nature, de la fréquence et de la qualité des données et de l'origine de ces dernières. Ces opérations sont effectuées par un dispositif de traitement intelligent, avec ou sans intervention humaine, et avec peu d'interaction humaine, voire aucune. On peut se servir d'algorithmes spéciaux pour contrôler le comportement de la structure ou détecter des dommages. On peut utiliser des algorithmes de reconnaissance des formes et des réseaux de neurones à logique floue pour traiter les données brutes. Enfin, des systèmes experts peuvent récupérer, gérer, classer et stocker les données.

b. fonction d'analyse:

L'unité examine minutieusement les données brutes d'une manière intelligente. À partir de l'analyse décrite précédemment, l'unité exploite les résultats pour évaluer l'état de la structure. Cette analyse consiste à trouver et à identifier des variables, des caractéristiques ou des items précis par rapport aux seuils fixés à l'avance ou à des codes, des règles, des normes ou des règlements particuliers. Si l'unité découvre un problème et tire les conclusions pertinentes, elle envoie des instructions aux actionneurs qui réagissent en conséquence. Il y a des algorithmes spéciaux pour activer ces fonctions.

I.3.4 Actionneurs

Ainsi que les capteurs, les actionneurs sont fabriqués en fonction de la nature de l'action voulue (optique, magnétique, thermique, mécanique ou chimique) et en fonction de l'énergie disponible utilisée quelle soit thermique, magnétique, électrique ou chimique. Là aussi, il faut tenir compte des facteurs environnementaux tels que la corrosion, l'effet thermique, les phénomènes magnétiques ou électriques, ainsi que de la géométrie et des propriétés mécaniques de l'interface. Enfin, il faut tenir compte des propriétés des actionneurs (déplacement, génération de forces, hystérésis, temps de réponse, largeur de bande, etc.).

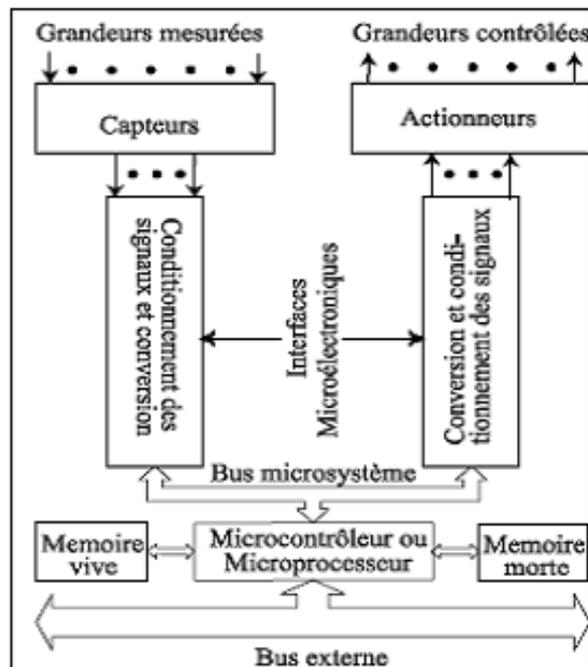


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une structure adaptative

En réalité, la structure adaptative consiste plutôt à associer ou à combiner deux matériaux ayant pour dessein pour s'annihiler mutuellement tandis que la structure intelligente serait plutôt un mélange de deux ou plusieurs matériaux dès sa conception. Son intelligence résiderait dans le fait qu'elle ferait un auto-diagnostic, un auto-apprentissage, une prédiction. Elle aurait également des capacités de réserve, une réactibilité aux stimuli, une capacité à reconnaître, à les discriminer. Cette intelligence se trouvera précisément au niveau de la mémoire : fonction qui sera réalisé par l'analyseur (cf.fig.I.2).

Cependant, il faut noter que l'appellation d'une structure comme intelligente est mal définie. Il semblerait que se soit plus un choix propre au scientifique plutôt qu'une dénomination qui découlerait des propriétés intrinsèques de la structure.

I.4 Matériaux utilisés dans les systèmes intelligents

I.4.1 Caractéristiques principales

Le développement des systèmes intelligents va de pair avec le développement des matériaux.

Partant de l'étude des matériaux inertes, la science des matériaux a permis d'élaborer d'abord des matériaux aux propriétés mécaniques spécifiques puis des matériaux intelligents qui ont des capacités d'observation, de distinction et de réponse plus précises. Pour obtenir le statut d'intelligent, les matériaux doivent avoir idéalement des propriétés bien précises et obéir à des critères bien précis leur permettant d'aboutir à un objectif particulier. Ces caractéristiques ont évolué dans le temps jusqu'à aboutir pour certains auteurs [AKH 99]) à respecter des :

- Propriétés techniques (caractéristiques physiques et mécaniques) et technologiques (fabrication).
- Coûts des matériaux et de production.
- Critères environnementaux (pollution, etc....).
- Capacités de réutilisation et de recyclage.

Les matériaux intelligents à fonction mécanique peuvent être groupés selon leur principe de fonctionnement, c'est-à-dire leur sensibilité particulière à une propriété physique de leur environnement ou leur action particulière sur cette propriété :

- Le champ électrique : les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs, les fluides électrorhéologiques.
- Le champ magnétique : les matériaux magnétostrictifs, les fluides magnétorhéologiques.
- La température : les alliages à mémoire de forme.
- La lumière : les fibres optiques.

Les matériaux les plus importants sont décrits brièvement dans les paragraphes suivants.

I.5 Matériaux principaux

I.5.1 Les Alliages à mémoire de forme

Les alliages à Mémoire de Forme (AMF) ou « Shape Memory Alloy » font partie de cette nouvelle classe de matériaux. Ils présentent un comportement tout à fait différent des matériaux usuels. Ce sont des alliages métalliques qui possèdent une propriété remarquable de pouvoir récupérer leur forme initiale par simple chauffage après avoir été déformés plastiquement (cf.fig.I.3).

Plusieurs applications ont vu le jour au cours des dernières décennies dans plusieurs domaines tels que, le domaine biomédical [AIM 01, LEP 00], l'aérospatiale [MIR 05, TIN 05], la robotique et bien d'autres. Dans tous ces domaines d'application, les AMF sont utilisés pour leur propriété de mémoire de forme, de super-élastique, d'effet amortissant. Malgré le fait qu'ils soient de plus en plus connus et utilisés, ils demeurent coûteux comparativement aux autres matériaux plus communs. Par contre, dans certaines situations, ils peuvent devenir économiquement rentables puisqu'il est

possible de remplacer des dispositifs très complexes par un simple dispositif d'AMF. L'analyse des besoins est donc une étape très importante.

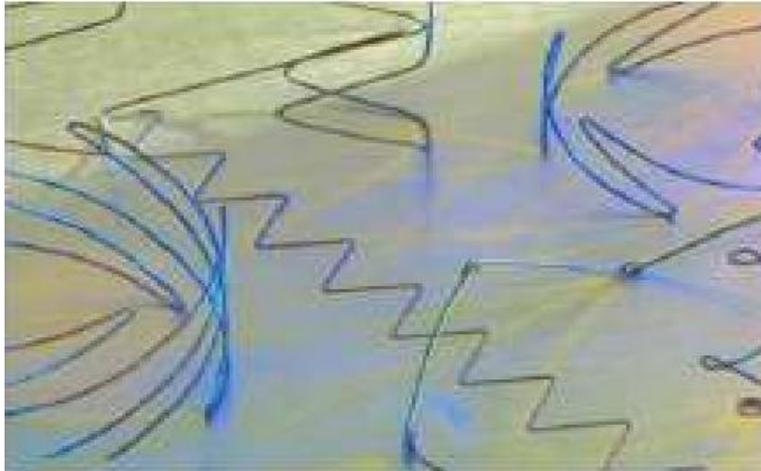


Figure I.3 : Schéma représentatif de l'effet mémoire de forme [HOM 91]

Les AMF doivent leurs caractéristiques à la présence de deux phases à l'état solide. Comme pour l'acier, la phase basse température est appelée martensite tandis que la phase haute température, dite phase mère, est appelé austénite. Le changement de phase dans les aciers et les alliages à mémoire de forme est similaire [PAT 94].

I.5.1.1 Domaines d'applications

L'industrie aérospatiale doit minimiser le volume et le poids de toutes leurs composantes afin de minimiser les coûts de lancement. Puisque les AMF offrent un rapport force / densité et énergie / poids excellent, ils sont des outils par excellence. Prenant comme exemple le télescope Hubble. Ce télescope, lancé en avril 1990 (cf.fig.I.4), possédait des actionneurs en AMF (reprise de forme) pour le déploiement des panneaux solaires nécessaires à l'alimentation électrique des composantes électroniques.



Figure I.4 : Télescope Hubble lancé en avril 1990 [AST 08]

Tout comme l'industrie aérospatiale, utilise également la reprise de forme des AMF afin de créer des actionneurs les plus compacts possible. Par contre, on utilise aussi les AMF pour leur effet amortissant et leur effet superélastique. En robotique, l'utilisation de micro actionneurs est courante. Par exemple, la main artificielle utilisant les AMF (cf.fig.I.5).

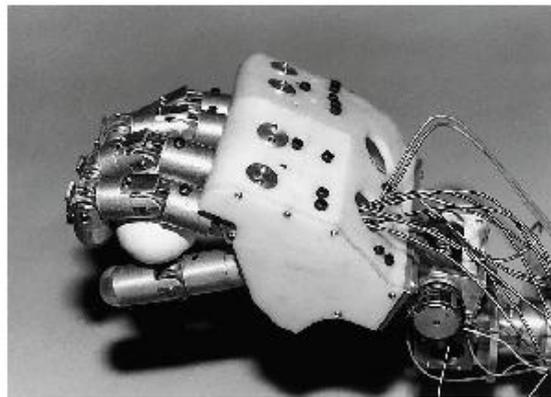


Figure I.5 : Micro actuateur pour la robotique [BOI 06]

Par exemple, les stents sont des dispositifs qui permettent une chirurgie minimalement invasive afin de contrer les problèmes cardiaques liés à l'obstruction partielle des artères. En effet, ce dispositif, une fois contracté. Par la suite, lors du relâchement, l'effet superélastique contraint l'artère à retrouver le diamètre original et permet ainsi le passage du sang (cf.fig.I.6).

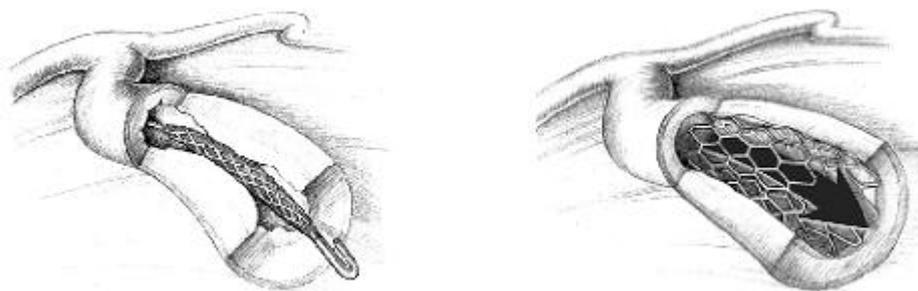


Figure I.6 : Stent cardiovasculaire comprimé et Stent cardiovasculaire relâché [WAN 09]

I.5.2 Les matériaux magnétostrictifs

Les matériaux magnétostrictifs peuvent se déformer sous l'action d'un champ magnétique [AUG 00, SHI 00]. La déformation est proportionnelle au carré de la puissance du champ appliqué. Ces matériaux vont être capables de s'adapter automatiquement à l'environnement en prenant des formes utiles en réaction à des sollicitations extérieures d'ordre acoustique, vibratoire, mécanique ou thermique. L'effet magnétostrictif est, en général, moins important que l'effet piézoélectrique. Le mécanisme de magnétostriction peut être séparé en deux séquences. Le premier processus est dominé par la migration des parois des domaines dans le matériau en réponse à un champ magnétique extérieur. Le second est la rotation des domaines. Les deux mécanismes permettent de changer l'orientation des domaines qui en tournant causent le changement dimensionnel. La forme usuelle du Terfenol-D est un cylindre massif qui, pour des raisons de fabrication, possède un diamètre maximal de 70 mm environ. Ce type de géométrie est utilisée quand l'action mécanique impose une grande force. Citons enfin, les matériaux magnétostrictifs en films minces qui sont déposés sur un substrat, typiquement du silicium, et qui ont pour applications premières des capteurs de champ magnétique et des systèmes de micro-actionneurs comme des micro-pompes.

I.5.2 .1 Domaines d'applications

Suivant le type d'effet considéré, effet magnétostrictif direct ou inverse, la magnétostriction peut être exploitée pour construire des actionneurs ou des capteurs électromécaniques convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les principaux usages de la magnétostriction concernent :

- * l'émission de sons à basse fréquence en milieu sous-marin (sonar).
- * la génération d'ultrasons en applications médicales ou industrielles.
- * la réalisation de moteurs linéaires utilisés par exemple sur machine-outil.
- * la mesure de force physique ou de couple mécanique.
- * le contrôle actif du bruit et des vibrations, en utilisant simultanément l'effet inverse pour la mesure des vibrations, et l'effet direct pour effectuer l'action correctrice.

Un transducteur magnétostrictif est typiquement constitué d'un solénoïde traversé par un courant électrique d'excitation servant à générer un champ magnétique variable, à l'intérieur duquel se trouve placé un barreau en matériau ferromagnétique, le tout étant enfermé dans un cylindre assurant la fermeture du circuit magnétique. Afin d'assurer des déplacements bidirectionnels, une magnétisation statique du matériau est obtenue soit au moyen d'un aimant permanent, soit en faisant circuler dans le solénoïde un courant continu qui vient se superposer au courant d'excitation variable. D'autre part, une précontrainte mécanique est généralement appliquée au barreau ferromagnétique au moyen d'un boulon, ceci afin de faire travailler le transducteur en compression et ainsi toujours garantir la transmission des efforts mécaniques à l'interface du transducteur et de la charge appliquée (cf.fig.I.7). Les matériaux ferromagnétiques employés peuvent être le fer, le nickel, ou des alliages métalliques (aluminium-fer) (alfenol) ou nickel-cobalt, bien que le matériau le plus couramment utilisé soit le terfenol-D, du fait de ses bonnes performances magnétostrictives.

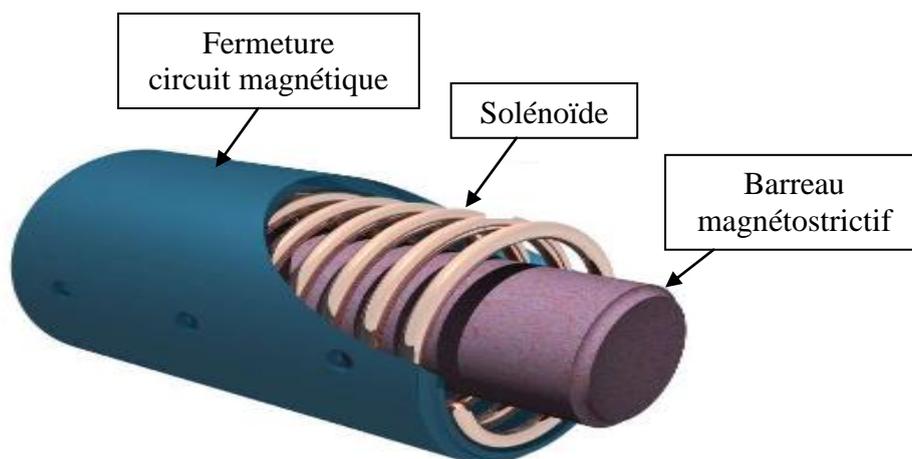


Figure I.7 : Un transducteur magnétostrictif

Le système magnétique de mesure de distance LMMAG est optimisé pour la mesure de distance des mouvements linéaires et tout particulièrement sur les axes de moteurs linéaires. Le système de mesure est constitué d'une règle de mesure magnétique montée sur une courroie de transfert en acier et d'une unité de balayage ultraplate. Le robuste boîtier avec un excellent blindage

électrique et la sortie des signaux en temps réel font du LMMAG le système de mesure de distance privilégié pour les applications exigeantes (cf.fig.I.8).



Figure I.8: Système de mesure magnétique linéaire

I.5.3 Les fibres optiques

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique a été développé au cours des années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporated). Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques (cf.fig.I.9). Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.), dans l'imagerie et dans l'éclairage.

Un nouveau type de fibres optiques, fibres à cristaux photoniques, a également été mis au point ces dernières années, permettant des gains significatifs de performances dans le domaine du traitement optique de l'information par des techniques non linéaires, dans l'amplification optique ou bien encore dans la génération de super continus utilisables par exemple dans le diagnostic médical. Dans les réseaux informatiques du type Ethernet, pour la relier à d'autres équipements, on peut utiliser un émetteur-récepteur.

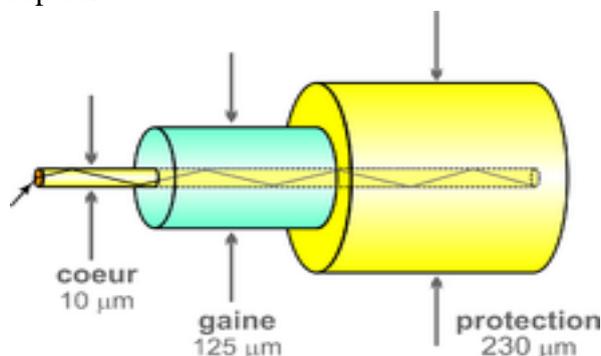


Figure I.9: Principe d'une fibre optique

I.5.3.1 Domaines d'applications

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'information, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. C'est probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est le plus important et a le plus d'avenir. Un fil de cuivre ne peut supporter que quelques communications, contre 300000 pour la fibre optique. Les fibres sont alors utilisées en particulier pour les réseaux à haut débit. Leurs capacités de transmission atteignent des débits de l'ordre du gigabit par seconde (câbles transatlantiques) avec une atténuation très faible et grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s[BER 90](cf.fig.I.10).



**Figure I.10: Une seule paire de fibres optiques transporte un débit.
10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre**

La première utilisation d'envergure de la fibre optique fut en médecine, domaine où elle est toujours grandement utilisée aujourd'hui. La fibre optique est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies. Pour le diagnostic, un câble de fibres optiques transporte de la lumière à l'intérieur du corps. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibres optiques qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo. Il est donc possible d'avoir un aperçu de grande qualité de ce qui se passe dans le corps, et ce, en temps réel. Un exemple de cette utilisation est l'endoscope, particulièrement utilisé en gastro-entérologie(cf.fig.I.11).



Figure I.11: Un endoscope

Pour un traitement, la fibre optique sert à transporter la lumière intense d'un laser à l'intérieur du corps humain où elle interagira par effet thermique avec les tissus : en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de : pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine.

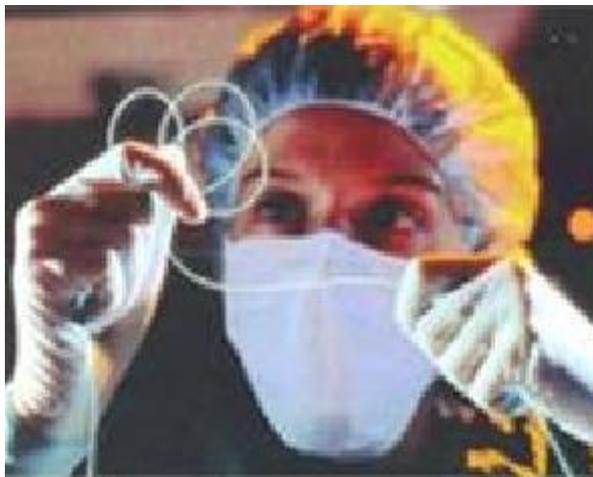


Figure I.12: Chirurgie

I.5.4 Les matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont notamment utilisés comme transducteurs électromécaniques tels que les sondes échographiques, les senseurs et actuateurs, les micro-positionneurs, ... Plus récemment, les matériaux piézoélectriques ont également été appliqués aux concepts des structures actives et adaptatives; les piézo-laminés étant parfaitement adaptés au rôle de senseurs de déplacement et de générateurs de force pour le contrôle des phénomènes vibroacoustiques.

I.5.4.2 Les principaux matériaux piézoélectriques

Ces fameux matériaux présentent un comportement tout à fait différent des matériaux usuels. Ce sont des matériaux qui possèdent une propriété remarquable de pouvoir se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique.

I.5.4.2.1 Les oxydes ferroélectriques

Les matériaux ferroélectriques occupent une large place dans la palette des oxydes piézoélectriques. Ils ont pour formule générale ABO_3 . On les représente par un empilement d'octaèdres liés par leurs sommets. Les anions oxygène forment les sommets des octaèdres tandis que les cations B et A occupent respectivement leur centre et les sites entre les octaèdres. De nombreux ferroélectriques modèles appartiennent à cette famille : le titanate de plomb $PbTiO_3$, le titanate de baryum $BaTiO_3$, le niobate de potassium $KNbO_3$ (cf.fig.I.13).

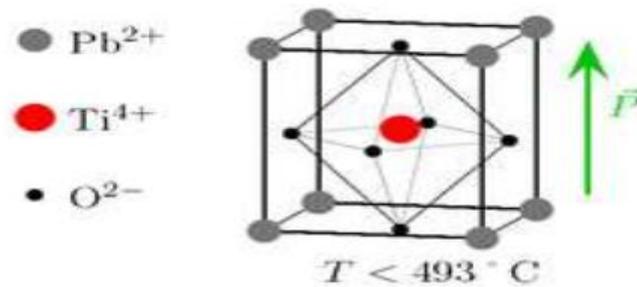


Figure I.13 : Maille cristalline d'un cristal de structure pérovskite : PbTiO₃

I.5.4.2.2 Le quartz et les composés analogues

Le quartz (SiO₂) est un matériau piézoélectrique important de par son rôle dans l'histoire de la piézoélectricité ainsi que par ses applications. On peut lui associer différents phosphates et arsénates : (GaPO₄, GaAsO₄, AlPO₄ etc.). Leur effet piézoélectrique est lié aux déformations de tétraèdres MO qui composent leur structure. Contrairement à la famille précédente, ces composés ne sont pas ferroélectriques. Ils ont en général des coefficients piézoélectriques et des couplages électromécaniques plus faibles que les oxydes ferroélectriques. Mais ils ont d'autres avantages. Le quartz notamment présente une combinaison unique de propriétés remarquables :

- Il est piézoélectrique.
- On peut trouver des orientations cristallographiques qui minimisent la dilatation thermique.
- Il a de très faibles pertes mécaniques, ou en d'autres termes un excellent facteur de qualité mécanique.
- Il est très stable (en température, pression etc.). Il a également une très faible solubilité dans la plupart des solvants dans des conditions ordinaires, à l'exception des solvants fluorés.
- Il est facile à usiner. Le quartz est dur, mais peu cassant.
- Il est facilement intégrable dans des dispositifs de micro- ou nanoélectronique.
- Il est naturellement abondant, et peut être fabriqué à un coût modeste avec une très bonne qualité. Parmi les monocristaux de synthèse, le quartz arrive second en quantité produite (3000 tonnes par an en 2000), derrière le silicium.

I.5.4.2.3 Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs de structure zinc-blende et de structure wurtzite sont également piézoélectriques. Parmi les matériaux modèles, on peut citer :

- Le nitrure d'aluminium (AlN)
- L'oxyde de zinc (ZnO)

L'effet piézoélectrique dans ces structures reste assez peu exploité en pratique, mais il joue un rôle important dans la compréhension des diverses propriétés de ces matériaux, particulièrement dans les nanostructures.

I.5.4.2.4 Les polymères

L'étude des effets piézoélectriques dans des polymères naturels d'origine biologique (cellulose, collagène etc.) remonte aux années 1950. La mise en évidence de l'effet piézoélectrique dans un polymère de synthèse, le polyvinylidène difluorure (PVDF) $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2)_n$ polarisé, a été publiée en 1969 et a suscité un engouement pour ce thème de recherche. Dans l'industrie, ce sont essentiellement le PVDF et ses dérivés qui sont couramment utilisés. Les propriétés piézoélectriques de ces polymères dépendent étroitement de leur conformation. Pour stabiliser le polymère sous une forme désirée, il est nécessaire de le soumettre à un procédé de polarisation, comme dans les céramiques.

I.5.4.2.5 Les sels

Les sels piézoélectriques les plus significatifs sont le sel de Rochelle et les composés de la famille du Phosphate de potassium KH_2PO_4 . Ils sont ferroélectriques, mais avec des propriétés et des mécanismes très différents des oxydes décrits précédemment.

I.5.4.2.6 Les laminés piézoélectriques

Ce type des matériaux piézoélectriques est également intéressant dans le cadre du contrôle actif des vibrations. En effet, en plus d'être léger et peu coûteux, l'avantage d'un transducteur piézoélectrique est qu'il peut être utilisé soit en mode senseur, soit en mode actuateur. Les piézo-laminés présentent donc toutes les qualités requises pour une utilisation dans le cadre du contrôle actif des vibrations.

I.5.4.3 Mise en forme et procédés

Indépendamment de sa composition chimique, un matériau piézoélectrique peut être étudié et utilisé sous différentes formes.

I.5.4.3.1 Céramiques

Une céramique est composée de grains soudés entre eux par frittage. Les grains sont orientés statistiquement dans toutes les directions ; leur taille peut être contrôlée par les conditions de fabrication. C'est la forme la plus utilisée, principalement en raison de leur facilité de fabrication et des nombreuses propriétés qu'on peut obtenir en faisant varier la composition chimique, les paramètres de la fabrication, etc. Si l'on parvient à donner aux grains de la céramique une orientation préférentielle, on obtient alors une *céramique texturée* dont les propriétés sont en général intermédiaires entre celles d'une céramique et celles d'un monocristal de même composition. Parmi les céramiques piézoélectriques, on distingue les céramiques dites « dures » et « douces ». Ces deux types de céramiques se distinguent par différentes caractéristiques (champ coercitif, constante diélectrique, coefficient de couplage électromécanique plus ou moins fort etc.).

I.5.4.3.2 Monocristaux

Un monocristal est un arrangement régulier et périodique d'atomes. C'est sous cette forme que se présentent les matériaux piézoélectriques naturels comme le quartz ou la tourmaline, et c'est également sous cette forme qu'ils ont été utilisés dans les applications de première génération avant la mise au point des céramiques. Les cristaux ferroélectriques peuvent posséder une structure en domaines. On distinguera alors les monocristaux *monodomains* et *polydomains* selon qu'une ou

plusieurs directions de polarisation coexistent dans le cristal. Dans une description cristallographique, les cristaux polydomaines ne sont pas rigoureusement des monocristaux mais des cristaux maclés ; l'usage est cependant de continuer à parler de monocristal. Les coefficients piézoélectriques les plus élevés connus à ce jour sont obtenus pour des monocristaux polydomaines. Dans la pratique, ils présentent des inconvénients qui limitent leur utilisation dans beaucoup de dispositifs : coût, disponibilité, etc. L'optimisation des propriétés d'un monocristal piézoélectrique peut se faire en jouant sur :

- la composition chimique
- l'orientation cristallographique
- la structure en domaines ferroélectriques

I.5.4.3.3 Composites

Dans un composite, le matériau piézoélectrique est divisé et plongé dans une matrice non piézoélectrique (une résine). Les composites ont montré leur intérêt par rapport aux céramiques conventionnelles dans le domaine des transducteurs acoustiques hautes fréquences pour l'imagerie : Leur meilleur coefficient de couplage électromécanique et leur impédance acoustique plus adaptée permettent d'améliorer la résolution des images.

I.5.4.3.4 Couches minces

La piézoélectricité est une propriété à la base des microsystèmes électromécaniques (MEMS) comme les micromoteurs, les microvalves, les accéléromètres ou les membranes. Les avantages des couches minces piézoélectriques sont notamment leur faible puissance de fonctionnement, l'importance des forces produites et les larges gammes de fréquences d'utilisation. Les couches sont en général fabriquées par un procédé sol-gel et ont une épaisseur comprise typiquement entre 0,5 et 5 microns. Le matériau le plus utilisé est là aussi le PZT.

1.5.4.4 Domaines d'applications

Il existe des systèmes piézoélectriques pour transformer les ondes sonores en électricité, mais l'inverse est vrai aussi. Ainsi, la société Coréenne fils utilise la piézoélectricité pour produire des enceintes en film piézoélectrique transparent très fin, Grâce à ce haut-parleur en film piézoélectrique transparent et flexible [KAN 96], il est possible de transformer bon nombre d'objets en enceintes. Ainsi, les écrans de Smartphone, les miroirs ou bien les murs pourront devenir de véritables haut-parleurs (cf.fig.I.14).



Figure I.14 : Haut parleur de film piézoélectrique transparent

Par opposition aux matériaux et structures adaptatifs, nous qualifierons de « sensible » les matériaux ou les structures simplement capables d'estimer leur état de santé, c'est-à-dire d'assurer le suivi de leur éventuel endommagement, qu'il soit localisé ou réparti de façon homogène. Dans la plupart de ces matériaux, les techniques d'évaluation de l'évolution des propriétés structurales se basent sur l'intégration de capteurs à l'intérieur ou en surface du matériau susceptible de se dégrader.

Le développement de telles technologies est d'ores et déjà mis en oeuvre dans des secteurs comme l'industrie aéronautique et aérospatiale et plus récemment en génie civil [AYR 98] et le sport de haute compétition [SHE 01]. Un exemple de structure sensible utilisant des éléments piézoélectriques est bien illustré. Durant ces dernières années, la maîtrise de la technologie des matériaux piézoélectriques a permis d'élaborer des composants mécaniques de très petite taille qui sont capables soit de mesurer des déformations microscopiques sur les surfaces des matériaux qui les portent, soit d'exercer des forces ou des contraintes importantes et contrôlables sur ces surfaces (cf.fig.I.16).

I.5.4.5 Avantages éventuels

Les avantages éventuels des matériaux, des structures et des systèmes intelligents sont surprenants. Cette technologie promet des réponses optimales à des problèmes extrêmement complexes. Par exemple, détecter les problèmes dès le début ou adapter la réponse de manière à réagir à des conditions imprévues permettrait d'augmenter la surviabilité du système et d'en améliorer le cycle de vie. En outre, si on améliorait de nombreux produits, on pourrait exercer un meilleur contrôle en minimisant la distorsion et en augmentant la précision. Une meilleure maintenance préventive des systèmes, et par conséquent un meilleur rendement, sont d'autres avantages possibles. Par sa nature, la technologie des structures et des matériaux intelligents est un domaine hautement interdisciplinaire; elle regroupe les sciences fondamentales (la physique, la chimie, la mécanique, l'informatique et l'électronique) ainsi que les sciences appliquées et le génie (aéronautique et mécanique, entre autres). Cet état de choses explique peut-être la lenteur des progrès dans l'application des structures intelligentes aux systèmes scientifiques, même si la science des matériaux intelligents évolue très rapidement.

I.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, une revue bibliographique concernant les matériaux intelligents, les notions générales sur le concept de ces matériaux, ainsi que les principaux matériaux utilisés et leurs domaines d'applications. Les différents matériaux ont pu être classés selon le type d'énergie utilisée pour contrôler leur transformation, introduisant ainsi quatre principales classes de matériaux. Les alliages à mémoire de forme peuvent servir aussi bien de capteur que d'actionneur, les matériaux magnétostrictifs, dont les plus performants sont les alliages de type Terfenol-D, génèrent des déformations sous l'application d'un champ magnétique, la fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière, elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Nous avons vu que l'avenir des matériaux intelligents passe en partie par l'étude approfondie de nouveaux matériaux piézoélectriques en couches minces et que leur intégration sur dans la vie quotidienne constitue un véritable enjeu. Dans ce domaine, l'oxyde de zinc et le zirconate titanate de plomb (PZT) se distinguent particulièrement. En raison de ses propriétés exceptionnelles. Nous avons abordé de manière simplifiée quelques aspects de la

piézoélectricité mais également les particularités piézoélectriques du PZT. Quelques exemples ont permis de monter l'intérêt des couches piézoélectriques dans les microsystèmes électroniques. On a présenté les principaux matériaux piézoélectriques en grandes familles selon leur composition chimique, leur structure cristallographique ou leur intérêt scientifique ou industriel.

Chapitre II

Les actionnaires piézoélectriques

Ce chapitre est consacré à la description des caractéristiques électromécaniques du matériau piézoélectrique, définition de la piézoélectricité notamment les deux effets piézoélectriques directs et inverses. Pour bien persuader les sceptiques de l'intérêt réel des actionnaires piézoélectriques, ce chapitre offre également un tour d'horizon de leurs nombreux domaines d'applications.

II.1 Introduction

La nécessité de développer de nouveaux matériaux susceptibles de remplir des fonctions de plus en plus complexes est le souci actuel. La réflexion sur les matériaux nouveaux va vers l'évolution des matériaux dotés d'une propriété supplémentaire qui est la possibilité d'ajuster en temps réel le comportement aux sollicitations extérieures. Ce sont les matériaux intelligents ou adaptatifs. Ces matériaux nouveaux ont des fonctions et des capacités spéciales par rapport aux matériaux traditionnels. Les matériaux piézoélectriques ou «Zircono-Titanate de Plomb» (PZT) font partie de cette nouvelle classe de matériaux (cf.fig.II.1). Plusieurs applications ont vu le jour au cours des dernières décennies dans plusieurs domaines tels que, le domaine biomédical [AIM 01, LEP 00], l'aérospatiale [MIR 05, TIN 05], la robotique et bien d'autres. Dans tous ces domaines d'application, les matériaux piézoélectriques sont utilisés pour leur propriété électromécanique. Malgré le fait qu'ils soient de plus en plus connus et utilisés, ils demeurent coûteux comparativement aux autres matériaux plus communs. Par contre, dans certaines situations, ils peuvent devenir économiquement rentables puisqu'il est possible de remplacer des dispositifs très complexes par un simple dispositif PZT. L'analyse des besoins est donc une étape très importante. Ce chapitre a comme objectif de donner les concepts de base afin de bien comprendre tous les enjeux liés aux actionnaires piézoélectriques.

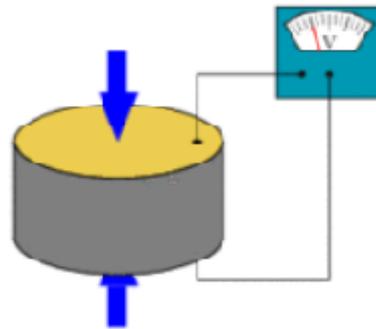


Figure II.1 : Illustration du comportement d'une pastille piézoélectrique : la contrainte appliquée crée un signal électrique

II.2 Découverte de l'effet piézoélectrique

La première démonstration de l'effet piézoélectrique direct est due à Pierre et Jacques Curie en 1880. À cette époque, les deux frères, âgés respectivement de 21 et 25 ans, sont tous deux préparateurs à la faculté des sciences de Paris. Combinant leurs connaissances de la pyroélectricité et de la structure cristalline, ils prédirent et vérifièrent l'existence de la piézoélectricité sur des cristaux de quartz, de tourmaline, de topaze, de sucre et de sel de Rochelle.

L'existence de l'effet inverse fut prédite l'année suivante par Gabriel Lippman sur la base de calculs thermodynamiques, et immédiatement vérifiée par les Curie. C'est également en 1881 qu'Hermann Hankel suggéra l'utilisation du terme piézoélectricité du grec piézein signifiant presser, appuyer. Le phénomène de piézoélectricité s'observe naturellement dans des cristaux de quartz. En l'absence de déformation, le cristal reste électriquement neutre. Sous l'effet d'une action mécanique, un dipôle électrique apparaît dans chaque maille du matériau par déplacement des barycentres des charges positives et négatives. L'application d'une action mécanique sur une des faces d'un échantillon piézoélectrique fait rompre son équilibre électrostatique naturel et

provoque l'apparition d'un champ électrique a ses bornes. La somme des champs électriques élémentaires donne alors naissance a un champ électrique macroscopique.

Les matériaux piézoélectriques sont capables de générer des charges électriques sur certaines faces de l'échantillon sous l'effet d'une contrainte mécanique extérieure (quelles que soient les contraintes internes propres au matériau existant avant la présence de l'effort extérieur). Cet effet est appelé effet piézoélectrique direct et est utilise dans la fabrication de capteurs de force, de pression, d'accélération et autres. Inversement, quand une tension électrique est appliquée aux bornes de deux faces opposées, le champ électrique produit provoque l'apparition d'une contrainte mécanique (qui se traduit par une variation de forme si l'échantillon est libre ou d'une force si l'échantillon est encastre). Cette propriété est appelée effet piézoélectrique inverse. Cet effet est utilise pour les oscillateurs a quartz hautes fréquences ou pour fabriquer des actionneurs comme des sonars ou des résonateurs.

La piézoélectricité peut aussi être induite dans certains matériaux ferroélectriques. Les cristaux ferroélectriques possèdent un moment dipolaire électrique même en l'absence d'un champ électrique extérieur. La dissymétrie naturelle des barycentres électriques de la maille cristalline provoque une polarisation locale du matériau. Naturellement, le matériau s'organise en domaines polarisés mais aléatoirement distribués, de sorte que, la polarisation globale ou macroscopique soit nulle (cf.fig.II.2).

En présence d'un champ électrique extérieur, chaque domaine tend à s'aligner dans la direction du champ et déforme la structure cristalline. La somme des petites déformations provoque une déformation macroscopique, c'est l'effet inverse. Pour augmenter les performances, ces matériaux sont prémolaires de façon à privilégier un axe de dissymétrie en l'absence de champ électrique extérieur.

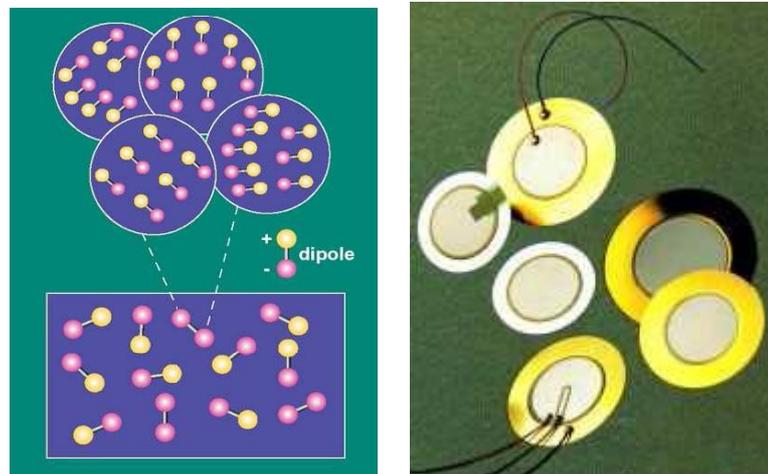


Figure II.2 : Structure cristalline d'un cristal ferroélectrique

II.2.1 l'effet piézoélectrique direct et inverse

Certains matériaux ont la propriété de se polariser sous l'influence d'une contrainte mécanique c'est l'effet piézoélectrique direct (cf.fig.II.3a). Cette polarisation P est proportionnelle à la contrainte F et change de signe avec elle. Ce phénomène est réversible :

- Une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînera.
- Une déformation du même matériau. On parle alors d'effet piézo-électrique inverse (cf.fig.II.3b).

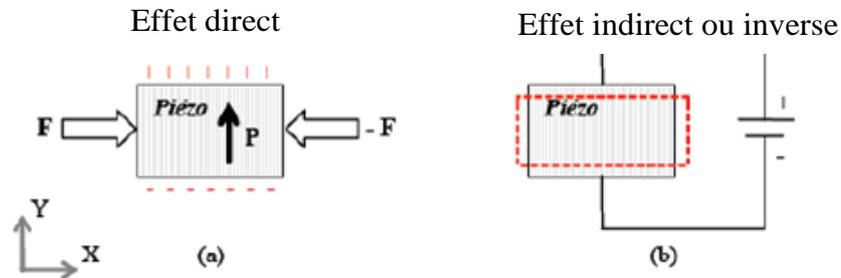


Figure II.3 : Représentation de l'effet direct et inverse de la piézoélectricité

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

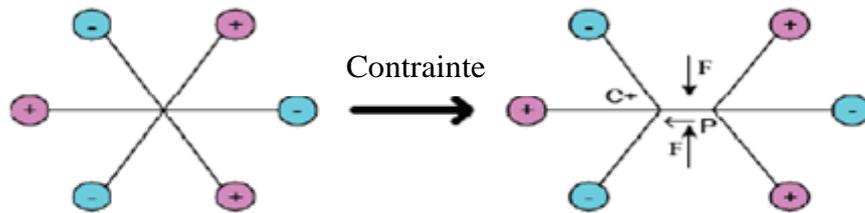


Figure II.4 : Représentation schématique de la polarisation à l'échelle cristalline

En réalité, les grandeurs mécaniques, électriques et thermiques sont thermodynamiquement couplées. Cependant, l'augmentation de la température tend à détruire l'alignement des dipôles élémentaires avec l'axe de la polarisation. A la température connue sous le nom de la température de Curie, il n'existe plus de moment diélectrique macroscopique. Cependant, quelques matériaux piézoélectriques ne présentent pas ce phénomène.

II.2.2 Origine cristallographique de la piézoélectricité

Parmi les 32 réseaux de Bravais, certains cristaux possèdent un couplage entre propriétés électriques et mécaniques au niveau de la maille cristalline. La propriété piézoélectrique d'un matériau est liée à sa structure cristalline. En effet on observe cette caractéristique que dans certains solides non-conducteurs possédant une anisotropie cristalline caractéristique. Dans ces matériaux, on définit l'axe de polarisation comme l'axe privilégié d'apparition des charges électriques dans la structure. Le diagramme ci-dessous précise la place qu'occupent les matériaux piézoélectriques dans la hiérarchie des solides cristallins.

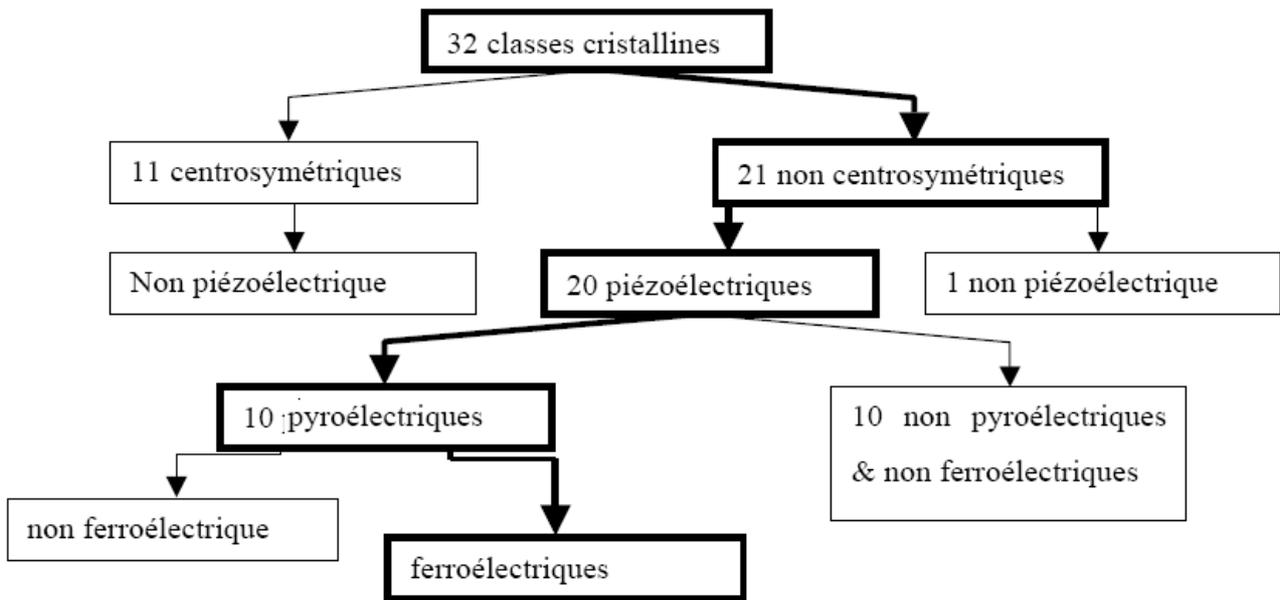


Figure II.5 : Organigramme des classes cristallines

L'effet piézoélectrique au sein d'un matériau, celui-ci doit appartenir à des classes de symétrie cristalline ne présentant pas de centre de symétrie. Parmi les 32 classes cristallines, 21 n'en possèdent pas. Cependant bien que la classe de symétrie n'ait pas de centre de symétrie, il est montré qu'elle n'est pas piézoélectrique, ce qui limite à 20 le nombre de classes qui sont susceptibles d'être piézoélectriques. Dans ces 20 classes, 10 seront pyroélectriques (polarisation induite par l'absorption d'énergie thermique dans certains cristaux) et parmi ces 10 classes certaines seront ferroélectriques et d'autres non.

Les céramiques polycristallines ferroélectriques sont composées de grains et de joints de grains. Un grain est composé de domaines séparés les uns des autres par des parois. Chaque domaine peut avoir son axe de polarisation différemment orienté par rapport au domaine adjacent, donc, comme la répartition des domaines est aléatoire, le matériau est globalement non polaire. La structure cristalline fait que l'angle entre la polarisation microscopique de chaque domaine ne peut prendre que quatre valeurs : 71° , 90° , 109° et 180° .

II.3 Propriétés physiques des matériaux piézoélectriques

II.3.1 Ferroélectricité

La classe des ferroélectrique est constituée de cristaux dont la polarisation spontanée des domaines microscopiques peut être réorientée par l'application d'un champ électrique extérieure.

Un matériau ferroélectrique ne présente pas de propriété macroscopique piézoélectrique avant polarisation. Une fois polarisé il devient alors piézoélectrique.

II.3.2 Polarisation des matériaux ferroélectriques :

La plupart des matériaux ferroélectriques sont fabriqués sous forme de céramiques polycristallines mais il est possible d'obtenir ces matériaux sous forme de monocristaux, qui sont par ailleurs extrêmement fragiles. Les céramiques poly cristallines ferroélectriques sont formées de grains et de joints de grains. Pour des raisons énergétiques chaque grain est divisé en domaines au sein desquels les dipôles sont orientés dans la même direction.

Deux domaines adjacents possèdent des directions de polarisation différentes définies par la symétrie cristalline et sont séparés par une frontière appelée "mur de domaine". Cette zone de transition ne détruit pas la cohérence du réseau cristallin [BUR 79]. Sous sollicitation électrique ou mécanique, les murs de domaines se déplacent et leur mouvement est responsable de certaines pertes dans la céramique [LAM 78]. Cependant, il existe des compositions (matériaux dopés) pour lesquelles les murs de domaines sont moins mobiles.

Les polarisations spontanées des différents domaines sont orientées au hasard après frittage et le matériau n'a macroscopiquement aucun moment dipolaire électrique. Pour que le matériau possède un moment dipolaire rémanent, il faut orienter ces domaines dans une direction donnée. On doit donc soumettre le matériau ferroélectrique à un champ électrique intense qui aligne préférentiellement dans sa direction de polarisation des domaines. Les murs de domaines vont alors se déplacer, certains domaines vont croître en volume et d'autres disparaître avec l'augmentation du champ. Les dipôles se réorientent plus ou moins facilement suivant leur configuration initiale. Dans les matériaux de structure pérovskite, les domaines 180° basculent complètement car le réseau ne subit pas de déformation structurale. En revanche, les domaines à 71° , 109° et 90° induisent des déformations importantes de réseau cristallin qui se traduisent par une réorientation partielle de ces domaines. Le matériau ainsi polarisé devient anisotrope et possède une symétrie radiale dans le plan perpendiculaire à la polarisation.

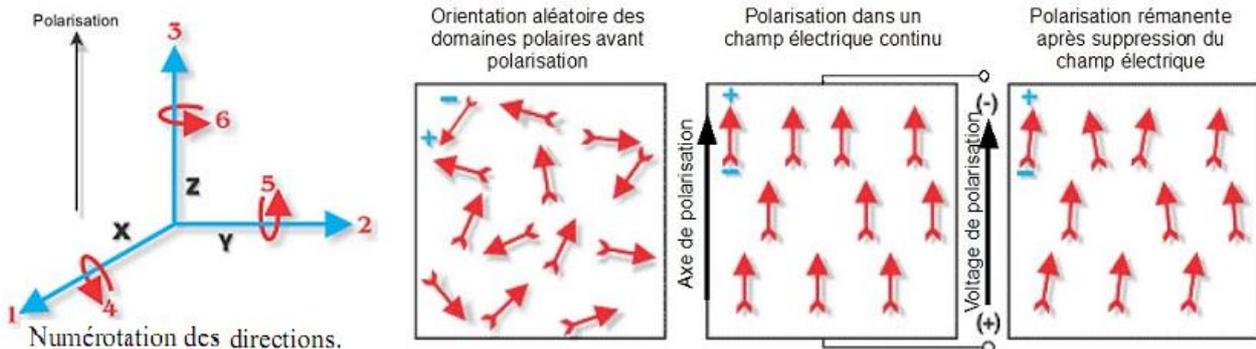


Figure II.6 : Domaines dipolaires électriques dans les matériaux piézoélectriques

II.3.3 Dépolarisation

Le champ électrique appliqué durant la polarisation de la céramique définit le sens et la direction de la polarisation rémanente. Si certaines précautions ne sont pas prises, un effet de dépolarisation partiel, ou même total, peut apparaître [PHI 91]. Il peut y avoir plusieurs origines à la dépolarisation: électrique, mécanique ou thermique.

II.3.3.1 Dépolarisation électrique

Si un champ électrique de polarité inverse à la polarisation est appliqué, celle-ci sera temporairement ou définitivement amoindrie. L'effet dépendra de l'intensité du champ, de la durée pendant laquelle il est appliqué et de la température de la céramique. La dépolarisation électrique commence à être sensible à partir d'un champ inverse de 100 à 500 V/mm pour les PZT à 100°C . Aux températures plus élevées, le champ limite décroît. Un champ alternatif aura aussi un effet dépolarisant durant l'alternance opposée à la polarisation.

II.3.3.2 Dépolarisation mécanique

Elle apparaît lorsque la contrainte mécanique devient telle qu'elle perturbe les domaines de Weiss, détruisant l'alignement des dipôles. Cette limite varie beaucoup d'un matériau à l'autre et est comprise entre 2.5 et 35MPa pour les PZT.

II.3.3.3 Dépolarisation thermique

Si la céramique est portée à une température proche de son point de Curie, une dépolarisation totale et permanente a lieu. Une température d'utilisation correcte devrait se situer entre 0°C et la moitié de la température de Curie, comprise entre 160°C et 300°C pour les céramiques PZT usuelles.

II.3.4 Cycle d'hystérésis des matériaux ferroélectriques polarisés (PZT)

Le matériau polarisé sous champ électrique possède un moment dipolaire rémanent qui se traduit par une polarisation rémanente à champ nul. L'évolution de la polarisation en fonction du champ apparaît sous la forme d'un cycle d'hystérésis (cf.fig.II.7). Le champ coercitif noté E_c est le champ électrique nécessaire pour réorienter les dipôles du matériau ferroélectrique. La polarisation rémanente P_r correspond à la valeur de la polarisation à champ nul. Sous des valeurs de champ très élevées, la polarisation sature à $\pm P_s$.

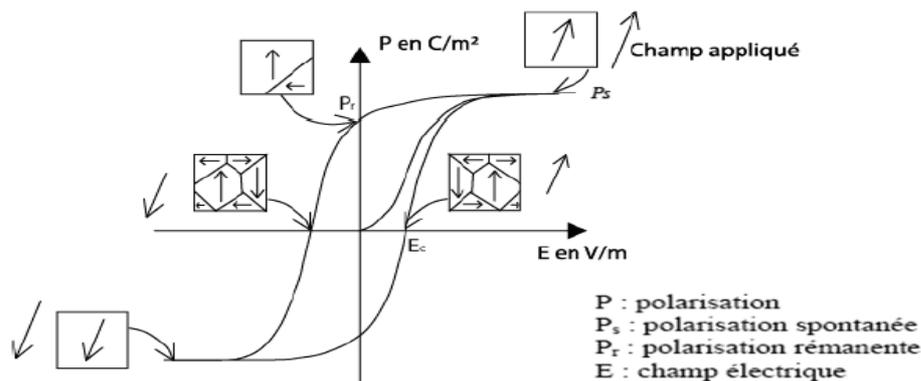


Figure II. 7 : Cycle d'hystérésis d'un matériau ferroélectrique

II.3.5 Vieillessement

Les propriétés des matériaux ferroélectriques soumis à des sollicitations mécaniques, électriques ou thermiques répétées peuvent être modifiées et décroître sensiblement avec le temps. Ce phénomène appelé vieillissement est relié à la variation progressive de la configuration des murs de domaines avec le temps. Ces derniers se réarrangent dans une configuration plus stable qui minimise l'énergie de la céramique piézoélectrique. Dans certains matériaux cela fait apparaître un champ interne E_i de direction opposée à l'axe de polarisation qui diminue sensiblement la polarisation rémanente. On exprime généralement la variation des propriétés piézoélectriques au cours du temps de la manière suivante :

$$X(t) = X(t_0) + A \ln(t/t_0) \quad (\text{II -1})$$

Où t_0 est le point de départ de la mesure, A correspond à la vitesse de vieillissement et X représente la grandeur piézoélectrique considérée. A titre informatif, la table II.1 présente un résumé comparatif des phénomènes de dilatation thermique, de magnétostriction, de

piézostriction et de l'électrostriction. Il est bien entendu difficile d'accorder une préférence pour tel ou tel type d'actuateur sans connaître l'application exacte auquel il est destiné, néanmoins, on notera que :

- Le caractère piézoélectrique est présent dans une grande variété de matériaux tels que certaines céramiques et certains polymères,
- Le marché propose un grand nombre d'actuateurs ou de senseurs piézoélectriques, notamment sous forme de laminés,
- Les déformations obtenues en appliquant un champ électrique sur un matériau piézoélectrique peuvent être d'un ordre de grandeur dix fois supérieur à celles obtenues avec un matériau électrostrictif,
- La puissance calorifique dissipée par un matériau piézoélectrique est inférieure aux pertes obtenues sur les matériaux magnétostrictifs, tout en évitant les problèmes dus aux perturbations magnétiques induites par les bobines magnétiques nécessaires à ce dernier type d'actuateur.

Table II.1 : Comparaison des performances fondamentales entre les effets thermique Magnétostrictif, piézoélectrique et électrostrictif [UCH 00]

	Dilatation thermique	Magnétostriction	piézoélectricité	Electrostriction
Déformation ($\Delta l/l$)	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	$10^{-9} \sim 10^{-3}$
Hystérésis	peu	significatif	significatif	peu
Vieillessement	peu	peu	significatif	peu
Temps de réponse	sec	nsec \sim μ sec	msec	μ sec
Actuation	chaleur	champ magnétique	champ électrique	champ électrique

II.3.6 Température de curie et transition de phase

Quand le matériau ferroélectrique est chauffé, il existe une température nommée point de curie et notée T_c qui correspond à un changement de phase structurale qui a pour conséquence de supprimer la polarisation rémanente. Le matériau passe alors de l'état ferroélectrique à l'état para-électrique. La permittivité relative du matériau ($\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$) atteint alors sa valeur maximale.

Pour les matériaux piézoélectriques non ferroélectriques, cette notion existe également et se caractérise par une modification notoire de leurs propriétés piézoélectriques. Par exemple, le quartz a se transformé en quartz β (hexagonal) lors du passage au point de curie.

II.4 Les actionneurs piézoélectriques

L'utilisation des matériaux électro actifs de type piézoélectriques dans les systèmes électromécaniques n'est pas nouvelle, mais elle est généralement utilisée dans les applications de type actionneur ou capteur (moteurs linéaires ou rotatifs, transducteurs acoustiques, microphone, capteurs de forces,...). Selon le principe de fonctionnement utilisé, nous pouvons distinguer substantiellement trois différents types de dispositifs piézoélectriques :

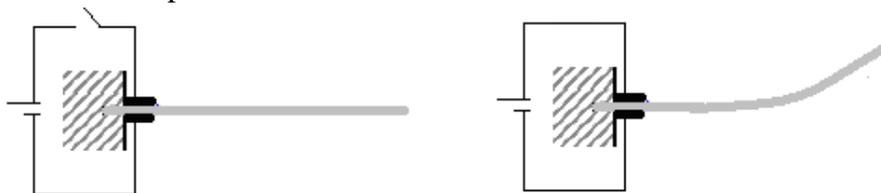
- Capteurs ;
- Actionneurs ;
- Transformateurs ;

Les capteurs utilisent l'effet piézoélectrique direct, les actionneurs l'effet inverse. Pour ce qui concerne le transformateur, on a affaire à un dispositifs particulier qu'utilise l'effet direct et inverse [LON 80, TSU 01]. Les matériaux piézoélectriques les plus utilisés comme actionneurs sont les céramiques PZT la direction de l'expansion générée dépend de la direction du champ électrique appliqué et des constantes piézoélectrique. En général .ces matériaux sont fabriqués pour favoriser un ou plusieurs axes d'action.

Les céramiques constituent la partie la plus importante des transducteurs piézoélectriques. Elles peuvent convertir des grandeurs mécaniques, comme la pression ou l'accélération, en quantités électriques ou, à l'inverse, convertir des signaux électriques en mouvements ou oscillations mécaniques. Les céramiques piézoélectriques sont utilisées dans une vaste gamme d'applications et recouvrent une large bande fréquentielle. Dans les capteurs, elles permettent la conversion des forces, des pressions et des accélérations en signaux électriques. Tandis que dans les actionneurs, elles permettent la transformation de tensions électriques en déformations mécaniques. Si des lamelles de quartz sont encore utilisées pour la fabrication de résonateurs en électronique, les matériaux utilisés pour les actionneurs sont le titanate de barium et des alliages de plomb, les oxydes de titane et de zirconium (couramment appelés céramiques piézoélectriques PZT).

D'un point de vue quantitatif, les déformations sont de l'ordre de 400 μ m sous une tension de 1V. La fabrication de céramiques piézoélectriques est réalisée à partir de poudres [GON 98, RIZ 99]. Les céramiques piézoélectriques soumises à une tension engendrent des déplacements très faibles, à moins que l'épaisseur de la céramique ou des couches de céramiques (elles peuvent être empilées et branchées en série) soit importante.

Ces éléments se présenteront souvent sous la forme des poutres type cantilever maintenues fixe à une de ses extrémités, tandis que l'autre extrémité sera libre de tout mouvement vertical (cf.fig.II.8). Le cantilever sera suspendu au-dessus d'une électrode d'actionnement fixée sur le substrat afin de déformer la poutre.



(a) Echantillon de PZT Tension OFF

(b) Echantillon de PZT Tension ON

Figure II 8 : Principe de fonctionnement d'une poutre piézoélectrique de type cantilever

Typiquement dans notre application, nous recherchons des actionneurs permettant des déplacements au moins de l'ordre de la dizaine du micron. Ainsi, lorsqu'on applique uniquement une contrainte mécanique, au matériau il se produit une déformation dans le sens de la force.

II.4 .1 Actionneur axial

Pour le cas d'un actionneur axial, le champ électrique est appliqué suivant l'axe du matériau dans le même sens que le champ électrique. Donc il est facile de démontrer que la déformation axiale d'un barreau de céramique est proportionnelle à la tension. Nous faisons l'hypothèse d'un régime quasi-statique, c'est-à-dire que les variations des sollicitations extérieures au système en fonction du temps sont pratiquement nulles, si bien que l'on néglige les effets dynamiques.

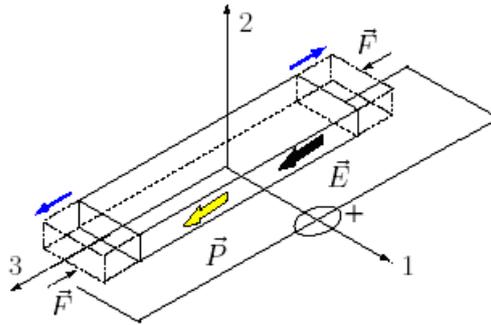


Figure II 9 : Actionneur axial

II.4 .2 Actionneur transversal

Les matériaux piézoélectriques se caractérisent par leur capacité à fournir une action mécanique sous l'effet d'un couplage, généralement réversible, de type électro élastique. Cet effet se traduit par une déformation suivant une direction. Dans le cas d'un mode de déformation transversal, le champ électrique est appliqué dans l'épaisseur (cf.fig.II.10).

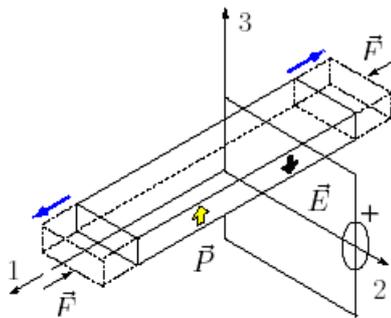


Figure II 10 : Actionneur transversal

II.4 .3 Actionneur en cisaillement d'épaisseur

Un actionneur piézoélectrique est déformé en mode de cisaillement, lorsqu'on applique un potentiel électrique perpendiculairement à la polarisation (cf.fig.II.11). Ce type d'actionneur est le moins courant. Dans ce cas-là, les directions de la polarisation et du champ électrique sont orthogonales. Les domaines de Weiss tendent à s'aligner sur le champ électrique induisant ainsi une déformation de cisaillement.

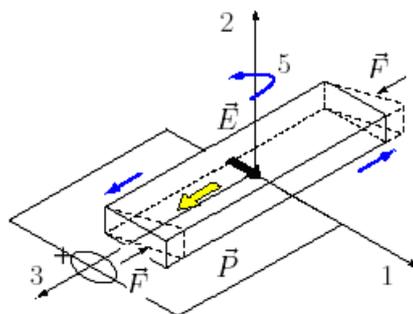


Figure II 11 : Actionneur en cisaillement d'épaisseur

II.4 .4 Actionneur piézoélectrique bimorphe

La théorie des poutres a été développée en Résistance des Matériaux (RDM) pour étudier, à une échelle macroscopique l'effet de sollicitations imposées à des éléments mécaniquement déformables. Cette théorie s'applique à des structures de forme simple (telle qu'une poutre droite ou légèrement incurvée) et dont les dimensions transversales sont petites par rapport à la longueur.

La théorie des poutres s'avère être, en première approximation, une méthode simple et efficace pour une première approche des phénomènes électromécaniques mis en jeu lors de l'actionnement du micro actionneur piézoélectrique (cf.fig.II.12). La poutre piézoélectrique peut être modélisée de la même façon qu'une poutre cantilever, généralement modélisée par une ligne « moyenne » représentant en fait leur axe de symétrie dans le sens de la longueur.

La force électrique peut être assimilée à une force de flexion appliquée dans le plan de la ligne moyenne. En première approximation, l'effet de la force d'actionnement peut être représenté par une force unique appliquée en un point du cantilever. Cette simplification conduit la plupart du temps à des résultats assez précis.

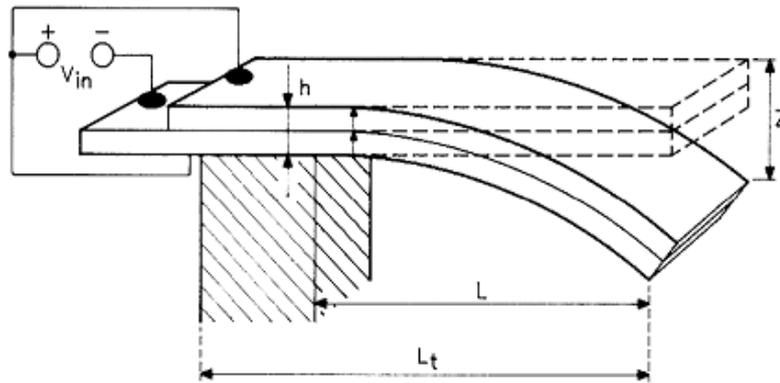


Figure II 12 : Déformation de la poutre Bimorphe

II.4 .5 Actionneur piézo-laminé

Les actionneurs plans piézoélectriques sont principalement utilisés dans des applications de positionnement micrométrique. Une première famille d'actionneurs plans s'appuie sur la génération de trois ondes stationnaires superposées qui génèrent l'onde progressive. Une seconde famille comprend des dispositifs basés sur l'excitation d'une onde stationnaire. Ces actionneurs ont pour particularité géométrique une de ses dimensions faibles devant les deux autres, soit l'épaisseur. Cette faible dimension attribue sur l'axe z des déformations en flexion bien supérieures à ses déformations en compression. Ce comportement peut s'apparenter à celui d'une poutre en flexion, et de par la génération de cette approche à une plaque [GER 93, COU 80], admet l'hypothèse d'efforts tranchants négligeables (cf.fig.II.13).

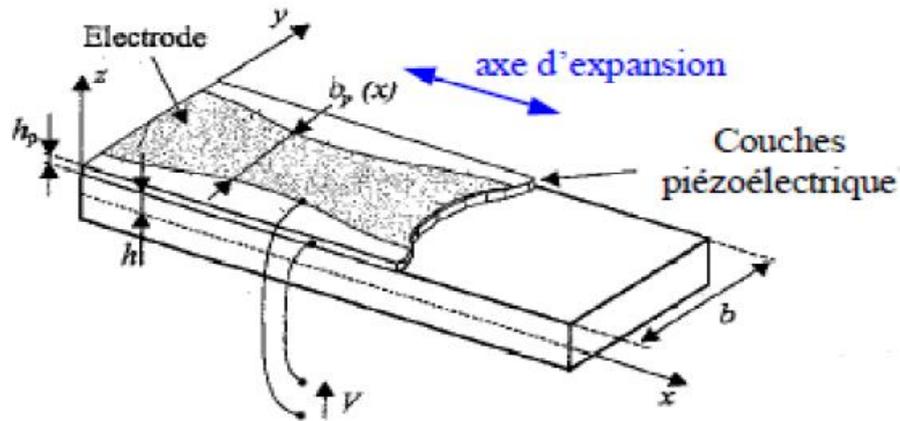


Figure II 13 : Déformation laminaire

II.5 Spécificités

Les éléments piézoélectriques sont utilisés pour des applications de capteur où l'on utilise l'effet piézoélectrique direct ou d'actionneur en utilisant l'effet piézoélectrique inverse. Ils ont des spécificités dans ce domaine qui les font préférer à d'autres éléments ou systèmes à couplage électromécanique (par exemple, actionneurs électrodynamiques de type bobine-aimant, alliages à mémoire de forme, dispositifs électrostrictifs ...) :

- Ce sont des actionneurs / capteurs solides travaillant directement en déformation, il n'y a pas de mécanisme pouvant s'user ou frotter. Cela est un avantage pour les applications dans des milieux hostiles. De plus, comme il faut les placer aux maximums de déformation, l'ajout de masse correspondant se fait à un endroit où les vitesses sont faibles et est donc peu pénalisant.
- Ils présentent une bonne linéarité et une réponse quasi-instantanée. Des applications hautes fréquence sont ainsi possibles.
- Le phénomène étant réversible, le rendement est élevé.
- La puissance massique admissible est importante, sous réserve de travailler en haute fréquence.
- Les céramiques sont très rigides (impédance mécanique élevée) et les tensions apparaissant sont élevées pour de faibles déformations (sensibilité).

Au nombre de leurs défauts, on peut citer un prix de revient pour l'instant assez élevé, un vieillissement mal connu, et aussi le fait que les hautes tensions et faibles charges en jeu ne sont pas toujours adaptée au couplage avec des circuits électroniques (en particulier il faut souvent un amplificateur haute tension pour actionner un élément piézoélectrique). Enfin, travaillant en déformation, ils ne permettent que de faibles déplacements.

II.6 Domaines d'utilisation de la piézoélectricité en ingénierie

Les matériaux piézoélectriques sont présents dans plusieurs domaines en ingénierie. On les utilise comme capteurs, actionneurs ou transducteurs ultrasoniques. Ils sont très présents dans les structures dites «intelligentes» où ils sont utilisés pour contrôler les vibrations des systèmes [DAI 99] ou encore pour la détection et la suppression des changements de forme de ces structures [MOH 03]. Les matériaux piézoélectriques sont aussi utilisés pour la détection in situ et pour corriger les défauts introduits par l'usinage, les distorsions thermiques ou l'humidité dans les matériaux [HUA

00]. Des feuillets piézoélectriques sont parfois utilisés dans les systèmes électroniques pour servir de système de refroidissement [MAN 02]. Lorsque soumis à un champ électrique, les feuillets de piézocéramiques induisent des vibrations dans la pièce, ce qui permet de créer un courant d'air nécessaire au refroidissement des circuits.

Enfin, la puissance électrique produite par les matériaux piézoélectriques soumis à des vibrations peut être récupérée afin de remplacer les batteries traditionnelles dans l'alimentation des dispositifs électroniques portatifs [HYU 00].

II.7 Dispositifs piézoélectriques et leurs applications

Le tableau II.2 énumère et explique quelques unes des applications les plus communes. Un premier exemple venant de la vie quotidienne est représenté par le briquet, où l'utilisateur exerce une pression, à travers un mécanisme particulier, sur une céramique piézoélectrique générant ainsi un champ électrique assez fort pour provoquer une étincelle. Dans l'ingénierie automobile on retrouve beaucoup d'actionneurs basés sur le phénomène piézoélectrique. On pense par exemple aux capteurs permettant de détecter la présence d'objets durant l'opération de parking, aux capteurs de pression dans la chambre de combustion permettant de contrôler les vibrations du moteur avec des solutions de contrôle intelligent. Autre application intéressante est l'injecteur piézoélectrique. Ce dernier utilise un actionneur monté directement dans l'injecteur, ce qui permet une pulvérisation plus rapide et plus précise du carburant dans la chambre de combustion du moteur, et à plus haute pression (1800 bars, pour le Diesel). Cela se traduit par des rejets qui peuvent baisser de 30%, ainsi qu'un abaissement de la consommation. L'injecteur piézoélectrique va permettre aux constructeurs automobiles de répondre à la norme Euro V sur les gros véhicules, et de se conformer aux normes d'émissions américaines.

Table II.2 : Domaines d'applications des céramiques piézoélectriques

Militaire	Commercial	Médical
Capteurs de profondeur Systèmes de sécurité Hydrophones	Soudeuse ultrasonique Perceuse ultrasonique Indicateur de niveau	Traitement ultrasonique de la cataracte Thérapie ultrasonique
Automobile	Détecteur de défaut Décapants ultrasonique	Capteurs ultrasoniques Pompes d'insuline
Capteurs d'objets Capteurs pour Airbag Contrôle de vibrations Injecteurs	Capteurs sismiques Microphones Géophones	Détection du battement cardiaque du fœtus Acquisition d'image ultrasonique
Ordinateur	Systèmes d'alarmes Résonateurs pour radio/TV	Débitmètres Nébuliseurs
Micro-actionneur pour disque dur Transformateur pour notebook	Aviation	Consommateur
	Actionneurs pour flaps	Briquet Instruments musicaux Détecteurs de fumée

Dans les applications sous-marines les "sonar" varient des petits émetteurs pour bateaux aux systèmes professionnels utilisés dans les grandes traversées transatlantiques pour détecter la profondeur de l'eau. Dans les moteurs aéronautiques, les capteurs à ultrasons installés dans les turbines et dans les générateurs de puissance sont utilisés pour le contrôle dynamique. Ces capteurs

sont capables de détecter d'éventuelles charges mécaniques asymétriques dans le rotor, permettant ainsi d'implémenter des mesures correctives.

Dans les systèmes à ultrasons, les dispositifs piézoélectriques peuvent générer des ondes ultrasoniques très puissantes utilisées pour nettoyer, percer, souder et aussi pour stimuler des processus chimiques. De plus, ils fonctionnent aussi comme émetteurs et récepteurs d'ondes ultrasoniques dans des appareils de diagnostics médicaux et de contrôle non destructif des matériaux. Pendant un contrôle non destructif, une céramique piézoélectrique est excitée de manière à générer un signal acoustique à une fréquence ultrasonique, qui est ensuite transmis à travers l'échantillon à analyser. Si l'onde transmise rencontre un défaut structurel, une partie du signal est réfléchi et rejoint le récepteur avant le signal original permettant ainsi de détecter le défaut [TUR 94], [HAU 98], KRA 77 et DAV 92].

L'effet piézoélectrique inverse est utilisé dans le positionnement de précision : un champ électrique est alors appliqué à la céramique pour produire le déplacement désiré. Les exemples d'applications sont nombreux ; on y retrouve notamment l'alignement des fibres optiques, l'alignement des machines outils, l'amortissement actif des vibrations dans des structures mécaniques, l'amélioration de l'image par correction de l'inclinaison de miroirs.

Les actionneurs piézoélectriques sont aussi utilisés dans les soupapes hydrauliques et pneumatiques et dans des dispositifs médicaux tels les couteaux chirurgicaux et les inhalateurs avec nébuliseurs à ultrasons.

Pour ce qui concerne le transformateur piézoélectrique, de nos jours il n'est pas souvent utilisé ; la seule application pour laquelle il est commercialisé est dans le domaine du système "backlighting" des affichages LCD. Mais il y a plusieurs domaines qui requièrent des transformateurs de tension aux propriétés de plus en plus extrêmes, ce qui ouvre des nouvelles perspectives pour l'utilisation du transformateur piézoélectrique. En effet, c'est surtout la miniaturisation des produits qui fait que les transformateurs électromagnétiques atteignent leurs limites. Des nouvelles solutions sont demandées : le transformateur piézoélectrique, qui a une densité de puissance élevée [HEM 02], s'impose pour de telles applications grâce à sa structure très compacte. De plus, si l'on travaille dans un domaine de fréquence de quelques MHz (par exemple en télécommunication), les pertes fer dans les transformateurs électromagnétiques deviennent très importantes. Par contre, le transformateur piézoélectrique est adapté à ces domaines, car sa fréquence de résonance peut se trouver dans le domaine des MHz.

II.7.1 Réduction des vibrations d'un bras de satellite et des ailes d'avions

Le contrôle actif de vibrations des structures flexibles est un thème de recherche qui s'est beaucoup développé ces dernières années. Beaucoup de ces travaux sont consacrés spécifiquement aux grandes structures, en vue des applications aux futures stations spatiales (cf.fig.II.14a). Ces structures sont caractérisées par des modes possédant un amortissement naturel faible (typiquement quelques %) et se trouvant dans la bande passante des contrôleurs classiques (jusqu'à 500Hz). De nombreuses études sont en cours pour appliquer à de telles structures des contrôles de type feedback, le plus souvent modaux [JUN 90, NUR 84]. D'autres travaux ont été réalisés pour contrôler les deux premiers modes de flexion et de torsion avec un contrôle de type modal, en utilisant des transducteurs piézoélectriques comme capteurs et comme actionneurs (cf.fig.II.14b).

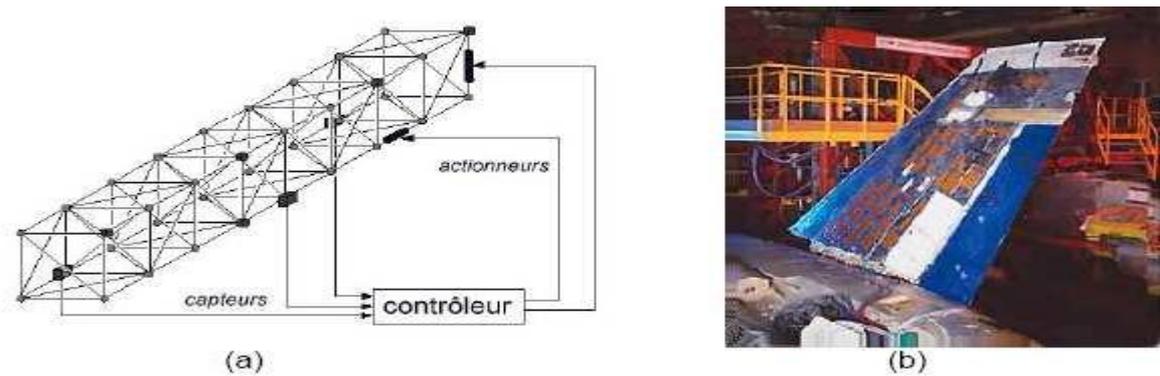


Figure II.14 : Dispositif de contrôle actif de vibration d'un : (a) bras de satellite, (b) aile d'avion Boeing-US Air Force

II.7.2 Micro-commutateurs

Les micro-commutateurs sont composés d'une poutre suspendue mobile ancrée à au moins une de ses extrémités. La poutre peut être à encastrement simple (on parle de structure type cantilever) ou à double encastrement (on parle de structure de type pont), comme le montre la figure II.15. La structure se déforme par l'application d'une tension entre la poutre et une électrode fixe placée en dessous, mais l'actionnement peut également résulter d'un phénomène thermique [BLO 04], piézoélectrique [PAR 01] ou magnétique [RUA 01]. Lorsque la partie mobile est actionnée (cf.fig.II.16), elle vient au voisinage, voire au contact, de l'électrode disposée à la surface du substrat.

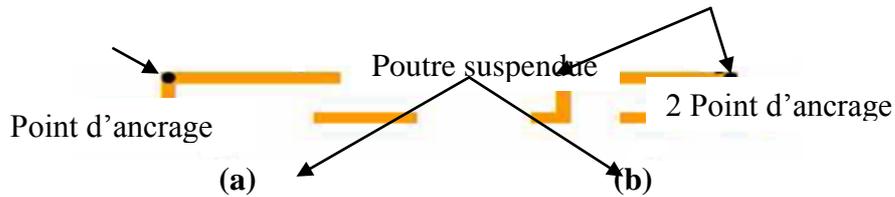


Figure II.15 : (a) Poutre à ancrage simple, (b) poutre à double ancrage [MER 03]

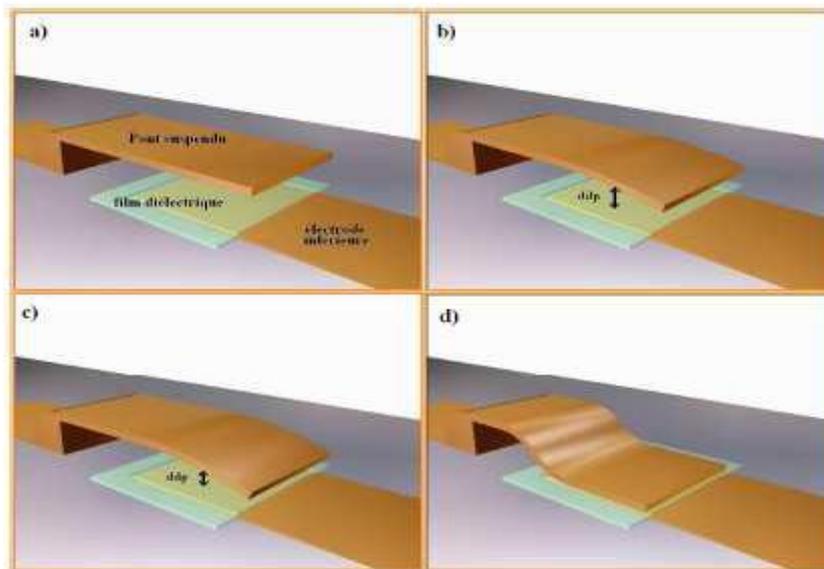


Figure II.16 : Principe de fonctionnement d'un microsysteme MEMS : (a) composant au repos - état haut (aucune tension n'est appliquée), (b) et (c) application de la tension d'actionnement : la poutre s'affaisse, (d) la poutre est totalement affaissée - état bas

II.7.3 Micro-pompe

Les premières micro-pompes piézoélectriques ont été proposées en 1988 par Van Lintel et al. [VAN 88]. Ces dispositifs miniatures sont complexes et de nombreuses solutions ont été envisagées pour convertir une quantité raisonnable d'énergie électrique en une énergie mécanique suffisante pour actionner une micro-pompe. La plupart font appel à la combinaison de la technique de sérigraphie d'une suspension de matériau piézoélectrique et des techniques bien connues de micro-usinage de substrats silicium. D'autres voies sont utilisées comme le dépôt des films minces par la méthode sol-gel ou par pulvérisation mais les épaisseurs atteintes sont beaucoup plus faibles.

La micro-pompe décrite (cf.fig.III.17), proposée par l'équipe de White et al. [KOC 98] utilise comme actionneur une couche épaisse piézoélectrique de PZT sérigraphie. Trois plaques usinées de silicium sont empilées. Deux petites lames font offices de valves pour l'entrée et sortie du fluide. La membrane de l'actionneur piézoélectrique est placée au dessus du système. L'oscillation de cette membrane vibrante fait varier le volume à l'intérieur de la chambre. Lorsque le volume de la chambre augmente, les valves A et B sont aspirées, A s'ouvre et B se ferme : le fluide pénètre dans la cavité. A l'inverse, quand le volume de la chambre diminue, les valves commutent dans l'autre sens, la valve A se ferme et la valve B s'ouvre : le fluide est expulsé.

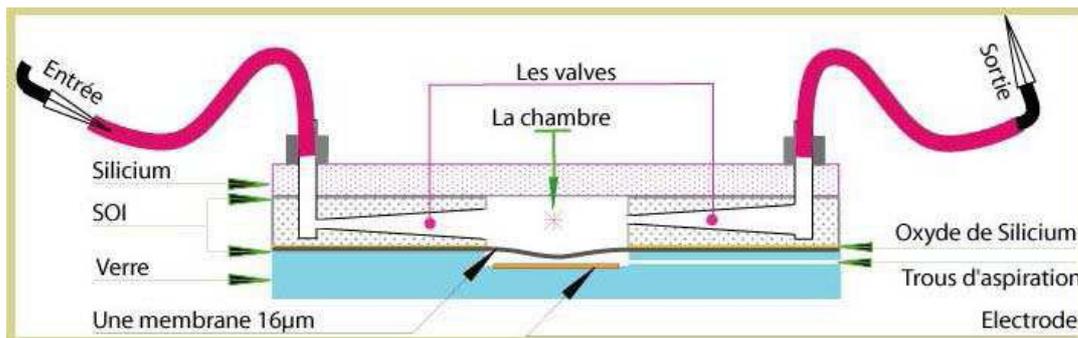


Figure II.17 : Micro pompe piézoélectrique

III.7.4 Micro pinces actionnées par des matériaux piézoélectriques

La piézoélectricité est aussi sans contexte, l'un des modes d'actionnement les plus prisés dans le cadre de la réalisation de micro-pincettes [WIL 00]. La littérature abondante traitant de micro-pincettes actionnées par un principe piézoélectrique en atteste. Ce relatif engouement pour ce mode d'actionnement n'est pas hasard. En effet, la piézoélectricité offre bon nombre d'avantages : une grande rapidité et une haute résolution font parties de ses principales qualités. En outre une bonne connaissance du principe physique, la large disponibilité de matériaux piézoélectriques de synthèse ainsi que les progrès de la recherche concernant les techniques d'actionnement (par déformation linéaire, par interaction de contact...etc.) favorisent l'exploitation de ces matériaux dans de nombreux domaines et en particulier la micro-robotique. C'est pourquoi, dans ce domaine, les premières réalisations de micropincettes ont été obtenues par l'utilisation de la piézoélectricité. Très en avance au regard des besoins en micromanipulation, nous pouvons citer par exemple le brevet de Heiserman (1986) qui propose une structure à deux doigts de serrage composés de bilame en polymère piézoélectrique (cf.fig.III.18).

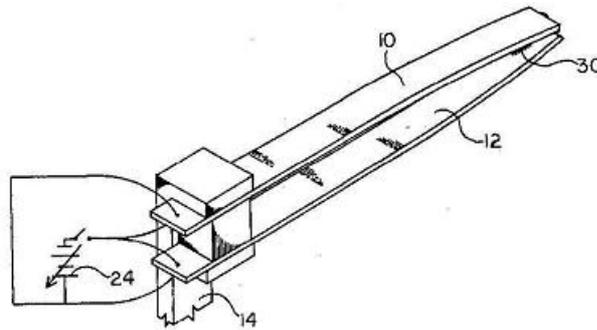


Figure II.18 : bilame en polymère piézoélectrique

A titre d'exemple, La Figure III.19 montre deux exemples de micro-pince à base de poutres uni-morphes [HAD 00] et de poutres bi-morphes [AGN 03]. Ces micro-pincettes de petite taille (de l'ordre du centimètre cube) travaillant en flexion génère typiquement un déplacement de quelques micromètres à plusieurs dizaines de micromètres et des forces d'au moins quelques dizaines Newtons. La pince de Haddab est équipée de deux bilames PZT/laiton dont l'extrémité des poutres joue le rôle d'organes terminaux. Agnus et al, ont réalisés une micro-pince très originale, car c'est la seule à être totalement monolithique parmi les micro-pincettes piézoélectriques. En effet, elle intègre les fonctions d'actionnement, d'amplification et d'organes terminaux, le tous réalisé dans une plaquette de céramique piézoélectrique massive (typiquement de 0.5 à 1mm d'épaisseur).

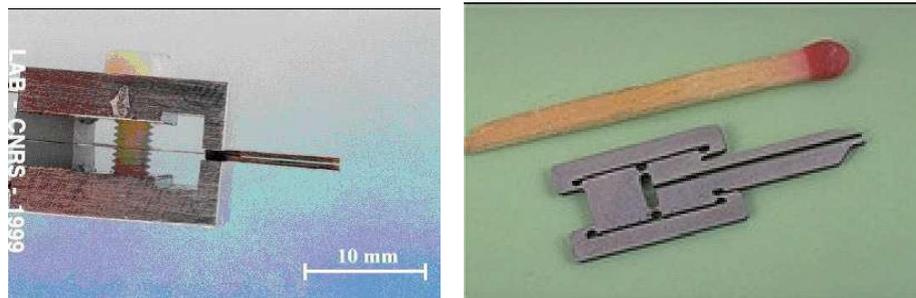


Figure II.19 : Une micro-pincette à poutres piézoélectriques : (a) unimorphes [HAD 00], (b) bimorphes [ANG 03]

II.7.5 Micro robots piézoélectriques

En robotique, l'utilisation de micro-actionneurs est courante. Par exemple, la figure II.20 montre un micro-robot propulsé par des palmes plastique prolongées par deux lames en ICPF. En se courbant, les ICPF assurent le battement des deux palmes, à des fréquences de quelques Hertz.

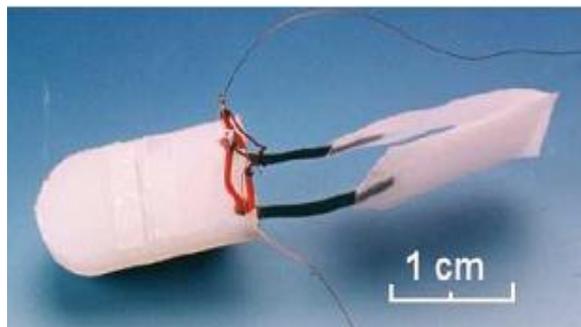


Figure II.20 : robot nageur à propulsion ICPF (Laboratoire d'Automatique de Besançon)

II.7.6 chaussures piézoélectriques développées par le M.I.T

Au cours de ces dernières années, le concept de récupération de l'énergie dissipée par le corps humain suscite un intérêt assez étendu. L'énergie résultant du corps humain, que ce soit sous forme de chaleur, de souffle ou de mouvements, présente l'avantage d'être gratuite, non polluante et disponible à loisir [MOL 00, TUR 02 et GON 02]. La puissance développée par le corps humain sous forme mécanique présente des valeurs significatives, notamment plus de 5W pour certains mouvements du pied ou la main. Même si une faible partie seulement de cette puissance peut être récupérée, les applications potentielles sont nombreuses dans la gamme de puissance entre 10 μ W et 1mW.

La récupération de l'énergie humaine intéresse particulièrement les chercheurs qui travaillent actuellement sur le concept du vêtement intelligent, équipé de capteurs et d'émetteurs, afin de connaître en permanence l'état de santé de la personne. Au sein du M.I.T (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge), des chercheurs travaillent sur les interfaces hommes/machines et sur la génération nomade de l'énergie électrique. Dans ce contexte, un groupe de chercheurs a réalisé, en collaboration avec la DERA, un dispositif de génération d'énergie électrique lors de la marche [SHE 01]. Il est formé de deux rubans précontraints et incurvés de céramique PZT « bimorphe » est placé dans le talon de la chaussure. Le choix d'utilisation de deux rubans est destiné à maximiser la contrainte et donc la puissance moyenne récupérée (14,4mW sur une charge résistive de 500k Ω). L'introduction de la céramique piézoélectrique à l'intérieur des voitures, ce qui réduirait le bruit de manière drastique. Lorsque l'on est passager, et que par exemple l'on ne peut s'entendre qu'avec la plus grande difficulté. Des efforts communs des plus grands organismes de recherche scientifique au monde, s'est donné pour objectif de réduire ce bruit à l'aide de céramique piézoélectrique, considérée comme un matériau intelligent.



Figure II.21 : Le bruit en voiture, réduit grâce à la piézoélectricité

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que l'avenir des matériaux intelligents passe en partie par l'étude approfondie de nouveaux matériaux piézoélectriques en couches minces et que leur intégration sur des plaques adaptables constitue un véritable enjeu. Dans ce domaine, le nitrure d'aluminium, l'oxyde de zinc et le zirconate titanate de plomb (PZT) se distinguent particulièrement. En raison de ses propriétés exceptionnelles, c'est le PZT qu'il a été choisi d'étudier au cours de ce travail. Nous avons abordé de manière simplifiée quelques aspects de la piézoélectricité mais également les particularités piézoélectriques du PZT. Quelques exemples ont permis de monter l'intérêt des couches piézoélectriques dans les microsystèmes électroniques.

Chapitre III

Théorie linéaire de la piézoélectricité

Dans ce chapitre, La compréhension du phénomène de la piézoélectricité et sa mise en équation nécessite des connaissances en mécanique des milieux déformables, il nous a semblé important d'introduire les notions essentielles de cristallographie ainsi que les bases de la mécanique des solides à travers les définitions de la contrainte et la déformation élastique. Nous décrirons la loi de Hooke, fondamentale à la théorie linéaire de la piézoélectricité.

III.1 Introduction

La compréhension du phénomène de la piézoélectricité et sa loi de comportement nécessitent des connaissances en mécanique des milieux déformables et en électromécanique. Ce mémoire s'adressant en premier lieu à des personnes issues des cursus de formation sur les matériaux, il nous a semblé important d'introduire les notions essentielles de cristallographie ainsi que les bases de la mécanique des solides à travers les définitions de la contrainte et la déformation élastique. Nous décrirons la loi de Hooke, fondamentale à la mise en équation de la piézoélectricité. Au travers d'un modèle physique simplifié, nous montrerons comment et pourquoi apparaît la piézoélectricité dans certain solide, en basant nos calculs sur l'étude du céramique piézoélectrique, matériau que nous avons retenu pour la modélisation de nos actionneurs. Ceci nous permettra par la suite d'introduire plus naturellement les équations de la piézoélectricité. Il en ressort couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. La résolution de ce système d'équation conduit au calcul des modes de déformations des actionneurs piézoélectriques à partir d'un champ électrique. Nous disposerons ainsi de toutes les clefs nécessaires à la compréhension de la piézoélectricité. Nous serons à même de comprendre, par exemple, le rôle important de l'orientation cristalline sur les performances des actionneurs piézoélectriques.

III.2 La loi de Hooke, les matériaux orthotropes

Un repère est défini par la donnée d'une base vectorielle associée à une origine. Il est à noter qu'en aucun cas il n'est fait l'obligation d'une base orthonormée. Bien évidemment, pour des questions de simplifications, nous essaierons toujours d'employer de telle base, mais nous pourrons aussi constater que suite aux déformations imposées à notre domaine, nous ne pourrons pas constamment conserver cette notion d'orthogonalité. Le mécanicien est ainsi tout naturellement guidé vers l'utilisation des notations tensorielles. A ce sujet, il est à noter que l'algèbre et l'analyse tensorielle professées en mathématique sont des enseignements directement issus de notions mécaniciennes. Le mot tenseur ne provient-il pas du mot tension. Ainsi on peut constater ce que la science mécanicienne a apporté à la connaissance des autres sciences. Cette remarque peut aussi bien s'adapter aux méthodes de résolutions numériques fortement issues de la méthode des éléments finis.

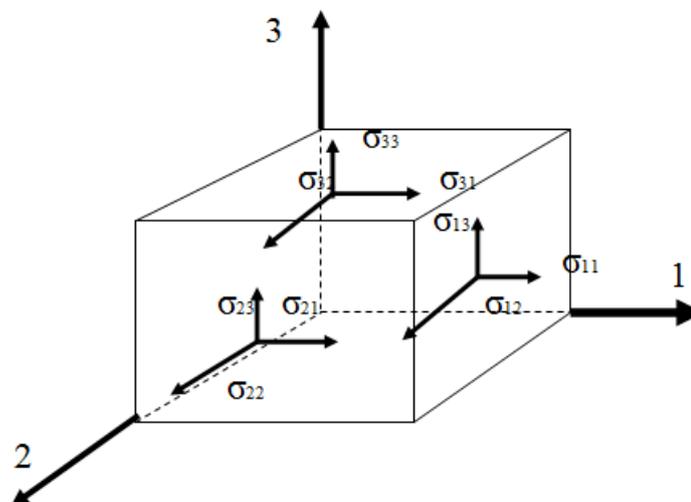


Figure III.1 : Composantes d'un tenseur de déformation

Dans le cadre de ce travail, seuls les problèmes élastiques linéaires seront traités. La relation entre contraintes et déformations peut être caractérisée par « loi du Hooke généralisé ».

Mathématiquement on peut l'exprimer par :

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{(III-1)}$$

Où les composants du tenseur de quatrième-ordre E_{ijkl} sont connus comme constantes élastiques. Chaque composant de contrainte lié à chacun des neuf composants du tenseur de déformation, il y'a 81 composants élastiques définissant le tenseur E_{ijkl} . Ce tenseur présente certaines propriétés de symétrie qui ramènent tout le nombre des composants indépendants à 21 pour un matériau qui n'a aucun axe de symétrie. Un tel matériau s'appelle « aelotrope ou anisotrope ». Le premier ensemble de réductions des constantes élastiques est obtenu en considérant la symétrie de la déformation. On peut facilement montrer qu'en raison de la symétrie du tenseur de contrainte, le tenseur d'élasticité E_{ijkl} . Devient comme suit :

$$E_{ijkl} = E_{ijlk} \quad \text{(III-2)}$$

Ce qui ramènera le nombre de constantes de 81 à 54.

La symétrie E_{ijkl} permet de nous donner une seconde réduction des constantes :

$$E_{ijkl} = E_{jikl} \quad \text{(III-3)}$$

Le nombre des constantes réduit à 36. La réduction supplémentaire du nombre des constantes indépendantes d'un total de 21, peut être accomplie seulement par la considération de l'énergie de déformation des matériaux élastiques :

$$U = U(\varepsilon_{ij}) \quad \text{(III-4)}$$

Avec la propriété :

$$\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij} \quad \text{(III -5)}$$

Alors d'après l'équation (III-1) on a :

$$\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{(III -6)}$$

La dérivée partielle de l'équation (III-6) par rapport à ε_{kl} donne :

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon_{kl}} \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} \right) = E_{ijkl} \quad \text{(III -7)}$$

Echangeons les indices de l'équation (III-7) :

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon_{ij}} \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{kl}} \right) = E_{klij} \quad \text{(III -8)}$$

Avec :
$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon_{ij}} \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{kl}} \right) = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{kl}} \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} \right) \quad \text{(III -9)}$$

Il est clair que :

$$E_{ijkl} = E_{klij} \quad \text{(III -10)}$$

La première paire d'indice dans le tenseur d'élasticité peut être échangée avec la deuxième paire sans n'importe quel changement des valeurs. Cette opération ramène le nombre des constantes élastiques indépendants pour un matériau anisotrope seulement à 21. Ces 21 constantes traduisent la réponse des forces appliquées sur un matériau anisotrope. Il convient de noter que, puisque les composants du tenseur de contrainte et du tenseur de déformation sont en fonction de l'orientation des axes de référence, les éléments du tenseur d'élasticité seront également des fonctions d'orientation des axes. Le tenseur d'élasticité est un tenseur de quatrième ordre et par conséquent sa loi de transformation à un autre système s'écrit comme suit :

$$E'_{mnr s} = a_{im} a_{jn} a_{kr} a_{ls} E_{ijkl} \quad \text{(III -11)}$$

$$a_{im} = \cos \alpha$$

E'_{ijkl} : Tenseur d'élasticité dans le système d'axe transformé x' .

E_{ijkl} : Tenseur d'élasticité dans le système d'axe original x .

a_{im} : Les cosinus de direction du nouvel axe en ce qui concerne l'axe original.

Une fois que les constantes élastiques sont connues dans un système de référence du même rang, la loi de transformation [l'équation (III-11)] nous permet de calculer les constantes élastiques dans n'importe quel autre système de coordonnées. En général, les constantes élastiques se changent avec la transformation, mais sous quelques transformations spécifiques. Les constantes élastiques peuvent demeurer sans changement en raison des symétries additionnelles existant dans les propriétés des matériaux.

III.3 Transformation des axes par rapport aux plans de symétrie

Considérons que le plan (x_1 - x_2) est un plan de symétrie d'un matériau orthotrope (cf.fig.III.1). Cette symétrie admet que les constantes élastiques ne changent pas sous la transformation du même rang :

$$x'_1 = x_1 \quad x'_2 = x_2 \quad x'_3 = -x_3 \quad \text{(III-12)}$$

Les cosinus de direction correspondants, peuvent être s'expriment comme suit:

Table III.1: Cosinus de direction

	x'_1	x'_2	x'_3
x_1	$a_{11} = 1$	$a_{12} = 0$	$a_{13} = 0$
x_2	$a_{21} = 0$	$a_{22} = 1$	$a_{23} = 0$

x_3	$a_{31} = 0$	$a_{32} = 0$	$a_{33} = -1$
-------	--------------	--------------	---------------

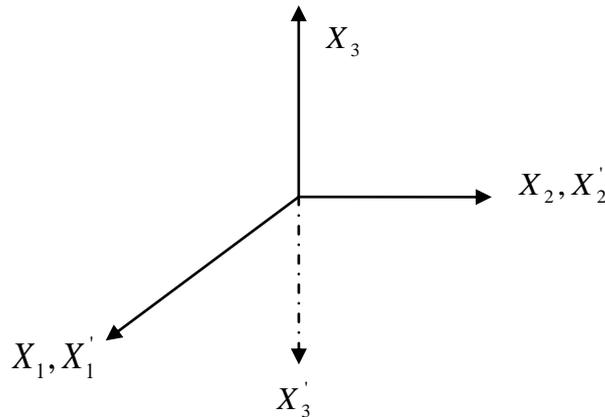


Figure III.2 : (x₁-x₂) plan de symétrie

L'invariance des propriétés élastiques sous la transformation du même rang impose certaines restrictions au tenseur d'élasticité. Ces restrictions sont réellement les conditions nécessaires pour satisfaire la condition d'invariance $E'_{ijkl} = E_{ijkl}$ qui est obtenue, en appliquant les lois de transformation de l'équation (III-11). À cette dernière, nous examinons la dépendance des composants E'_{ijkl} par rapport à E_{ijkl} :

$$\begin{aligned}
 E'_{1111} &= E_{ijkl} a_{i1} a_{j1} a_{k1} a_{l1} = E_{1111} \\
 E'_{1112} &= E_{ijkl} a_{i1} a_{j1} a_{k1} a_{l2} = E_{1112} \\
 E'_{1113} &= E_{ijkl} a_{i1} a_{j1} a_{k1} a_{l3} = -E_{1113}
 \end{aligned}
 \tag{III-13}$$

Puisqu'il y a seulement trois cosinus de direction non nuls tableau (III-1), l'expansion de la loi de transformation est simplifiée. Le résultat donné de l'équation (III-13) montre que les conditions d'invariance sont satisfaites pour les deux premiers composants examinés, mais pas pour le troisième. Pour satisfaire la condition d'invariance pour le troisième, il est nécessaire que E_{1113} soit nul.

D'une façon semblable, la condition sans changement des constantes élastiques sous la transformation du même rang dans l'équation (III-12) admet que huit des 21 constantes élastiques devraient être nulles.

$$E_{1113} = E_{2223} = E_{1123} = E_{2213} = E_{1213} = E_{1223} = E_{1333} = E_{2333} = 0
 \tag{III-14}$$

Considérons maintenant que (x₂-x₃) est le deuxième plan de la symétrie (cf.fig.III.3). Ceci signifie que les constantes élastiques ne changent pas sous la transformation du même rang:

$$x'_1 = -x_1 \quad x'_2 = x_2 \quad x'_3 = x_3
 \tag{III-15}$$

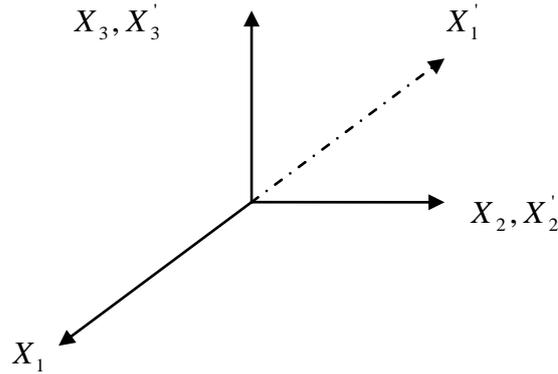


Figure III.3 : (x₂-x₃) plan de symétrie

Les cosinus de direction correspondant aux transformations précédentes sont :

Table III.2 : Cosinus de direction

	x'_1	x'_2	x'_3
x_1	$a_{11} = -1$	$a_{12} = 0$	$a_{13} = 0$
x_2	$a_{21} = 0$	$a_{22} = 1$	$a_{23} = 0$
x_3	$a_{31} = 0$	$a_{32} = 0$	$a_{33} = 1$

L'application de la loi de transformation l'équation (III-11) aux cosinus de direction donnés par le tableau (III-2) mènera aux contradictions du type montré dans l'équation (2-13). Ceux-ci sont résolus en annulant certains constants élastiques :

$$E_{1233} = E_{1323} = E_{1222} = E_{1112} = 0 \tag{III-16}$$

On peut préciser que la symétrie des propriétés élastiques en ce qui concerne deux plans mutuellement perpendiculaires implique la symétrie du troisième plan orthogonal. On peut vérifier que le troisième plan de la symétrie [le plan (x₃, x₁)] n'apporte aucune réduction additionnelle des constantes élastiques dans le cas actuel. Ainsi les constantes élastiques d'un matériau orthotrope peuvent être décrites par le choix de neuf constantes:

$$(E_{ijkl}) = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} & E_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ E_{1122} & E_{2222} & E_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ E_{1133} & E_{2233} & E_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{1212} \end{bmatrix} \tag{III-17}$$

Il est inutile maintenant d'employer quatre indices inférieurs au tenseur original d'élasticité pour décrire les neuf constantes élastiques d'un matériau orthotrope.

Il est plus commode pour d'écrire la « loi du Hooke généralisé » comme suit:

$$\sigma_i = Q_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \tag{III-18}$$

Où : σ_i : Composant du tenseur de contrainte,

Q_{ij} : Composant du tenseur de rigidité, (a les mêmes caractéristiques de E_{ijkl})

\mathcal{E}_j : Composant du tenseur de déformation technologique.

L'équation (III-18), peut être écrite sous la forme matricielle :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{(III-19)}$$

Notons que les axes du même rang coïncident avec les axes de symétrie. Pour un cas bidimensionnel, toutes les constantes qui sont reliées à l'axe x_3 peuvent être mises à zéro.

La relation contrainte/déformation est la suivante :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{(III-20)}$$

Les relations contrainte/déformation données par l'équation (III-1) peuvent être exprimées sous une forme inversée :

$$\begin{cases} \varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \\ [S_{ij}] = [Q_{ij}]^{-1} \end{cases} \quad \text{(III-21)}$$

S_{ij} : Matrice de souplesse.

Il est évident que le tenseur de souplesse a les mêmes propriétés de symétrie que le tenseur d'élasticité et le même type de lois de transformation.

En conclusion, la relation contrainte/déformation pour un matériau orthotrope pour le cas bidimensionnel peut être écrite en termes de matrice de souplesse comme suit:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{(III-22)}$$

Où les directions 1 et 2 coïncident avec les axes principaux.

On peut noter que les équations (III-20) et (III-22) sont les inversions de l'un à l'autre. Par conséquent les coefficients qui relient les éléments de la matrice de rigidité à la matrice de souplesse peuvent être obtenus comme suite :

$$\begin{cases} Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \end{cases} \quad \begin{cases} Q_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{66} = \frac{1}{S_{66}} \end{cases} \quad \text{(III-23)}$$

Il faut préciser que tandis qu'un matériau orthotrope tridimensionnel exige neuf constantes élastiques indépendantes comme montrés dans l'équation (III-19), seulement quatre constantes sont nécessaires pour un matériau orthotrope bidimensionnel. Le nombre des constantes élastiques exigées pour un matériau isotrope est seulement deux pour l'état de contrainte bidimensionnelle et tridimensionnelle

III.4 Equations constitutives de la piézoélectricité

Dans un milieu continu de matériau piézoélectrique, les grandeurs électriques et mécaniques à considérer sont respectivement les vectrices inductions électriques D et champ électrique E et les tenseurs de déformation \mathcal{E} et de contrainte σ . Pour un milieu continu déformable [RIT 10], lorsque le corps du solide est soumis à l'action de forces mécaniques extérieures, les tenseurs de contrainte représentent fondamentalement des forces internes dans le volume Ω appelées forces volumiques X et les forces sur la surface Σ appelées forces superficielles F_s [BEL 95].

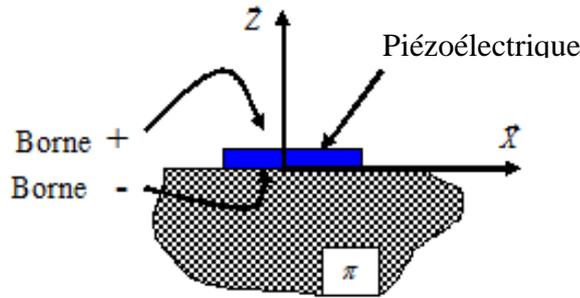


Figure III.4 : Structure piézoélectrique

Le corps solide se déforme et chaque point x de ce milieu se déplace d'une quantité u(x). Pour la déformation infinitésimale, les composants du tenseur de déformation d'ordre 2 sont définis par la relation suivante [BAR 90] :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{III-24}$$

Où \mathcal{E}_{ij} sont les composants du tenseur de déformation, i et j prennent les valeurs 1, 2, 3.

On note $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, u_i sont les composants du champ du vecteur déplacement u(x) selon l'axe x_i . Les composants du tenseur de déformation sont symétriques et les termes vérifient donc :

$$\mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E}_{ji} \tag{III-25}$$

Il est à noter que les indices des composants de grandeur mécanique sont de l'ordre de 2. Pour la facilité d'écriture, les indices peuvent être simplifiés à l'ordre 1. Les indices i et j prennent les valeurs 1, 2, 3 qui peuvent être remplacés par les indices p et q prenant les valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 6 selon le tableau III.3 [IEEE 87]. Cette simplification d'écriture est appelée la notation de Voigt.

Table III.3 : Notation des indices de matrices

ij	11	22	33	23 ou 32	13 ou 32	12 ou 21
P ou q	1	2	3	4	5	6

Théoriquement la piézoélectricité résulte de la combinaison de propriétés élastique et électrique. D'un point de vue mécanique, un milieu piézoélectrique est proche d'un milieu élastique. Selon la loi de Hooke, les composants du tenseur de déformation \mathcal{E}_p sont reliés aux composants du tenseur de contrainte σ_q . Les relations contraintes-déformations sont établies par les relations suivantes:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= Q_{pq} \mathcal{E}_q \\ \mathcal{E}_p &= S_{pq} \sigma_q\end{aligned}\tag{III-26}$$

Où Q_{pq} et S_{pq} sont respectivement les composants de la constante élastique (ou rigidités) et de la souplesse du matériau. Quant au point de vue électrique, un milieu piézoélectrique est proche d'un milieu diélectrique. La loi du comportement est définie en reliant les composants de l'induction électrique D_i aux composants du champ électrique E_j par les relations suivantes [UCH 00] :

$$\begin{aligned}D_i &= \epsilon_{ij} E_j \\ E_i &= \beta_{ij} D_j\end{aligned}\tag{III-27}$$

Où ϵ_{ij} et β_{ij} sont respectivement les composants de la constante diélectrique du matériau (permittivités relatives) et de l'impermittivité relative. Et le champ électrique est la dérivée d'un potentiel scalaire :

$$E_i = -\partial_j \phi\tag{III-28}$$

Par définition, la piézoélectricité fait apparaître des charges électriques sur les faces du matériau sous l'action de forces mécaniques (effet piézoélectrique direct). Donc les composantes de charge électrique sont proportionnelles aux composants du tenseur de contrainte. On obtient ainsi la relation suivante [BRI 07] :

$$D_i = d_{ip} \sigma_p\tag{III-29}$$

Où d_{ip} sont les composantes de la constante piézoélectrique ou encore du coefficient piézoélectrique de charge. Pour l'effet piézoélectrique inverse, l'application des charges électriques au matériau induit une déformation de la forme géométrique du matériau. Les composants du tenseur de déformation \mathcal{E}_p résultants sont proportionnels aux composants du champ électrique et donnés par :

$$\mathcal{E}_p = d_{pj} E_j\tag{III-30}$$

Dans un milieu piézoélectrique, les phénomènes électriques et mécaniques interagissent et sont appelés effets électromécaniques. En négligeant l'effet pyroélectrique, les relations fondamentales de la piézoélectricité sont données par les équations suivantes [IKE 90] :

$$\begin{aligned}\epsilon_q &= s_{qp}^E \sigma_p + d_{qi} E_i \\ D_j &= d_{jp} \sigma_p + \epsilon_{ji}^\sigma E_i\end{aligned}\tag{III-31}$$

Puisque les composants de la constante piézoélectrique sont symétriques, on peut donc dire

$$d_{jp} = d_{qi}^t$$

L'exposant t indique une transposition.

Dans les équations (III-31), l'expression du tenseur de déformation traduit respectivement l'effet élastique (équation III-26) et l'effet piézoélectrique inverse (équation III-30), et l'expression du vecteur induction électrique traduit l'effet piézoélectrique direct (équation III.29) et l'effet diélectrique (équation III.27). La présence de la piézoélectricité modifie les constantes élastiques et les permittivités pour les quelles il faut distinguer les modules de rigidité à champ ou à induction constante et les permittivités à contrainte ou à déformation constante [BRI 07]. Les constantes de souplesse S_{pq} et diélectriques \mathcal{E}_{ij} sont donc écrites respectivement avec un exposant E et σ . L'exposant E indique que les composantes de souplesse sont mesurables lorsque le champ électrique est constant ou nul. De façon similaire, l'exposant σ indique que les composantes de constante diélectrique sont mesurables lorsque la contrainte est constante ou nulle. Partant dans l'équation (III.31) d'un couple de variables (σ_p, E_i) , les trois autres équations des couples de variables choisis (σ_p, D_i) , (\mathcal{E}_p, E_i) et (\mathcal{E}_p, D_i) peuvent être déduites sous forme matricielle comme montré dans le tableau III.4. Dans le tableau III.4, d_{jp} , g_{jp} , e_{jp} et h_{jp} sont les matrices de constantes piézoélectriques, $\varepsilon_{ji}^\sigma, \varepsilon_{ji}^\varepsilon, \beta_{ji}^\sigma$ et β_{ji}^ε sont les matrices de constantes diélectriques, $s_{qp}^E, s_{qp}^D, c_{qp}^E$ et c_{pq}^D sont les matrices de constantes mécaniques. Les exposants S et D décrits dans le tableau III.4 sont indiqués pour la mesure lorsque la déformation et l'induction sont constantes ou nuls.

Table III.4 : Relations constitutives de la piézoélectricité

Couple variables choisis	Equation de comportement	Energie de Helmotz
(σ_p, E_i)	$D_j = d_{jp} \sigma_p + \varepsilon_{ji}^\sigma E_i$ $\varepsilon_q = s_{qp}^E \sigma_p + d_{jp}^t E_i$	$dG = -\varepsilon_q d\sigma_p - D_j dE_i$
(σ_p, D_i)	$E_j = -g_{jp} \sigma_p + \beta_{ji}^\sigma D_i$ $\varepsilon_q = s_{qp}^D \sigma_p + g_{jp}^t D_i$	$dG_1 = -\varepsilon_q d\sigma_p + E_j dD_i$
(\mathcal{E}_p, E_i)	$D_j = e_{jp} \varepsilon_p + \varepsilon_{ji}^\varepsilon E_i$ $\sigma_q = c_{qp}^E \varepsilon_p - e_{jp}^t E_i$	$dG_2 = \sigma_q d\varepsilon_p - D_j dE_i$
(\mathcal{E}_p, D_i)	$E_j = -h_{jp} \varepsilon_p + \beta_{ji}^\varepsilon D_i$ $\sigma_q = c_{qp}^D \varepsilon_p - h_{jp}^t D_i$	$dF = \sigma_q d\varepsilon_p + E_j dD_i$

[]^t est la transposée de la matrice [].

()^X indique que la grandeur est considérée à X constant ou nul.

A partir du tableau III.4, il est à noter que les coefficients du matériau piézoélectrique sont $d_{jp}, \varepsilon_{ji}^\sigma$ et s_{qp}^E pour le couple de variables choisis $(\sigma_p, E_i), g_{jp}, \beta_{ji}^\sigma$ et s_{qp}^D , pour le couple de variables choisis $(\sigma_p, D_i), e_{jp}, \varepsilon_{ji}^\varepsilon$ et c_{qp}^E , pour le couple de variables choisis $(\mathcal{E}_p, E_i), h_{jp}, \beta_{ji}^\varepsilon$ et c_{qp}^D , pour le couple de variables choisis (\mathcal{E}_p, D_i) . Lorsqu'on connaît les coefficients pour un seul couple de variables choisies, on peut déterminer les coefficients pour tous les autres couples de variables choisies en utilisant la formule du tableau III.5.

Table III.5 : Construction des matrices à partir d'un couple de variables choisies

$c_{qp}^E = (s_{qp}^E)^{-1}$	$e_{jp} = d_{jp} (s_{qp}^E)^{-1}$	$\varepsilon_{ji}^\varepsilon = \varepsilon_{ji}^\sigma - d_{jp} (s_{qp}^E)^{-1} d_{jp}^t$
$c_{qp}^D = c_{qp}^E + e_{jp}^t (\varepsilon_{ji}^\varepsilon)^{-1} e_{jp}$	$h_{jp} = (\varepsilon_{ji}^\varepsilon)^{-1} e_{jp}$	$\beta_{ji}^\varepsilon = (\varepsilon_{ji}^\varepsilon)^{-1}$
$s_{qp}^D = (c_{qp}^D)^{-1}$	$s_{jp} = h_{jp} (c_{qp}^D)^{-1}$	$\beta_{ji}^\sigma = \beta_{ji}^\varepsilon - h_{jp} (c_{qp}^D)^{-1} h_{jp}^t$

III.5 Coefficients piézoélectriques et modes de couplage électromécanique

Considérons maintenant un matériau piézoélectrique de type céramique PZT.

Selon la notation des techniques de l'ingénieur [NOG 96], les coefficients de la céramique piézoélectrique PZT, $s_{qp}^E, \varepsilon_{ji}^\sigma, d_{jp}$ peuvent être obtenus en utilisant les formules du tableau III.6.

Table III.6 : Matrices de coefficient des matériaux céramiques piézoélectriques

$s_{qp}^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix}$	$\varepsilon_{ji}^\sigma = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^\sigma \end{bmatrix}$	$d_{jp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
---	---	--

Les principaux modes de couplage électromécanique dans les céramiques PZT sont : le mode longitudinal (ou mode-33), le mode transversal (ou mode-31) et le mode de cisaillement (ou mode-15).

Les dimensions de l'élément de matériau piézoélectrique considéré de forme parallélépipédique selon les trois axes sont respectivement a, b et L. Les électrodes sont placées sur les surfaces planes perpendiculaires à la direction de l'axe x_3 et situées en $x_3 = 0$ et $x_3 = L$. Le mode-33 apparaît lorsque le matériau est soumis à un champ électrique selon l'axe 3 et se déforme suivant ce même axe (cf.fig.III.5).

III.6 Equations de la piézoélectricité en mode-33

Considérons un matériau céramique piézoélectrique utilisé (cf.fig.III.5), ayant la forme d'un barreau de longueur L , de section $\varphi = a \times b$ de volume $\Omega = \varphi \times L$ et de surface fermée Σ_f orientée par le vecteur unitaire sortant n_i . Les électrodes sont collées sur les deux faces perpendiculaires à l'axe x_3 et situées en $x_3 = 0$ et $x_3 = L$. Une des extrémités située dans le plan x_10x_2 est encastree. L'autre extrémité supporte une masse M_t et une charge mécanique $F(t)$ uniaxiale appliquée selon la direction x_3 .

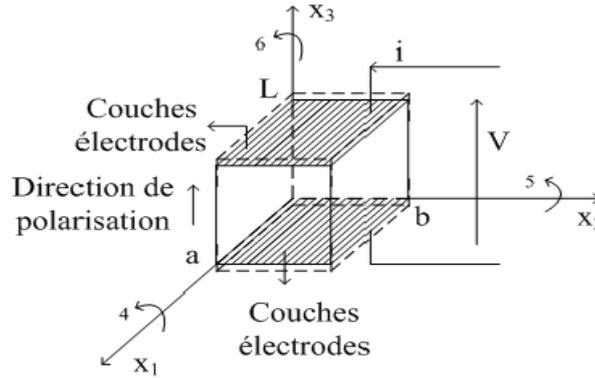


Figure III.5 : Mode longitudinal (mode-33)

Supposons que le barreau piézoélectrique est libre de contraintes de cisaillement. Lorsqu'on applique au barreau un champ électrique E_3 parallèle à l'axe x_3 , il se déforme parallèlement au champ électrique E_3 et son déplacement u_3 peut être calculé (mode longitudinal). Le choix du couple de variables dépend de ses coefficients donnés par le constructeur. Nous supposons qu'on connaît les matrices des coefficients du matériau céramique piézoélectrique (tableau III.4). Nous choisissons donc l'utilisation du couple de variables (σ_p, E_i) .

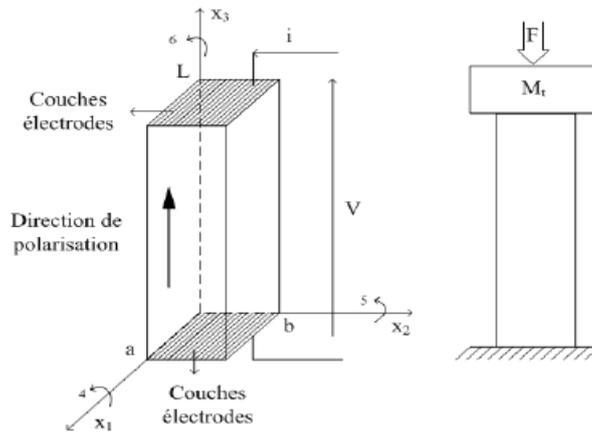


Figure III.6 : Barreau piézoélectrique en mode-33

Nous remplaçons les matrices des coefficients dans les équations (III.31) correspondant au couple de variables choisies (σ_p, E_i) de l'équation (III.31), on obtient les équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad \text{III-32}$$

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^\sigma \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad \text{III-33}$$

On considère maintenant les dimensions latérales du barreau piézoélectrique très petites devant la hauteur ($a, b \ll L$). Avec les hypothèses faites précédemment, on peut en déduire les conditions suivantes sur les grandeurs mécaniques :

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0 ; \sigma_3 \neq 0 ; \varepsilon_1 \neq 0 ; \varepsilon_2 \neq 0 ; \varepsilon_3 \neq 0 \quad \text{III-34}$$

Et sur les grandeurs électriques :

$$D_1 = D_2 = 0 ; D_3 \neq 0 ; E_1 = E_2 = 0 ; E_3 \neq 0 \quad \text{III-35}$$

En remplaçant les conditions électriques et mécaniques des équations (III.34) et (III.35) dans les équations (III.32) et (III.33), on obtient :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = s_{13}^E \sigma_3 + d_{31} E_3 \quad \text{III-36}$$

$$\varepsilon_3 = s_{33}^E \sigma_3 + d_{33} E_3 \quad \text{III-37}$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0 \quad \text{III-38}$$

$$D_1 = D_2 = 0 \quad \text{III-39}$$

$$D_3 = d_{33} \sigma_3 + \varepsilon_{33}^\sigma E_3 \quad \text{III-40}$$

A partir des équations (III-36), (III-37), (III-38), (III-39) et (III-40), on peut aussi exprimer les équations selon un autre couple de variables désirées, par exemple (\mathcal{E}_3 et E_3), (\mathcal{E}_3 et D_3), (σ_3 et D_3) et (σ_3 et E_3). L'expression du Lagrangien en fonction des variables \mathcal{E}_3 et E_3 . Nous avons donc déduit les relations de la contrainte σ_3 et de l'induction électrique D_3 en fonction des variables \mathcal{E}_3 et E_3 suivantes :

$$\begin{aligned}\sigma_3 &= \underline{c}_{33}^E \varepsilon_3 - \underline{e}_{33} E_3 \\ D_3 &= \underline{e}_{33} \varepsilon_3 + \underline{\varepsilon}_{33}^E E_3\end{aligned}\tag{III-41}$$

Avec $\underline{c}_{33}^E = \frac{1}{s_{33}^E}$; $\underline{e}_{33} = \frac{d_{33}}{s_{33}^E}$; $\underline{\varepsilon}_{33}^E = \varepsilon_{33}^\sigma - \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E}$

De façon similaire, si on connaît les coefficients du matériau céramique piézoélectrique e , ε^E et c^E , on les remplace dans les équations du couple de variables choisies (\mathcal{E}_p, E_i) du tableau III.4.

Ensuite on utilise les conditions mécaniques de l'équation (III.34) et les conditions électriques de l'équation (III.35) pour exprimer σ_3 et D_3 en fonction du couple de variables choisies \mathcal{E}_3 et E_3 . Finalement on obtient les relations des coefficients piézoélectriques suivantes :

$$\begin{aligned}\underline{c}_{33}^E &= c_{33}^E - 2 \frac{(c_{13}^E)^2}{c_{11}^E + c_{12}^E} \\ \underline{e}_{33} &= e_{33} - 2 \frac{e_{31} c_{13}^E}{c_{11}^E + c_{12}^E} \\ \underline{\varepsilon}_{33}^E &= \varepsilon_{33}^E + 2 \frac{e_{31}^2}{c_{11}^E + c_{12}^E}\end{aligned}\tag{III-42}$$

En connaissant les coefficients d'un seul couple de variables, nous pouvons exprimer σ_3 et D_3 en fonction de couple variables choisies \mathcal{E}_3 et E_3 .

III.7 Formalisme général et coefficients piézoélectriques

Le phénomène de couplage peut être décrit de manière adiabatique s'il s'agit d'une vibration rapide ou isotherme pour une transformation statique ou lentement variable. Comme les matériaux piézoélectriques sont anisotropes, leurs propriétés sont représentées par des tenseurs. Les matériaux piézoélectriques possèdent des performances différentes d'un matériau à un autre. Pour quantifier les performances des quartzs ou des céramiques, plusieurs coefficients sont définis [IKE 90, GON 98, CHA 89], résumé dans le tableau suivant :

Table III.7 : Grandeurs des équations d'état de la piézoélectricité

Termes mécaniques (notation de Voigt)		
σ	N/m ²	Contrainte mécanique (dimensions : 6 × 1)
\mathcal{E}	m/m	Déformation relative (dimensions : 6 × 1)
S	m ² /N	Compliance élastique (dimensions : 6 × 6)
c	N/m ²	Raideur élastique (dimensions : 6 × 6)
Termes piézoélectriques		

d	C/N ou m/V	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte a champ nul ou constant (dimensions : 3×6)
e	C/m ² ou N/V.m	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation a champ nul ou constant (dimensions : 3×6)
g	C/N ou m/V	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la contrainte et le champ a induction constante ou nulle (dimensions : 3×6)
h	V/m ou N/C	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ résultant a induction constante ou nulle (dimensions : 3×6)
Termes électriques		
E	V/m	Champ électrique (dimensions : 3×1)
D	C/m ²	Déplacement ou induction électrique (dimensions : 3×1)
ε	F /m	Permittivité diélectrique absolue (dimensions : 3×3)
β	m/F	Constante d'imperméabilité diélectrique (dimensions : 3×3)

Les matériaux étant anisotropes pour la plupart, chaque symbole possède un indice, soit unique comme D_i , soit double (\mathcal{E}_{ij}) ou encor triple. Souvent les indices triples sont contractés à deux en raison des symétries. Comme dit précédemment, les grandeurs envisagées étant tensorielles, d'ordre 1 pour le champ et l'induction électrique ou d'ordre 2 (contrainte et déformation), les facteurs les reliant sont donc aussi tensoriels, d'ordre 4 pour la complaisance ou la raideur, d'ordre 3 pour les constantes piézoélectriques ou d'ordre 2 pour la permittivité électrique. Le tableau III.7 est un glossaire des symboles utilisés dans les différentes équations et matrices.

III.8 Le coefficient de couplage électromécanique

Ce coefficient définit la capacité d'un matériau piézoélectrique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Soit la déformation en fonction de la contrainte à champ nul et à induction nulle, représentée sur (cf.fig.III.7). L'énergie électrique transformée s'écrit :

$$\Delta W_{\text{élect}} = \frac{1}{2} S^D \sigma_M^2 - \frac{1}{2} S^E \sigma_C^2 \text{ (aire OAC)} \tag{III-43}$$

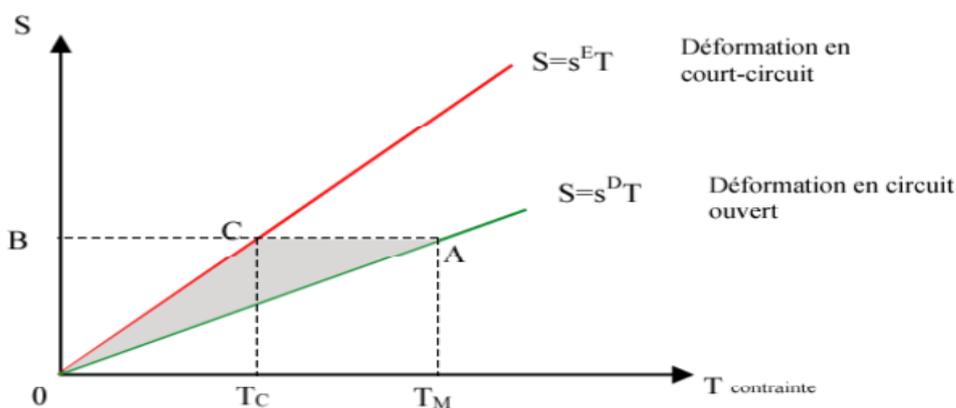


Figure III.7 : Décharge à déformation constante

Soit k le coefficient de couplage défini par :

$$k^2 = \frac{\Delta W_{elect}}{\Delta W_{méca.f}} = 1 - \frac{S^E \sigma_C^2}{S^E \sigma_M^2} = 1 - \frac{S^D}{S^E} \quad \text{III.44}$$

k relie bien l'aptitude de la céramique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique :

k^2 =énergie transformée/énergie fournie

L'expression du coefficient de couplage dépend de la forme du matériau et de la distribution des lignes de champ permettant d'exciter et de détecter les vibrations. Un disque, un barreau ou un film mince n'auront pas forcément le même coefficient de couplage. Le PZT a un fort coefficient de couplage, mais ce n'est pas son seul atout, le Tableau III-8 montre un comparatif entre les céramiques piézoélectriques massives les plus utilisées.

Table III.8 : Caractéristiques des matériaux piézoélectriques massifs les plus rencontrés

Matériaux piézoélectriques massifs		Constante diélectrique relative	coefficient piézoélectrique e_{15} (C.m ⁻²)	coefficient piézoélectrique e_{11} (C.m ⁻²)	coefficient piézoélectrique e_{33} (C.m ⁻²)
BaTiO ₃		$\epsilon_{11}=1744$ $\epsilon_{33}=97$	21,3	-2,65	3,64
Zb(Zr,Ti)O ₃	d _{ij} moyen	PZT massif	$\epsilon_{11}=650$ $\epsilon_{33}=560$	12,7	-5,2
		PZT composite		$d_{33}=7,9 \text{ pC.N}^{-1}$	
	Avec dopant		200 -15000	$d_{33}=490 \text{ pC.N}^{-1}$	
LiNbO ₃		$\epsilon_{11}=39 \text{ à } 80$ $\epsilon_{33}=26$	3,7	0,2	1,3
ZnO			-0,59	+0,61	1,14

III.9 Déformation d'un élément piézoélectrique

On distingue trois modes de déformation d'un barreau piézoélectrique (PZT) : mode longitudinal (33), mode transversal (31) et mode de cisaillement (15) (cf.fig.III.8). Ces modes correspondent à des échantillons de dimensions particulières. Dans le cas d'un disque mince, on parle du mode épaisseur (le champ E de même direction que l'épaisseur) plutôt que du mode longitudinal. De même, le mode radial doit être distingué du mode transversal. Jusqu'ici, seuls quelques modes sont définis parmi les modes distingués par Ikeda [IKE 90], selon les dimensions de l'échantillon et la direction du champ électrique appliqué (E) par rapport à la polarisation P .

A partir d'un choix convenable de ces grandeurs, un mode de déformation particulier peut être privilégié. Cette classification n'est pas purement formelle : le mode de déformation détermine le couple de variables parmi les quatre possibles (σ , E - ϵ , E - σ , D et S , D). Ce choix s'effectue à partir des conditions aux limites électriques et mécaniques. Un seul des quatre jeux d'équations (Tableau III.4) régit le fonctionnement du système piézoélectrique. Ce jeu d'équations fait apparaître trois coefficients électromécaniques qui constituent les coefficients de référence. Leurs

valeurs sont fournies par le fabricant. Les neuf autres coefficients doivent être calculés à partir des trois premiers [MAL 02]. Afin d'éviter les confusions, les coefficients définis par le fabricant sont désignés par « coefficients intrinsèques » et les coefficients calculés par « coefficients effectifs ».

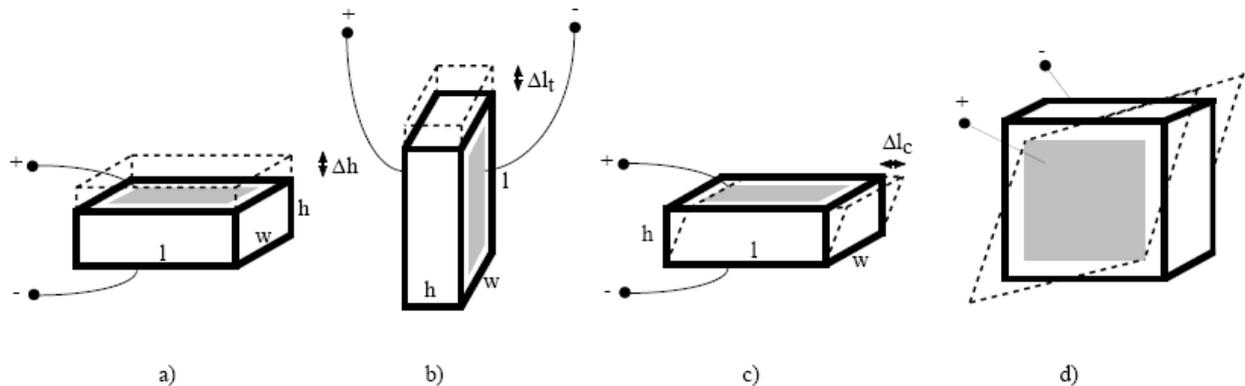


Figure III.8 : Modes fondamentaux de déformation des céramiques piézo-électriques:
a) déformation axiale, b) transversale, c) en cisaillement d'épaisseur et
d) en cisaillement de face

D'autres modes de déformation " parasites " résultant de la forme particulière de l'échantillon peuvent apparaître. Ils sont d'origine mécanique comme par exemple, des déformations perpendiculaires à l'épaisseur (mode radial traduit par le coefficient de Poisson comme présenté (cf.fig.III.9) ou d'origine électrique par déplacement dipolaire (modification des parois de blocs). En jouant sur la forme de l'échantillon (plaque, tube, ...) et sur sa polarisation (uniforme, radiale,...), une grande variété de déformations peuvent être exploitées.

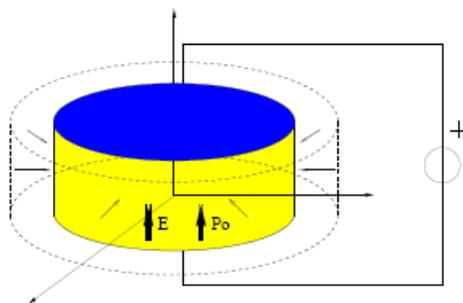


Fig. III.9 : Déformation parasite par conservation du volume. Pour une déformation Longitudinale, la conservation du volume introduit un mode transversal mécanique

Il est à noter que lors de l'utilisation d'une céramique, plusieurs modes interagissent simultanément. Ces modes parasites sont souvent négligés : les dimensions des structures sont choisies pour que ces hypothèses soient vérifiées. Par exemple, il est préférable de privilégier une longueur nettement supérieure à l'épaisseur pour utiliser le mode longitudinal d_{33} . Il existe des phénomènes transitoires dus à une inversion de la polarisation. Si on applique un champ électrique de sens opposé à la direction de polarisation du matériau et de valeur suffisamment forte (supérieure à la polarisation rémanente), les dipôles élémentaires vont s'aligner sur le champ extérieur et donc se retourner.

Comme la polarisation appliquée fournit l'énergie nécessaire, les dipôles pivotent suivant la croissance du champ. C'est cette rotation des dipôles (de forme non sphérique) qui introduit des variations de forme transitoires. Nous assistons tout d'abord à une contraction puis à une elongation

de l'échantillon. Cette déformation est réversible. C'est le phénomène analogue à celui rencontré dans les tôles magnétiques lors de l'orientation des moments magnétiques. Donc c'est naturellement que nous retrouvons des caractéristiques semblables : cycle de polarisation (phénomène d'hystérésis présent dans les matériaux ferroélectriques) et pertes proportionnelles à la fréquence. Le cycle d'hystérésis est significatif lorsque le champ dépasse environ 15% du champ maximum.

III.9.1 Déformation axiale

Partant de l'équation III-31 et sachant que le champ électrique vaut $E=U/h$ [V/m] il est facile de démontrer que la déformation axiale d'un barreau de céramique (cf.fig.III.10) vaut:

$$\Delta h = d_{33} \cdot U - \frac{E}{C_{Ea}} \quad \text{III.45}$$

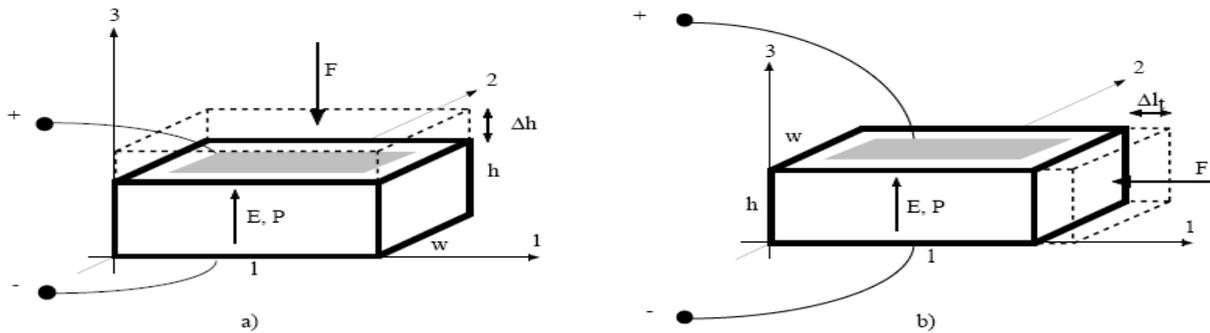


Figure III.10 : Barreaux en céramique piézo-électrique: a) actionneur axial, b) actionneur transversal

Où C_{Ea} est la rigidité du barreau donnée par: $C_{Ea} = \frac{W \cdot l}{S_{33}^E h}$ III.46

U est la tension d'excitation et F est une force extérieure appliquée au barreau. Si cette force est constante (cf.fig.III.10), la déformation est inchangée, mais un décalage initial apparaît. En revanche si elle est proportionnelle au déplacement, $F=\Delta h \cdot C_s$ où C_s est la rigidité du ressort, l'équation III-30 devient:

$$\Delta h = d_{33} \cdot U \cdot \frac{C_{Ea}}{C_{Ea} + C_s} \quad \text{III.47}$$

La fréquence de résonance d'un tel barreau, libre à une extrémité et fixe à l'autre vaut [PHI 91]:

$$f_{ra} = \frac{N_3^D}{2 \cdot h_s} \quad \text{III.48}$$

Où N_3^D est la constante de fréquence qui vaut la demi-vitesse de propagation du son dans la céramique [PHI 91].

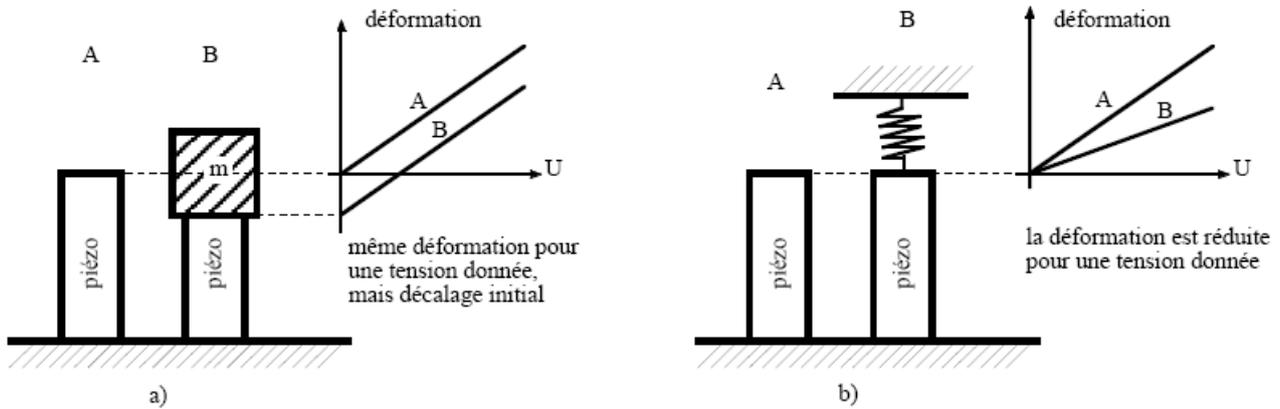


Figure III.11 : Influence d'une force extérieure sur la déformation d'un barreau: a) force constante, b) force proportionnelle au déplacement

III.9.2 Déformation transversal

De même qu'au paragraphe III.9.1, il est facile de démontrer que l'élongation d'un barreau de céramique en déformation transversale (cf.fig.III.11b) vaut:

$$\Delta l_t = d_{31} \cdot U \cdot \frac{1}{h} - \frac{F}{C_{Et}} \quad \text{III.49}$$

Où C_{Et} est la rigidité du barreau donnée par: $C_{Et} = \frac{W \cdot h}{S_{11}^E \cdot l}$ III.50

Dans ce cas de l'actionneur transversal précontraint par un ressort de rigidité C_s , l'équation III-46 devient:

$$\Delta l_t = d_{31} \cdot U \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{C_{Et}}{C_{Et} + C_s} \quad \text{III.51}$$

Il est intéressant de noter que dans le cas de l'actionneur transversal, la déformation libre ($F=0$), dépend des dimensions géométriques du barreau (équation III-49), ce qui n'est pas le cas pour l'actionneur axial (équation III-45). La fréquence de résonance du barreau libre à une extrémité et fixe à l'autre vaut:

$$f_{rt} = \frac{N_1^E}{2 \cdot l} \quad \text{III.52}$$

III.9.3 Déformation en cisaillement d'épaisseur

Ce type d'actionneur est moins courant. Dans ce cas, les directions de la polarisation et du champ électrique sont orthogonales.

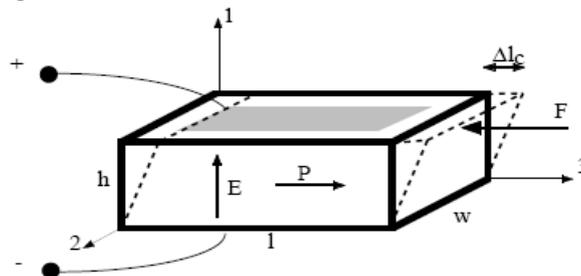


Figure III.12 : Actionneur en cisaillement d'épaisseur

Les domaines de Weiss tendent à s'aligner sur le champ électrique induisant ainsi une déformation de cisaillement. Nous pouvons de nouveau démontrer facilement que la déformation en cisaillement vaut:

$$\Delta l_c = d_{15} \cdot U - \frac{F}{C_{Ec}} \tag{III.53}$$

Où C_{Ec} est la rigidité du barreau en cisaillement donnée par: $C_{Ec} = \frac{W \cdot l}{S_{55}^E \cdot h}$ III.54

En fait, le coefficient S_{55}^E correspond à l'inverse du module de glissement G. S_{55}^E et S_{11}^E sont donc liés entre eux par facteur $1/(2 \cdot (1 + \zeta))$ où ζ est le coefficient de poisson [ROS 86].

A nouveau l'influence d'une force externe est la même que dans les cas précédents. Si elle est proportionnelle au déplacement l'équation III-53 devient:

$$\Delta l_c = d_{15} \cdot U \cdot \frac{C_{Ec}}{C_{Ec} + C_S} \tag{III.55}$$

La fréquence de résonance du barreau fixé sur une face vaut:

$$f_{rc} = \frac{N_5^E}{2 \cdot h} \tag{III.56}$$

III.10 choix du matériau piézoélectrique

La fabrication de matériaux piézoélectrique est réalisée à partir de poudres (si elle est réalisée en phase solide) [GON 98]. Outre phase de polarisation déjà décrite, une phase de frittage, visant à souder entre eux les grains, se fait sous contraintes axiales afin d'améliorer la tenue mécanique et diminuer la porosité. Les matériaux se conditionnent sous forme de film, de disque, de bâtonnet de section carrée ou circulaire.

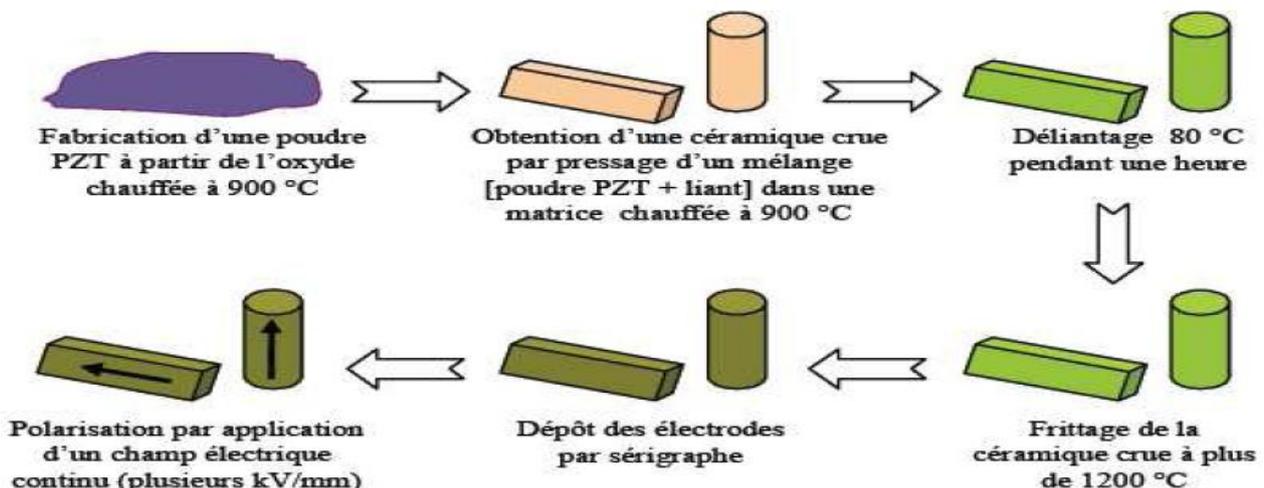


Figure III.13 : Cycle de fabrication des céramiques PZT par voie solide [GON 98, RIZ 99]

Nous venons de présenter le phénomène, les relations constitutives de la piézoélectricité et les modes de déformations d'un matériau muni de telles propriétés. Comme nous l'avons vu, c'est un principe connu de longue date et somme toute assez simple puisqu'il fait appel à des équations linéaires entre les grandeurs mécaniques et électriques. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'en pratique, ce type de matériau présente une hystérésis entre la tension appliquée à ses bornes et la

déformation résultantes. Nous présentons dans la section suivante un tour d'horizon des différents matériaux piézoélectriques existants à ce jour dans le but de choisir le plus adapté à nos besoins.

III.11 Quel matériau pour l'actionneur?

Parmi les matériaux qui présentent un effet piézoélectrique, on trouve des monocristaux, comme par exemple la tourmaline et le quartz, pour lesquels l'effet résulte directement de leur structure cristalline. On rencontre également des structures polycristallines, à savoir des céramiques comme le Titanate Zirconate de Plomb, usuellement appelés PZT, ou des polymères comme le Polyvinylidène fluoride, généralement appelés PVDF. Plus récemment sur le marché, on voit apparaître des cristaux relaxeurs issus de l'ingénierie cristallographique comme les PZN-PT ou encore les PMN-PT. Les structures polycristallines ainsi que les cristaux relaxeurs sont quant à eux rendus piézoélectriques par des traitements électriques et thermiques appropriés. Le tableau III.9 résume les principales caractéristiques de divers matériaux piézoélectriques.

Tableau III.9 : Principales caractéristiques de divers matériaux électroactifs selon TRS Ceramics Inc pour le PZN 4,5 % PT et Camus (1999) pour les autres

Référence	PZT 5H	PVDF	PMN	CFA	PZN 4,5 %PT
Type d'actionneur	Céramique piézoélectrique	Film piézoélectrique	Céramique électrostrictive	Composite à fibres actives	monocristal piézoélectrique
Déformation maximale	0,11 %	0,07 %	0,13 %	0,18 %	0,5 %
Module d'Young	60,6 GPa	2 GPa	64,5 GPa	35 GPa	12,2 GPa
Densité	7,50	1,78	7,80	4,65	8,3
Densité d'énergie mécanique	6,83 J/kg	0,275 J/kg	4,13 J/kg	12,2 J/kg	0,84 J/kg
Hystérésis	15 %	>10 %	<1 %	15 %	<5 %

Les céramiques électrostrictives présentent à température ambiante des niveaux de déformation légèrement supérieurs à ceux des matériaux piézoélectriques. Cependant, nous n'utiliserons pas ce type de matériau car les céramiques électrostrictives massives sont très délicates à élaborer à un niveau industriel et les propriétés sont très sensibles à la température et à la fréquence d'excitation. De plus, même si l'hystérésis est plus faible que celle rencontrée dans les céramiques piézoélectriques, le comportement est nettement non linéaire. Une autre différence réside dans l'absence de polarité réduisant ainsi par deux les déformations que nous pourrions obtenir avec un signal bipolaire. Les films piézoélectriques présentent une déformation maximale réduite mais surtout une densité d'énergie beaucoup trop faible pour être utilisés comme actionneurs. Ce type de matériau est plutôt utilisé dans l'élaboration de capteurs.

Les composites à fibres actives disposent de nombreux atouts, en particulier leur déformation importante au regard des matériaux précédemment cités mais aussi leur densité d'énergie. Malgré ces avantages apparents, nous n'exploiterons pas ce type de matériau pour des raisons de disponibilité. En effet, ces composites n'existent pas sur catalogue ; pour concevoir de telles

structures, il faut se procurer les fibres, élaborer le composite puis le polariser pour le rendre piézoélectrique.

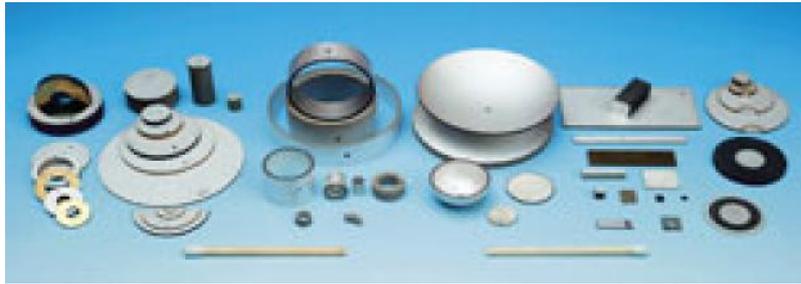
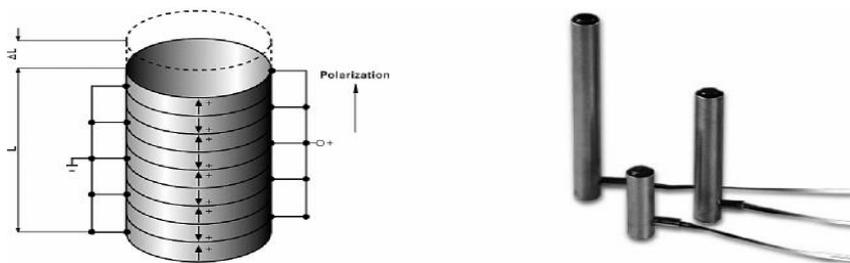


Figure III.14 : Céramiques piézoélectriques (source Ferroperm)

Les cristaux relaxeurs (PZN) sont des matériaux récents et les techniques d'élaboration restent à ce jour relativement coûteux. Ils offrent de larges déformations et possèdent des coefficients piézoélectriques bien supérieurs aux autres matériaux électroactifs. En revanche, il est impossible d'appliquer un champ électrique inverse sur ce type de matériau réduisant d'autant le potentiel de déformation d'un actionneur. La température de Curie est également plus faible, ce qui ne facilite pas les étapes de réalisation de structures d'actionnement. Pour ces raisons, nous ne choisissons pas ce matériau.



**Figure III.15 : Empilements piézoélectriques : schéma de principe ;
Actionneur commercial (source Polytec-PI)**

Notre choix se porte alors sur des céramiques piézoélectriques de type PZT. Ces matériaux sont en fait les plus utilisés en raison de leur large disponibilité sous diverses formes (cf.fig.III.15) et de leur facilité de mise en œuvre. Les matrices de souplesse, de permittivité et de coefficients piézoélectriques de ce type de matériau sont données par les relations III.32, III.33.

III.12 Quelle structure d'actionneur choisi?

Avant de procéder à un quelconque choix, nous proposons de présenter les actionneurs piézoélectriques les plus utilisés et disponibles sur le marché, parmi lesquels nous trouvons :

Les empilements libres (ou non contraints, cf.fig.III.16) : ces actionneurs ayant un mode de travail en d_{33} sont supposés fournir les énergies les plus importantes. On distingue les stacks piézoélectriques basse tension (100V à 400V) et haute tension (1000V à 2000V). Les stacks basse tension sont réalisés par l'assemblage collé de composants élémentaires obtenus par cofrittage de 20 à 40 lamelles d'épaisseur 80 à 120 μ m. Les stacks haute tension sont réalisés directement par le collage d'éléments d'épaisseur 0,5 à 2mm ;

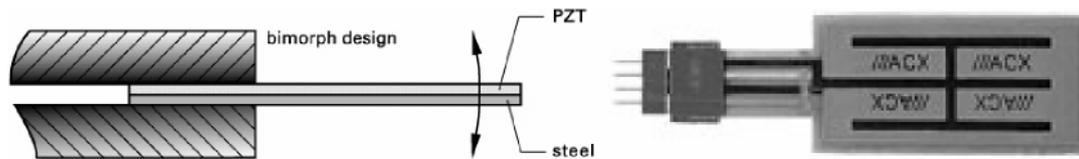


Figure III.16 : Unimorphe piézoélectrique : schéma de principe ; actionneur commercial Quickpack® (source ACX)

Les unimorphes et bimorphes piézoélectriques (cf.fig.III.16): les unimorphes sont composés d'une couche de matériau piézoélectrique généralement collée sur une lame métallique. Les bimorphes quant à eux sont constitués de deux couches de matériau piézoélectrique et parfois munis d'une très fine lame métallique entre les deux couches afin de rendre l'actionneur moins fragile.

Le mode transversal (exploitation du mode transversal d_{31}) est ici mis à contribution pour allonger le matériau piézoélectrique. La liaison mécanique entre ce dernier et le matériau support implique une flexion de l'ensemble. Dans le cas du bimorphe, les deux lames sont soumises à un champ électrique (l'une fonctionne en élongation et l'autre en contraction) et permet un travail plus important qu'un unimorphe où une seule lame est motrice. Ces actionneurs offrent des courses importantes mais les forces de blocage restent faibles par rapport aux actionneurs précédents ;

Les actionneurs monolithiques (cf.fig.III.17): ils sont de conception très différente des actionneurs précédents puisqu'ils sont réalisés directement dans la masse du matériau. Ce dernier remplit à la fois le rôle de structure mécanique déformable, par le biais de bras de levier et de charnières élastiques par exemple (cf.fig.III.17, image de droite), et d'actionneur aux endroits précis où les électrodes sont présentés et alimentés. A leur crédit, ces actionneurs sont très compacts et limitent les opérations d'assemblage de petites pièces. En revanche, deux inconvénients restreignent leur utilisation : en particulier, la relative fragilité du matériau ainsi que des configurations d'actionnement limitées aux structures planaires. Enfin, précisons également qu'il faut les élaborer à partir de matériau massif.

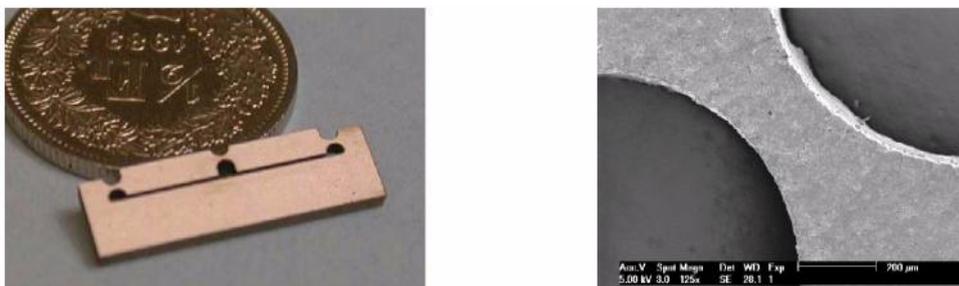


Figure III.17 : Un actionneur piézoélectrique monolithique (Breguet 1997) et le détail d'une charnière élastique (Perez 2001)

Tous ces actionneurs trouvent leur utilisation dans une application ou une autre en fonction de leurs avantages et de leurs caractéristiques intrinsèques. Finalement, sur la base des caractéristiques

d'un actionneur piézoélectrique, L'exploitation d'un ou plusieurs actionneurs piézoélectriques (de type empilements, disques, etc.) couplés à une structure déformable qui permet un mouvement amplifié. Cette solution exploite les déformations élastiques de certaines parties d'une structure. Ce principe a pour effet de ne pas faire intervenir d'autre frottement que celui interne à la matière. En outre, dans les petites dimensions, l'assemblage des différents composants d'un micro robot est en général très délicat. Il est donc important de minimiser ces étapes coûteuses et fastidieuses en privilégiant une structure suffisamment monolithique.

III.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par l'étude de la loi de comportement des milieux déformables et en électromécanique. Dans un milieu continu de matériau piézoélectrique, les grandeurs électriques et mécaniques à considérer en étudiant les équations constitutives de la piézoélectricité, on a retenu le couple d'équations (ϵ , E), Ce système d'équations nous servira pour établir un modèle unidimensionnel de la piézoélectricité. Plusieurs modes de déformations sont possibles, axial, transversal, en cisaillement d'épaisseur ou en cisaillement de face. Dans la suite de ce travail, Les modèles mécanique et électrique des actionneurs piézoélectriques établis ici seront utilisés dans le chapitre 4 pour la modélisation des actionneurs piézoélectriques. Ce chapitre nous a permis de retracer l'origine du phénomène de la piézoélectricité, ainsi que son évolution et son développement qui ont mené, de nos jours, à la conception des céramiques PZT à haute performance. Des relations mathématiques décrivant les propriétés électromécaniques des milieux piézoélectriques ont ensuite été introduites. Ces dernières seront utilisées dans la partie dédiée à la modélisation de l'actionneur.

CHAPITRE IV

Identification de la loi de comportement

Nous allons maintenant décrire différents modèles qui pourront être employés pour la simulation de ces mêmes actionneurs piézoélectricité. Ces modèles sont basés, pour les plus simples, sur une modélisation unidimensionnelle de la piézoélectricité. Nous présenterons notre modèle analytique unidimensionnel, dérivé à partir des équations couplées. Pour conclure sur l'analyse unidimensionnelle, nous détaillerons les avantages et les inconvénients de chacun de ces modèles.

IV.1 Introduction

La micro robotique est une discipline dont l'activité est la conception, la réalisation et la commande de micro robots et de systèmes micro robotiques en vue de réaliser des opérations à l'échelle micrométrique [CHA 99]. Les tâches de manipulation, c'est à dire la saisie, le maintien, le déplacement et la dépose d'objets en trois dimensions de très petite taille, sont parmi les thèmes majeurs de la micro robotique. On s'adresse plus particulièrement à la manipulation d'objets de dimensions globalement comprises entre $2\mu\text{m}$ et 1mm , objets constituant le « micro monde ». Ces tâches de micromanipulation posent cependant des problèmes spécifiques différents de ceux de la robotique de dimensions plus traditionnelles. En effet, dès lorsque les dimensions deviennent suffisamment petites, les effets traditionnelles. Les effets de surface deviennent prépondérants par rapport aux effets de volume. La micromanipulation concerne de nombreux secteurs, que ce soit l'assemblage de pièces micromécanique rigides (micro roues dentées, microlentilles optiques, circuits hybrides, etc.) ou la manipulation d'éléments biologiques pour la médecine ou les biotechnologies (micro-organismes, cellules, ADN, etc.) pour répondre à ces besoins, il existe de nombreux principes plus ou moins adaptés aux domaines d'application. Parmi ces principes de micromanipulation, deux grandes catégories se distinguent : la micromanipulation sans contact et la micromanipulation avec contact.

IV.1.1 La micromanipulation sans contact

Nous entendons par manipulation sans contact toutes les techniques dont les effets à distance permettent la maîtrise des mouvements d'un objet. Plusieurs principes physiques ont été mis en œuvre principalement dans le cadre de la manipulation ou du tri de cellules. Parmi ces principes, nous pouvons citer :

- L'exploitation de la pression lumineuse : ce principe est plus connu sous le nom de brucelles optiques ou en anglais, laser trapping [ASH 74, ASH 87] ;
- L'utilisation des forces de coulomb : deux procédés, l'électrophorèse [JEO 01] et le cytomètre de flux [FUL 68, VAN 00] sont principalement utilisés pour réaliser le tri d'une population de cellules ;
- L'exploitation des propriétés diélectriques : la diélectrophorèse par exemple est également utilisée pour la séparation de cellules cancéreuse dans le sang [GAS 97] ;
- L'utilisation d'une surpression: ce principe s'applique tout particulièrement à la manipulation d'objets plats comme par exemple la mise en place de circuits électroniques [WUT 00].

IV.1.2 La micromanipulation par contact

Dans cette catégorie, chacune de ces solutions met en œuvre un préhenseur, c'est à dire, un organe dont un ou plusieurs points de contact sont nécessaires pour saisir un micro-objet. Nous rencontrons plusieurs principes de fonctionnement :

- la manipulation par dépression, plus couramment appelé "vacuum";
- la manipulation par interface aqueuse : l'objet est par exemple saisi et maintenu par les forces de tension de surface d'une gouttelette d'eau [LAM 03] ;

- la manipulation par adhésion électrostatique : ce sont ici les forces surfaciques qui assurent la prise de l'objet par adhésion sur une poutre [ZHO 98].
- la manipulation par poussée : citons en particulier les travaux de [GAU 02] concernant un dispositif mettant en œuvre un "pousseur" (pièce intermédiaire en contact avec l'objet à manipuler) déplacé par un champ magnétique;
- enfin, la manipulation par doigts de serrage qui restent des outils universels, intuitifs pour l'utilisateur et encore exploitables à ces échelles.

Dans notre thèse on a retenu la manipulation avec contact

IV.2 La micro-pince à deux doigts de serrage

La prise et la dépose d'objets sont des opérations largement répandues dans le monde industriel. Ces tâches, bien maîtrisées pour des pièces de quelques millimètres de côté et plus, deviennent très délicates lorsqu'on désire manipuler des objets de quelques dizaines à plusieurs centaines de micromètres, notamment en raison des forces surfaciques d'adhésion qui deviennent prépondérantes à ces échelles au regard des forces volumiques. Si certaines catégories d'objets peuvent être manipulées par des procédés qui ont fait leurs preuves, en particulier les ventouses à dépression pour la mise en place de composants électronique montés en surface ou encore l'emballage/conditionnement de produits agro-alimentaires, les préhenseurs à doigts de serrage restent des outils universels, intuitifs pour l'utilisateur et tiennent une part importante dans la résolution des problèmes de manipulation. Nous passons en revue dans ce chapitre des micro-pincettes de différents actionnements :

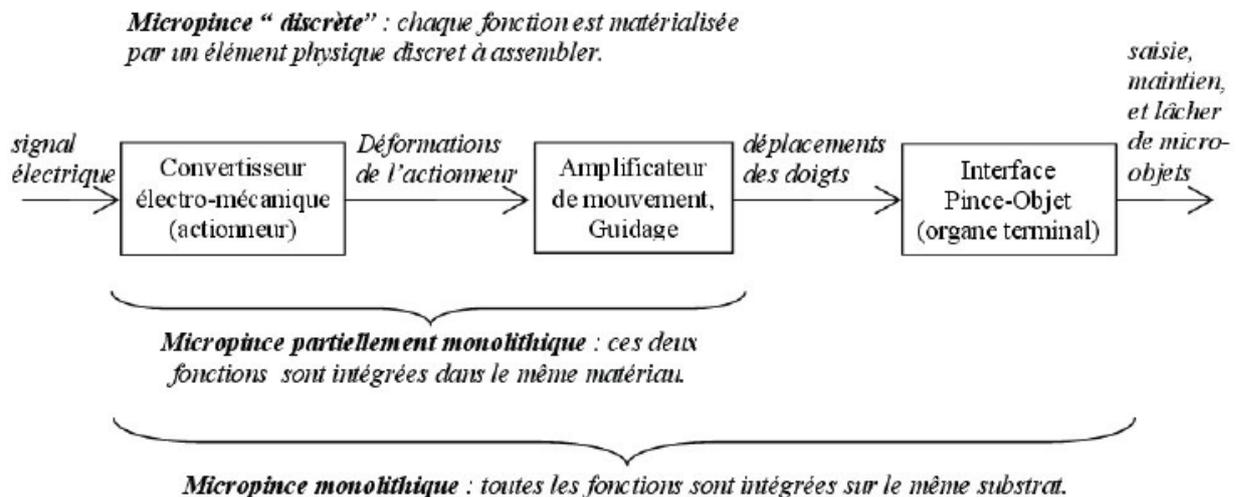


Figure IV.1 : Schéma fonctionnel d'une micro-pince

Au delà de ces différences, il existe des similitudes entre ces nombreuses réalisations en effet, nous pouvons classer ces prototypes en deux grandes catégories selon le type de structure (cf.fig.IV.1), ces structures sont souvent encastrées à leur base (ou supposées comme telle) et libres à leur extrémité. Aussi, nous désignons par "doigts de pince" les deux portions, passives ou actives, discrètes ou monolithiques, qui s'étendent de l'encastrement des parties mobiles à

l'extrémité des organes terminaux. Enfin, pour être précis, nous utilisons parfois le terme de "mors" qui correspond à une zone des organes terminaux en contact avec les objets à manipuler.

IV.2.1 Micro-pinces actionnées par un principe électrostatique

Toutes ces pinces utilisent les forces d'attraction coulombiennes présentés entre deux plaques chargées, soumises à une différence de potentiel. La force électrostatique peut être calculée à partir de l'expression de l'énergie emmagasinée U_e :

$$U_e = \frac{1}{2} CV^2 \quad (\text{IV-1})$$

Où C est la capacité électrostatique du système et V la tension appliquée. La force générée est donnée par :

$$F_e = -\nabla U_e \quad (\text{IV-2})$$

Dans tous les cas, le système tend à maximiser la capacité C. Cependant, il existe plusieurs manières de générer et d'exploiter les forces électrostatiques.

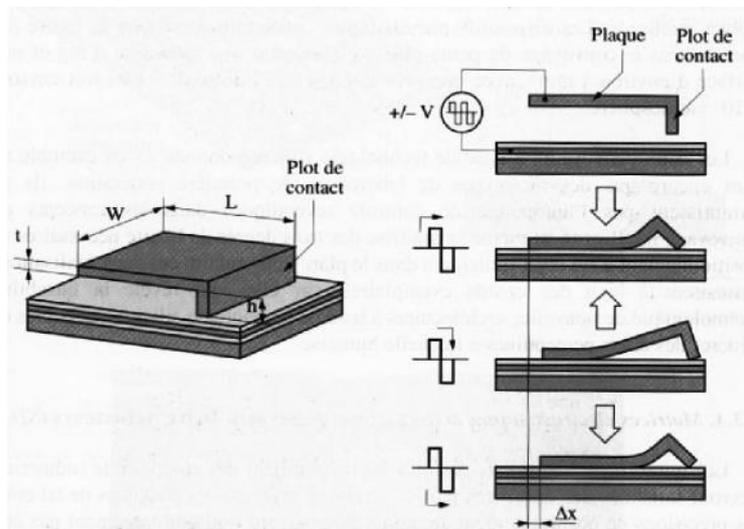


Figure IV.2 : Architecture mécanique et principe de fonctionnement des actionneurs à interaction de contact de type "Scratch Drive Actuator" [BOU 02, AKI 93]

IV.2.2 Micro-pinces actionnées par la pression d'un fluide

Ces pinces exploitent la pression d'un fluide pour engendrer la déformation d'une ou plusieurs parties flexibles d'une configuration mécanique qui permet l'ouverture et la fermeture des doigts de pinces. Ce principe d'actionnement, d'une grande densité d'énergie, permet d'envisager de larges déformations et des forces importantes. Nous classons les prototypes selon la nature du fluide utilisé, un gaz (pinces pneumatiques) ou un liquide (pinces hydrauliques) (cf.fig.IV.2).

IV.2.3 Micro-pinces actionnées par des alliages à mémoire de forme

Les alliages à mémoire de forme, ou AMF, désignent des matériaux qui, après déformation permanente à basse température, retrouvent leur forme initiale non déformée par simple chauffage. Cette propriété est appelée "effet à mémoire de forme" et est illustrée par la (cf.fig.IV.3).

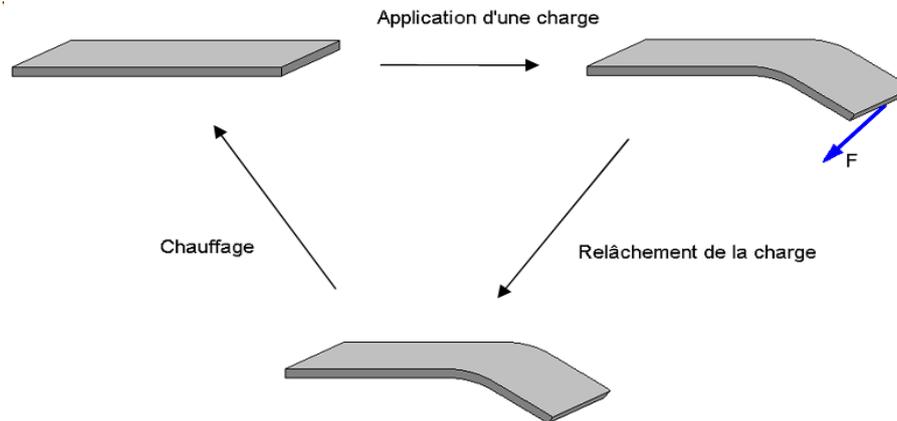


Figure IV.3 : L'effet mémoire de forme

Il convient de souligner que c'est lors du retour à sa forme initiale par chauffage qu'un AMF est capable de générer un travail mécanique et donc d'entraîner une charge (cf.fig.IV.4). C'est cet effet que l'on exploite lorsque l'on souhaite mettre en œuvre un AMF pour l'actionnement, la densité d'énergie du matériau étant considérable.

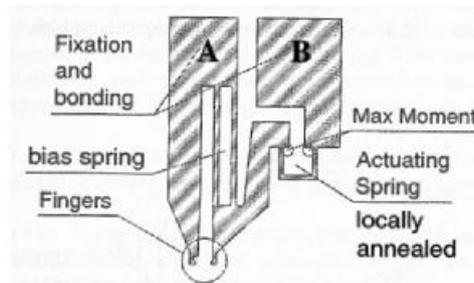


Figure IV.4 : Pince à mémoire de forme localisée
([ZHA 01], University Singapore et EPFL, Lausanne, Suisse)

IV.2.4 Micro-pinces actionnées par des déformations thermiques

Les micro-pinces actionnées par ce principe exploitent une dissymétrie que nous pouvons dissocier en deux catégories :

- La dissymétrie relative aux propriétés thermiques de deux matériaux, différents solidaires l'un de l'autre, généralement sous la forme de poutre élancée, sont portés à la même température la différence des propriétés thermomécaniques engendre une dilatation différente des deux couches il en résulte alors une flexion de l'ensemble du bilame.

- La différence de température, donc une dissymétrie de dilatation, entre deux zones d'un même matériau, utilisé notamment par [LER 96] et [Du 99], est illustré par (cf.fig.IV.5). Le bras droit porté à une température plus élevée que le bras gauche se dilate davantage, ce qui provoque une déformation latérale de toute la structure compliant.

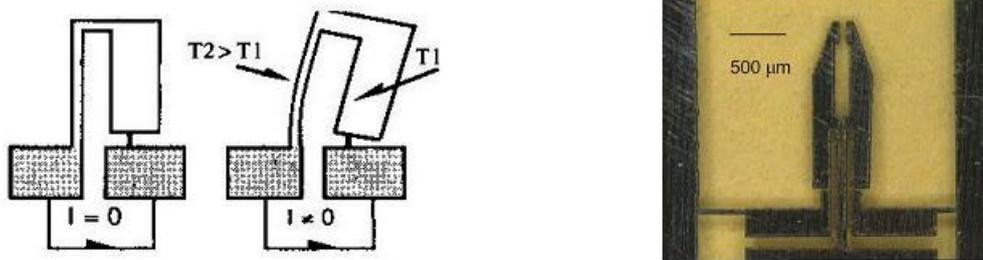


Figure IV.5 : principe de fonctionnement et prototype de micro-pince
([LER 96], EPFL, Lausanne, Suisse)

Dans le cadre de ce travail nous exprimons en fonction de nos efforts en développements, caractérisations et études par la méthode des éléments finis d'une nouvelle micro-pince à deux doigts de serrage par micro-pince à partir d'un matériau intelligent piézoélectrique.

IV.3 Micro-pinces piézoélectriques

La piézoélectricité est sans conteste l'un des modes d'actionnement les plus prisés dans le cadre de la réalisation de micro-pinces. La littérature abondante traitant de micro-pinces actionnées par un principe piézoélectrique en atteste. Ce relatif engouement pour ce mode d'actionnement n'est pas hasard. En effet, la piézoélectricité offre bon nombre d'avantage : une grande rapidité et une haute résolution font parties, la large disponibilité de matériaux piézoélectriques de synthèse ainsi que les progrès de la recherche concernant les techniques d'actionnement (par déformation linéaire, par interaction de contact...) favorisent l'exploitation de ces matériaux dans de nombreux domaines et en particulier la microrobotique. C'est pourquoi, les premières réalisations de micro-pinces utilisent la piézoélectricité. Très en avance au regard des besoins en micromanipulation, nous pouvons citer par exemple le brevet de [HEI 86] qui propose une structure à deux doigts de serrage composés de bilame en polymère piézoélectrique (cf.fig.IV.6).

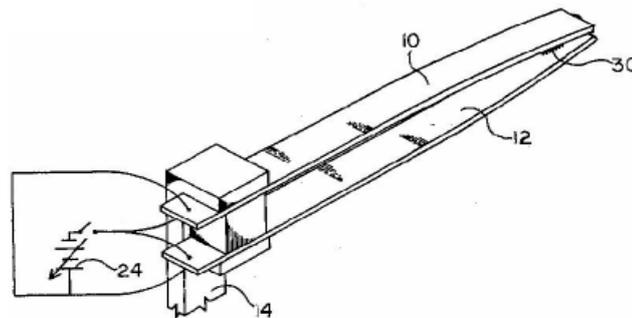


Figure IV.6 : bilame en polymère piézoélectrique

De nos jours, divers fabricants proposent des systèmes de micro positionnement disposant de bonnes caractéristiques (notamment une résolution submicrométrique). En revanche nous avons recensé déjà un grand nombre de prototypes issus de laboratoires mais nous constatons toujours un fort engouement de la communauté scientifique pour le domaine des micro-pinces. Un engouement justifié car le domaine de la micro préhension est loin d'être tari et les besoins sont grandissants. En effet, la micromanipulation, c'est à dire la manipulation d'objets de dimensions variant de $1\mu\text{m}$ à 1mm , et le micro-assemblage concernent de nombreux secteurs. Parmi ces domaines, nous pouvons citer :

- L'assemblage de pièces micromécaniques rigides comme par exemple des micro-roues dentées, des microlentilles optiques, des microcomposants pour la réalisation de circuits hybrides, etc...
- La manipulation d'éléments biologiques pour la médecine ou les biotechnologies, qui s'effectue souvent en milieu liquide et qui ne favorise pas la préhension, le micro-objet à manipuler ayant tendance à s'échapper dès que le micromanipulateur s'en approche ;
- Enfin, la chirurgie pour laquelle certaines interventions requièrent une précision que le bras humain ne peut atteindre. C'est le cas par exemple de la chirurgie ophtalmique et de la neurochirurgie. Par ailleurs, la chirurgie devient de moins en moins invasive, le praticien a besoin d'intervenir dans des endroits inaccessibles. Si ce confinement se cumule à des besoins tels que la précision dans le geste, voire de mouvements chirurgicaux infaisables avec la mobilité d'une main d'un homme, alors des outils spécifiques télé opérés sont dans ce cas nécessaires.

IV.3.1 Fonctionnalités d'un micro préhenseur

Un micro préhenseur regroupe un ensemble de fonctionnalités plus ou moins complexes, nous pouvons distinguer quatre blocs fonctionnels :

- Les modules fonctionnels, lesquels regroupent les actionneurs, les organes terminaux et les modules du type éjection ou aide à la dépose d'objets, etc...;
- Les capteurs : ils sont utiles à la mesure des interactions entre la micro-pince et les pièces à manipuler ainsi qu'entre la micro-pince et son environnement;
- Le traitement du signal : selon les capteurs et actionneurs embarqués, plusieurs composants peuvent être intégrés dans la micro-pince.
- Les modules auxiliaires : ce sont tous les modules qui ne sont pas directement liés à la fonction de préhension mais plutôt à des fins d'ajustement de la micro-pince par rapport à son système de maintien ou à la cible.

IV.3.2 Caractéristiques envisagées d'une micro-pince

Loin d'être un cahier des charges rigoureux, les caractéristiques énumérées dans cette section donnent un cadre qualitatif et quantitatif aux objectifs que nous aimerions atteindre. Ainsi, nous listons et chiffrons, dans la mesure du possible, les contraintes et les choix suivants :

- Les degrés de liberté : les réalisations existantes offrent souvent un seul et unique degré de liberté, à savoir l'ouverture/fermeture simultanée des deux doigts de serrage (cf.fig.IV.7, dessin de gauche).

Sur d'autres modèles, l'ouverture/fermeture de chacun des doigts peut être commandée indépendamment. Cette configuration est intéressante car elle permet de corriger localement un défaut de centrage de la pince par rapport à l'objet. Aussi, nous pensons aller encore plus loin dans les mobilités des doigts d'une pince. Il nous semble en effet intéressant de disposer également de mouvements indépendants de montée/descente des doigts. Utilisés conjointement, cela permettrait par exemple à la pince de réaliser une opération d'insertion (cf.fig.IV.7, dessin au centre). Commandés de manière antagoniste, il serait alors possible d'orienter un objet entre les mors de la pince (cf.fig.IV.7, dessin de droite) et, accessoirement, d'ajuster également un éventuel défaut d'alignement des doigts ;

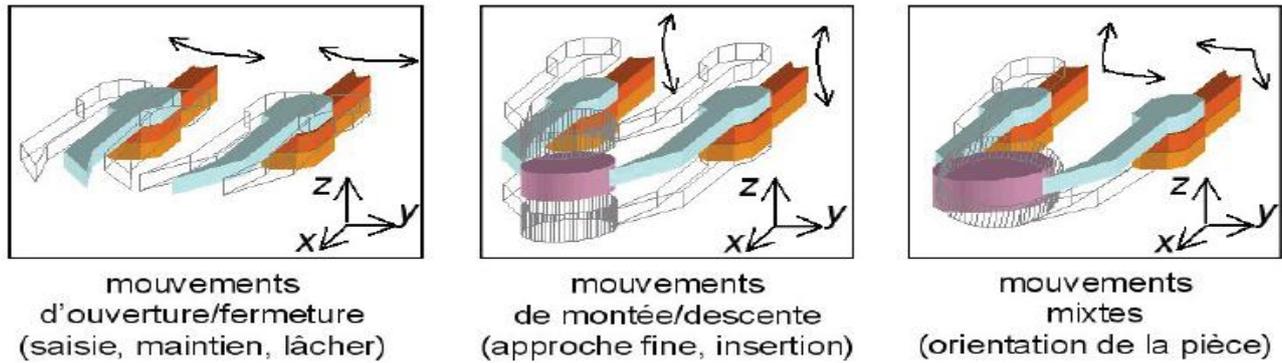


Figure IV.7 : Mobilités envisagées des doigts d'une micro-pince

- Les courses d'ouverture et de fermeture ainsi que de montée et de descente doivent par conséquent atteindre plusieurs centaines de micromètres ;
- Les forces : à ce stade de l'étude, elles sont difficiles à chiffrer tant les limites et les plages utiles sont différentes d'une application à une autre. Pour ne citer qu'un exemple, en médecine ou en biologie, certaines cellules vivantes ne supportent pas des forces supérieures à quelques dizaines de nano-Newton (Suzuki 1996, l'auteur chiffre la déformation d'un œuf de poisson de 100µm à 80% de sa taille initiale avec une force de 30 nN).
- La résolution : l'objectif de manipuler des objets de quelques dizaines de micromètres pour les plus petits d'entre eux nous conduit à une résolution de positionnement submicronique ;
- Les dimensions : ce critère n'est pas forcément une fin en soi. Nous nous efforcerons tout de même d'aboutir à une solution la plus compacte possible ;
- Les matériaux : l'environnement dans lequel les outils de micromanipulation sont utilisés est un critère important à prendre en considération [ZHO 01]. Il s'agit notamment d'environnements tels qu'une "salle blanche" ou de milieux plus confinés comme une chambre à vide d'un microscope électronique à balayage. Des précautions doivent alors être prises : par exemple, les matériaux utilisés ne doivent pas (ou peu) dégazer pour une utilisation dans une chambre à vide et ne doivent d'une manière générale émettre aucune particule solide.

IV.3.3 Quel principe d'actionnement ?

A ce stade, notre choix se réduit à deux principes électro-actifs : la piézoélectricité et l'électrostriction. Notre choix se tourne vers un principe d'actionnement piézoélectrique, qui est, non seulement rapide, mais dispose aussi d'une densité d'énergie mécanique appréciable (ce mode d'actionnement se classe sur ce plan juste après les principes thermiques) et supérieure aux actionneurs électrostrictifs. De plus, les matériaux piézoélectriques sont largement disponibles sur le marché et ont acquis une grande maturité industrielle. Enfin, le principe physique à l'origine de la piézoélectricité, la déformation des mailles cristallines, offre une résolution quasi infinie.

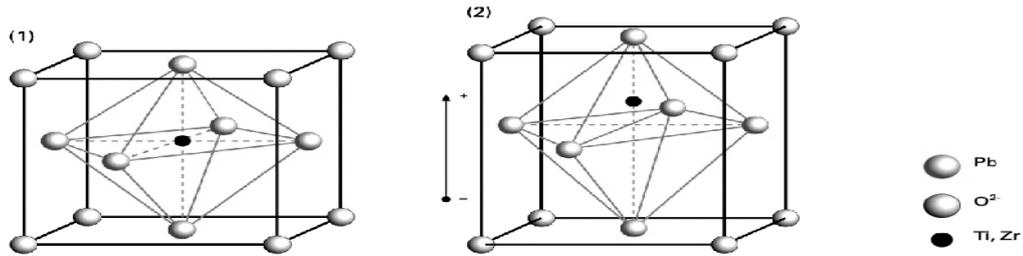


Figure IV.8 : Structure perovskite d'une céramique piézoélectrique

IV.4 Principe de fonctionnement d'une poutre bimorphe piézoélectrique

La figure IV.9 présente le principe de fonctionnement d'une poutre encastrée à sa base et libre à son extrémité (cette dernière correspond à la face visible sur la figure). Deux lames piézoélectriques (les flèches en gras représentent le vecteur de polarisation) sont solidaires l'une de l'autre ; quatre électrodes permettent d'appliquer des différences de potentiel différentes sur le dispositif (flèches en traits fins). L'interface entre les deux plaques est mise à la masse dans toutes les configurations de potentiels (cf.fig.IV.9). Nous adoptons les notations standards de la piézoélectricité (IEEE Standard of piezo-electricity) pour les axes du cristal piézoélectrique :

Le vecteur de polarisation définit l'axe 3 (ou z), les axes 1 (x) et 2 (y) formant avec un trièdre tri-rectangle. L'axe z est perpendiculaire à la face large de l'élément piézoélectrique et l'arête longue de la poutre définit l'axe x.

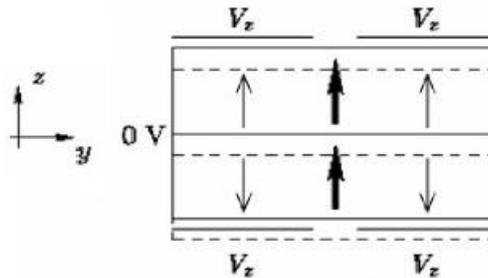


Figure IV.9 : Principe de fonctionnement d'une poutre piézoélectrique (bimorphe)

Sur cette figure, la structure au repos est présentée en traits pleins, la poutre déformée en traits pointillés. Dans notre situation (cf.fig.IV.9), les quatre électrodes sont portées à un potentiel V_z . La lame piézoélectrique supérieure s'allonge selon x proportionnellement à d_{31} tandis que la lame inférieure se contracte, ce qui provoque une flexion selon z;

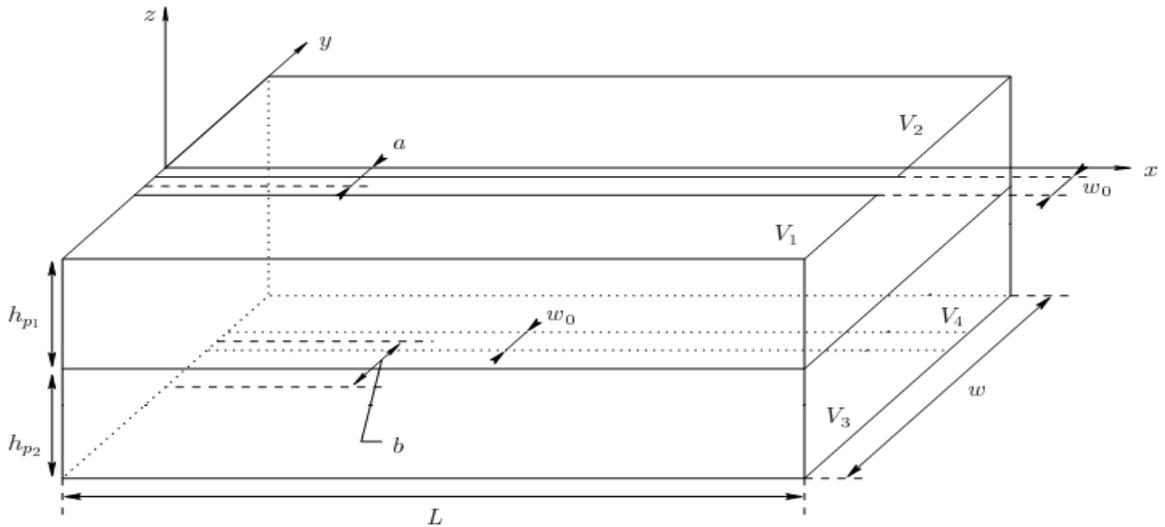


Figure IV.10 : Schéma d'une poutre piézoélectrique (bimorphe)

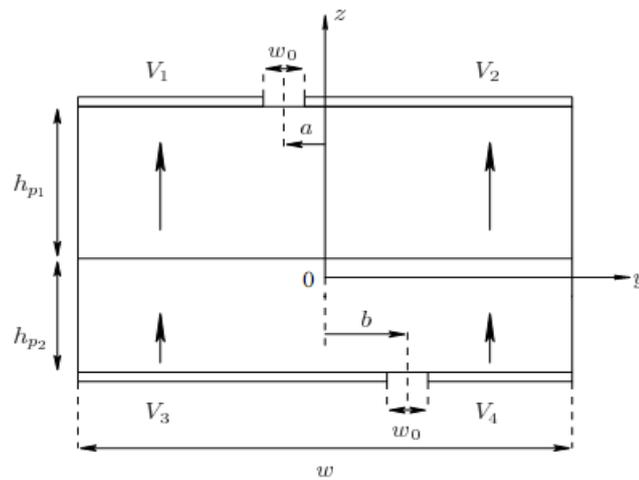


Figure IV.11 : La coupe transversale de la poutre bimorphe

IV.5 Modélisation statique d'une poutre bimorphe

Une vue en perspective du bimorphe est proposée à la figure IV.10, tandis que la figure IV.11 présente une coupe transversale. Les flèches représentent les directions de polarisation dans le matériau piézoélectrique. Pour le calcul du modèle du bimorphe, nous nous sommes placés dans un contexte dans lequel le système est constitué de deux couches de matériau piézoélectrique superposés qui peuvent être différentes l'une de l'autre. On peut référencier les deux types de matériau par p_1 et p_2 .

Les deux couches sont supposées présenter les mêmes longueurs L et largeurs w (cf.fig IV.10) leurs hauteurs sont respectivement h_{p1} , h_{p2} . Quatre électrodes conductrices sont déposées sur les faces piézoélectriques et s'étendent sur toute la longueur de la poutre, excepté sur une bande de largeur w_0 et de longueur L . Notons que l'épaisseur de ces électrodes, typiquement de 500 nm, est négligée dans le modèle proposé. Enfin, puisque les techniques de réalisation peuvent introduire des erreurs d'alignement entre les électrodes, nous considérons leurs défauts de centrage, notés a et b , respectivement pour les faces supérieure et inférieure. Ces défauts conditionnent en particulier le couplage entre les axes, c'est à dire le déplacement δ_z le long de l'axe z pour une tension V_y . La

Chapitre IV : Identification de la loi de comportement

résolution du problème est menée selon une approche similaire à celle utilisée en résistance des matériaux, à savoir :

- Le milieu est homogène et isotrope ;
- matériau est élastique linéairement (hypothèse des petites déformations) ;
- et en l'absence de sollicitations extérieures, il n'y a ni déformation, ni contrainte.

L'effet piézoélectrique, le long de l'axe $x \equiv 1$ provoqué par l'application de potentiels sur les électrodes, est régi par les équations suivantes :

$$\varepsilon_1 = s_{11}^E \sigma_1 + d_{31} E_3 \quad (\text{IV-3})$$

$$D_3 = d_{31} \sigma_1 + \varepsilon_{33}^\sigma E_3 \quad (\text{IV-4})$$

Où s_{11}^E , ε_{33}^σ et d_{31} représentent respectivement la souplesse à champ électrique constant, la permittivité électrique à contrainte constante, et la constante piézoélectrique. Dans un souci de lisibilité, nous adoptons dans la suite la notation s_{11} à la place de s_{11}^E . ε_{33} et σ_1^P représentent respectivement les déformations et les contraintes élastiques du matériau, D_3 est la composante selon l'axe 3 du champ de déplacement. En ce qui concerne les céramiques PZT, principalement utilisées dans les actionneurs que nous étudierons, les différentes matrices prennent les formes suivantes, lorsque la polarisation est dirigée selon z (axe 3) [SMI 91]:

$$\begin{pmatrix} \alpha_z \\ \delta_z \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} & e_{17} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} & e_{27} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} & e_{37} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_y \\ F_z \\ P_z \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} \quad (\text{IV-5})$$

Dans cette formulation, α est la pente de la poutre à son extrémité, δ la déflexion de l'extrémité de la poutre et v le volume déplacé (cf.fig.IV.10). Nous allons étudier le comportement de la poutre dans la direction z . Nous déterminons les différents coefficients e_{ij} de (IV.4) en considérant la structure comme une poutre encastée à l'une de ses extrémités et libre à l'autre et en lui appliquant différents types de sollicitations. Nous supposons que le principe de superposition peut s'appliquer et que la déformation de la poutre sous l'effet des différentes sollicitations est donc égale à la somme des déformations résultant de ces sollicitations considérées isolément.

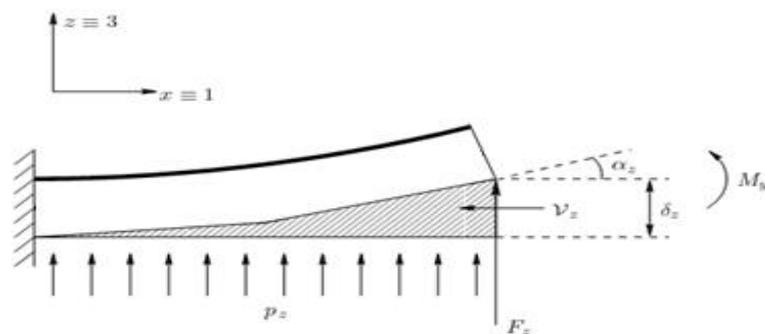


Figure IV.12 : Paramètres externes M_z , F_z , p_z , et paramètres internes α_z , δ_z et v_z (Selon l'axe z)

Ainsi, nous pouvons décomposer l'étude des déformations selon l'axe z. Les cas de charge considérés dans les sous titres suivants :

IV.5.1 Poutre soumise à un moment extérieur

Un moment M est appliqué à la poutre. Les coefficients e_{i1} , avec $i = 1... 3$, seront déterminés à l'aide de ce cas de charge. La déformation a donc lieu selon l'axe perpendiculaire à celui du moment de flexion appliqué.

Une difficulté survient du fait de la dissymétrie de la géométrie. Si on place l'origine du repère au milieu des deux couches de matériau, la coordonnée du centroïde est donnée par :

$$\left(\frac{A_{p1}}{s_{11}^{p1}} + \frac{A_{p2}}{s_{11}^{p2}} \right) \bar{z} = \frac{A_{p1}}{s_{11}^{p1}} \bar{z}_{p1} + \frac{A_{p2}}{s_{11}^{p2}} \bar{z}_{p2} \tag{IV-6}$$

Avec A_{p1} et A_{p2} les ordonnées des centres de gravité des deux couches. \bar{z} Devient:

$$\bar{z} = \frac{1}{2} \frac{\frac{h_{p1}}{s_{11}^{p1}} h_{p1} - \frac{h_{p2}}{s_{11}^{p2}} h_{p2}}{\frac{h_{p1}}{s_{11}^{p1}} + \frac{h_{p2}}{s_{11}^{p2}}} \tag{IV-7}$$

Si on déforme la structure en flexion pure par l'application d'un moment M_y , l'équilibre des moments selon y s'exprime par l'équation :

$$\iint \sigma_1(x, y, z) dA + M_y = 0 \tag{IV-8}$$

La déformation relative de la poutre due à l'élasticité est donnée par :

$$\epsilon_1 = \frac{z}{\rho_z} \tag{IV-9}$$

Où z est la distance à la fibre neutre. Les équations (IV.1) et (IV.8) donnent :

$$\int_{-h_{p2}}^0 -\frac{1}{\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p2}} z^2 dz + \int_0^{h_{p1}} -\frac{1}{\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p1}} z^2 dz + M_y = 0 \tag{IV-10}$$

Ceci donne :

$$-\frac{1}{3\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p2}} h_{p2}^3 - \frac{1}{3\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p1}} h_{p1}^3 + M_y = 0 \tag{IV-11}$$

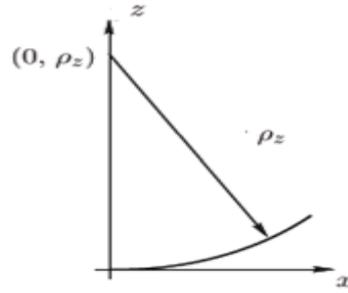


Figure IV.13 : Déformation de la poutre selon un cercle

On simplifiant on obtient :

$$-\frac{w}{3\rho_z} \left(\frac{h_{p_2}^3}{s_{11}^{p_2}} + \frac{h_{p_1}^3}{s_{11}^{p_1}} \right) + M_y = 0 \quad (\text{IV-12})$$

Posons :

$$B_1 = \left(\frac{h_{p_2}^3}{s_{11}^{p_2}} + \frac{h_{p_1}^3}{s_{11}^{p_1}} \right) \quad (\text{IV-13})$$

On obtient alors :

$$\frac{1}{\rho_z} = \frac{3M_y}{w B_1} \quad (\text{IV-14})$$

La déformation supposée circulaire de la poutre répond à l'équation (cf.fig.IV.13).

$$x^2 + (z - \rho_z)^2 = \rho_z^2 \Leftrightarrow 2\rho_z z = x^2 + z^2$$

Si cette déformation est suffisamment faible, on a :

$$z \approx \frac{x^2}{2\rho_z} \quad (\text{IV-15})$$

On peut donc approcher le déplacement δ_z de l'extrémité de la poutre par :

$$\delta_z \approx \frac{L^2}{2\rho_z} \quad (\text{IV-16})$$

De plus, la pente à une abscisse x de la poutre vaut en première approximation :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{x}{\rho_z} \quad (\text{IV-17})$$

Et la pente en bout de poutre α_z s'exprime donc :

$$\alpha_z = \frac{L}{\rho_z} \quad (\text{IV-18})$$

Enfin, le volume de matière déplacée se calcule en intégrant (IV.15) sur toute la surface de la poutre perpendiculaire à la déformation :

$$v_z = w \int_0^L \frac{x^2}{2\rho_z} dx = w \frac{L^3}{6\rho_z} \quad (\text{IV-19})$$

On obtient donc en utilisant (IV.18) :

$$\alpha_z = \frac{3LM_y}{wB_1} \quad (\text{IV-20})$$

Et donc :

$$e_{11} = \frac{3L}{wB_1} \quad (\text{IV-21})$$

De (IV.16), il vient :

$$\delta_z = \frac{3L^2 M_y}{2wB_1} \quad (\text{IV-22})$$

Et donc :

$$e_{21} = \frac{3L^2}{2wB_1} \quad (\text{IV-23})$$

Enfin (IV.19) donne :

$$v_z = \frac{3L^3 M_y}{6B_1} \quad (\text{IV-24})$$

Qui donne :

$$e_{31} = \frac{3L^3}{6B_1} \quad (\text{IV-25})$$

IV.5.2 Poutre soumise à une force extérieure

Une force F est appliquée à l'extrémité libre de la poutre, perpendiculairement à l'une de ses faces latérales. Ce cas de charge permet de déterminer les coefficients e_{i2} , avec $i = 1.. 3$. Si on applique une force F_z en bout de poutre, le moment fléchissant à une abscisse x , noté $M_{fz}(x)$ est :

$$M_{f_z}(x) = F_z(L - x) \quad (\text{IV-26})$$

La déformation selon z , $z(x)$, d'un point de la poutre obéit à l'équation :

$$\frac{d^2 z(x)}{dx^2} = \frac{M_{f_z}}{\iint s_{11}^{-1}(x, y, z) z^2 dA} \quad (\text{IV-27})$$

Comme :

$$\iint s_{11}^{-1}(x, y, z) z^2 dA = \int_{-h_{p2}}^0 \frac{w}{s_{11}^{p2}} z^2 dz + \int_0^{h_{p1}} \frac{w}{s_{11}^{p1}} z^2 dz = \frac{w}{3} \left(\frac{h_{p2}^3}{s_{11}^{p2}} + \frac{h_{p1}^3}{s_{11}^{p1}} \right) = \frac{w B_1}{3}$$

L'équation (IV.27) devient : (IV-28)

$$\frac{d^2 z(x)}{dx^2} = \frac{3F_z(L-x)}{w B_1} \quad (IV-29)$$

Car $\left. \frac{dz(x)}{dx} \right|_0 = 0$

$$\frac{dz(x)}{dx} = \frac{3F_z(2Lx - x^2)}{2w B_1} \quad (IV-30)$$

On obtient ainsi :

$$\alpha_z = \frac{dz(x)}{dx}(L) = \frac{3L^2 F_z}{2w B_1} \quad (IV-31)$$

Et donc :

$$e_{12} = \frac{3L^2}{2w B_1} \quad (IV-32)$$

Comme $z(0)=0$, la solution de (IV.29) est :

$$z(x) = \frac{F_z}{2w B_1} (3Lx^2 - x^3) \quad (IV-33)$$

Et :

$$\delta_z = z(L) = \frac{L^3 F_z}{w B_1} \quad (IV-34)$$

Qui donne :

$$e_{22} = \frac{L^3}{w B_1} \quad (IV-35)$$

Enfin, le volume de matière déplacée est donné par :

$$v_z = w \int_0^L z(x) dx = \frac{3L^4 F_z}{8B_1} \quad (IV-36)$$

Qui donne :

$$e_{32} = \frac{3L^4}{8B_1} \quad (\text{IV-37})$$

IV.5.3 Poutre soumise à une charge uniforme

Une densité de force uniforme p est appliquée perpendiculairement à l'une des faces latérales de la poutre. Ce cas de charge permet de déterminer les coefficients e_{i3} , avec $i = 1 \dots 3$.

Si on soumet la poutre à une pression uniformément distribuée, p_z , le moment fléchissant à une abscisse x , noté $M_{p_z}(x)$ est :

$$M_{p_z}(x) = \frac{P_z}{2} w(L-x)^2 \quad (\text{IV-38})$$

L'équation (IV.27) devient alors :

$$\frac{d^2 z(x)}{dx^2} = \frac{3P_z(L-x)^2}{2B_1} \quad (\text{IV-39})$$

Comme $\left. \frac{dz}{dx} \right|_0 = 0$ on a :

$$\frac{dz(x)}{dx} = \frac{P_z(3L^2x + x^3 - 3Lx^2)}{2B_1} \quad (\text{IV-40})$$

Qui conduit à :

$$\alpha_z = \frac{dz}{dx}(L) = \frac{L^3 P_z}{2B_1} \quad (\text{IV-41})$$

Et donc :

$$e_{13} = \frac{L^3}{2B_1} \quad (\text{IV-42})$$

Sachant de plus que $z(0) = 0$, la solution de (IV.41) est :

$$z(x) = \frac{P_z(6L^2x^2 + x^4 - 4Lx^3)}{8B_1} \quad (\text{IV-43})$$

On a donc :

$$\delta_z(x) = z(L) = \frac{3L^4 p_z}{8B_1} \quad (\text{IV-44})$$

Et :

$$e_{23} = \frac{3L^4}{8B_1} \quad (\text{IV-45})$$

Le volume de la matière déplacée est donné par :

$$v_z = w \int_0^L z(x) dx = \frac{3L^5 w p_z}{20B_1} \quad (\text{IV-46})$$

Et :

$$e_{33} = \frac{3L^5 w}{20B_1} \quad (\text{IV-47})$$

IV.5.4 Poutre soumise à une différence de potentiel

Les quatre électrodes sont portées à des potentiels V_1, V_2, V_3, V_4 . Ce cas de charge nous permettra de calculer les coefficients $e_{i4}, e_{i5}, e_{i6}, e_{i7}$, avec $i = 1... 3$. La composante (z) du champ électrique sous les électrodes peut s'écrire :

$$E_3 = \begin{cases} -\frac{V_1}{h_{p_1}} & \text{si } -\frac{w}{2} \leq y \leq a - \frac{w_0}{2} \text{ et } 0 \leq z \leq h_{p_1} \\ 0 & \text{si } a - \frac{w_0}{2} < y < a + \frac{w_0}{2} \text{ et } 0 \leq z \leq h_{p_1} \\ -\frac{V_2}{h_{p_1}} & \text{si } a + \frac{w_0}{2} \leq y \leq \frac{w}{2} \text{ et } 0 \leq z \leq h_{p_1} \\ -\frac{V_3}{h_{p_2}} & \text{si } -\frac{w}{2} \leq y \leq b - \frac{w_0}{2} \text{ et } -h_{p_2} \leq z \leq 0 \\ 0 & \text{si } b - \frac{w_0}{2} \leq y \leq b + \frac{w_0}{2} \text{ et } -h_{p_2} \leq z \leq 0 \\ \frac{V_4}{h_{p_2}} & \text{si } b + \frac{w_0}{2} \leq y \leq \frac{w}{2} \text{ et } -h_{p_2} \leq z \leq 0 \end{cases} \quad (\text{IV-48})$$

L'équation (IV.8) s'écrit en considérant un moment M_y nul et en tenant compte de (IV.1),(IV.9) et (IV.48):

$$\underbrace{\int_{-h_{p_2}}^0 -\frac{1}{\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p_2}} z^2 dz + \int_0^{h_{p_1}} -\frac{1}{\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p_1}} z^2 dz}_{\text{Terme élastique}}$$

$$+ \underbrace{\int_0^{h_{p1}} \frac{V_1}{s_{11}^{p1} h_{p1}} d_{31_1} \left(\frac{w}{2} + a - \frac{w_0}{2} \right) z dz + \int_0^{h_{p1}} \frac{V_2}{s_{11}^{p1} h_{p1}} d_{31_1} \left(\frac{w}{2} - a - \frac{w_0}{2} \right) z dz}_{\text{Terme piézoélectrique face supérieure}} \quad (\text{IV-49})$$

$$- \underbrace{\int_{-h_{p2}}^0 \frac{V_3}{s_{11}^{p2} h_{p2}} d_{31_2} \left(\frac{w}{2} + b - \frac{w_0}{2} \right) z dz - \int_{-h_{p2}}^0 \frac{V_4}{s_{11}^{p2} h_{p2}} d_{31_2} \left(\frac{w}{2} - b - \frac{w_0}{2} \right) z dz}_{\text{Terme piézoélectrique face inférieure}} = 0$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{3\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p2}} h_{p2}^3 - \frac{1}{3\rho_z} \frac{w}{s_{11}^{p1}} h_{p1}^3 + \frac{d_{31_1}}{2s_{11}^{p1}} h_{p1} \left\{ \left(\frac{w}{2} + a - \frac{w_0}{2} \right) V_1 + \left(\frac{w}{2} - a - \frac{w_0}{2} \right) V_2 \right\} \\ & - \frac{d_{31_2}}{2s_{11}^{p2}} h_{p2} \left\{ \left(\frac{w}{2} + b - \frac{w_0}{2} \right) V_3 + \left(\frac{w}{2} - b - \frac{w_0}{2} \right) V_4 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{IV-50})$$

L'expression se simplifie en :

$$\begin{aligned} & - \frac{w}{3\rho_z} \left(\frac{h_{p2}^3}{s_{11}^{p2}} + \frac{h_{p1}^3}{s_{11}^{p1}} \right) + \frac{d_{31_1}}{4s_{11}^{p1}} h_{p1} \left\{ (w + 2a - w_0) V_1 + (w - 2a - w_0) V_2 \right\} \\ & - \frac{d_{31_2}}{4s_{11}^{p2}} h_{p2} \left\{ (w + 2b - w_0) V_3 + (w - 2b - w_0) V_4 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{IV-51})$$

On obtient ainsi :

$$\begin{aligned} & - \frac{w}{3\rho_z} B_1 + \frac{d_{31_1}}{4s_{11}^{p1}} h_{p1} \left\{ (w + 2a - w_0) V_1 + (w - 2a - w_0) V_2 \right\} \\ & - \frac{d_{31_2}}{4s_{11}^{p2}} h_{p2} \left\{ (w + 2b - w_0) V_3 + (w - 2b - w_0) V_4 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{IV-52})$$

En utilisant (IV.17) il vient :

$$\begin{aligned} \delta_z &= \frac{3}{8} \frac{d_{31_1} L^2 h_{p1} \left\{ (w - w_0 + 2a) V_1 + (w - w_0 - 2a) V_2 \right\}}{s_{11}^{p1} w B_1} \\ &+ \frac{3}{8} \frac{d_{31_2} L^2 h_{p2} \left\{ (w - w_0 + 2b) V_3 + (w - w_0 - 2b) V_4 \right\}}{s_{11}^{p2} w B_1} \end{aligned} \quad (\text{IV-53})$$

Et ainsi :

$$e_{24} = \frac{3 d_{31_1} L^2 h_{p_1} (w - w_0 + 2a)}{8 s_{11}^{p_1} w B_1} \quad (\text{IV-54})$$

$$e_{25} = \frac{3 d_{31_1} L^2 h_{p_1} (w - w_0 - 2a)}{8 s_{11}^{p_1} w B_1} \quad (\text{IV-55})$$

$$e_{26} = \frac{3 d_{31_2} L^2 h_{p_2} (w - w_0 + 2b)}{8 s_{11}^{p_2} w B_1} \quad (\text{IV-56})$$

$$e_{27} = \frac{3 d_{31_2} L^2 h_{p_2} (w - w_0 - 2b)}{8 s_{11}^{p_2} w B_1} \quad (\text{IV-57})$$

D'autre part en utilisant (IV.18),(IV.52), on obtient :

$$\alpha_z = \frac{3 d_{31_1} L h_{p_1} \{(w - w_0 + 2a) V_1 + (w - w_0 - 2a) V_2\}}{4 s_{11}^{p_1} w B_1} \quad (\text{IV-58})$$

$$+ \frac{3 d_{31_2} L h_{p_2} \{(w - w_0 + 2b) V_3 + (w - w_0 - 2b) V_4\}}{4 s_{11}^{p_2} w B_1}$$

Qui conduit a :

$$e_{14} = \frac{3 d_{31_1} L h_{p_1} (w - w_0 + 2a)}{4 s_{11}^{p_1} w B_1} \quad (\text{IV-59})$$

$$e_{15} = \frac{3 d_{31_1} L h_{p_1} (w - w_0 - 2a)}{4 s_{11}^{p_1} w B_1} \quad (\text{IV-60})$$

$$e_{16} = \frac{3 d_{31_2} L h_{p_2} (w - w_0 + 2b)}{4 s_{11}^{p_2} w B_1} \quad (\text{IV-61})$$

$$e_{17} = \frac{3 d_{31_2} L h_{p_2} (w - w_0 - 2b)}{4 s_{11}^{p_2} w B_1} \quad (\text{IV-62})$$

Le volume de matière déplacée est obtenu par (IV.19):

$$V_z = \frac{1 d_{31_1} L^3 h_{p_1} \{(w - w_0 + 2a) V_1 + (w - w_0 - 2a) V_2\}}{4 s_{11}^{p_1} B_1} \quad (\text{IV-63})$$

$$+ \frac{1 d_{31_2} L^3 h_{p_2} \{(w - w_0 + 2b) V_3 + (w - w_0 - 2b) V_4\}}{4 s_{11}^{p_2} B_1}$$

Et donc :

$$e_{34} = \frac{1}{4} \frac{d_{31_1} L^3 h_{p_1} (w - w_0 + 2a)}{s_{11}^{p_1} B_1} \quad (\text{IV-64})$$

$$e_{35} = \frac{1}{4} \frac{d_{31_1} L^3 h_{p_1} (w - w_0 - 2a)}{s_{11}^{p_1} B_1} \quad (\text{IV-65})$$

$$e_{36} = \frac{1}{4} \frac{d_{31_2} L^3 h_{p_2} (w - w_0 + 2b)}{s_{11}^{p_2} B_1} \quad (\text{IV-66})$$

$$e_{37} = \frac{1}{4} \frac{d_{31_2} L^3 h_{p_2} (w - w_0 - 2b)}{s_{11}^{p_2} B_1} \quad (\text{IV-67})$$

IV.6 Performances théoriques d'une poutre piézoélectrique

Sur la base du modèle présenté à la section précédente, il nous semble utile à ce stade de l'étude d'estimer les performances attendues d'un tel actionneur. Pour cela, nous considérons une poutre composée de deux lames piézoélectriques identique ($h_{p1}=h_{p2}=h_p$).

Les caractéristiques physiques et géométriques de l'actionneur sont consignées dans le tableau IV.1. Les propriétés physiques des matériaux correspondent à des caractéristiques de produits commerciaux : pour les lames piézoélectriques, nous choisissons le "PIC151".

Afin de valider le modèle analytique, nous avons procédé à des simulations de type éléments finis à l'aide du logiciel Atila®, développé par l'ISEN5 à Lille et distribué par Cedrat à Grenoble.

La figure IV.14 montre un exemple de simulation d'une micro-pince monolithique pour laquelle les doigts sont dans une situation complètement ouverte et totalement fermée. La déflexion d'un doigt de cette micro-pince correspond à la déflexion de notre poutre bimorphe avec un seul degré de liberté, d'après cet exemple on a les mêmes condition aux limite ainsi que les caractéristiques et les propriétés physiques de matériau Aussi, les courbes présentées dans la suite contiennent un tracé correspondant au modèle analytique et des symboles (\diamond, o , etc.) représentant les résultats de simulation par éléments finis. La modélisation d'une poutre cantilever moyennant la substitution des potentiels V_1, V_2, V_3, V_4 , par les deux variables de commande des axes de la poutre V_y et V_z de tel sorte que :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_z + V_y & V_2 &= V_z - V_y \\ V_3 &= V_z - V_y & V_4 &= V_z + V_y \end{aligned} \quad (\text{IV-68})$$

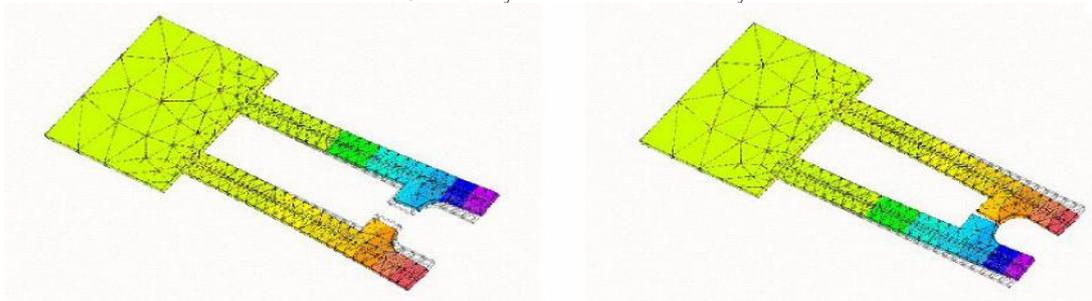


Figure IV.14 : Exemple de simulation par éléments finis d'une micro-pince (Ouverture et fermeture symétriques des doigts)

IV.6.1 Déflexions

Les performances qui caractérisent un tel actionneur sont les déflexions libres à l'extrémité de la poutre, c'est à dire dans notre cas la déflexion suivant z est δ_z . Pour commencer, nous supposons également qu'il n'y a aucune erreur de centrage, soit $a = b = 0$ l'influence de a et b est étudiée à la section suivante. On obtient alors, pour un degré de liberté en z, l'équation suivante :

$$\delta_z = \frac{3d_{31}L^2(w-w_0)}{4wh_p^2}V_z \tag{IV-69}$$

Table IV.1 : Caractéristiques types d'un bimorphe

Paramètres	Symboles	valeurs	Unités
Propriétés physiques des matériaux :			
Souplesse du PZT	s_{11}^p	15×10^{-12}	m^2/N
Coefficient piézoélectrique	d_{31}	-210×10^{-12}	m/V
Caractéristiques géométriques de l'actionneur :			
Epaisseur d'une lame de PZT	h	200	μm
Longueur de la poutre	L	10	mm
Largeur de la poutre	w	1	mm
Gap sans électrode	W_0	30	μm

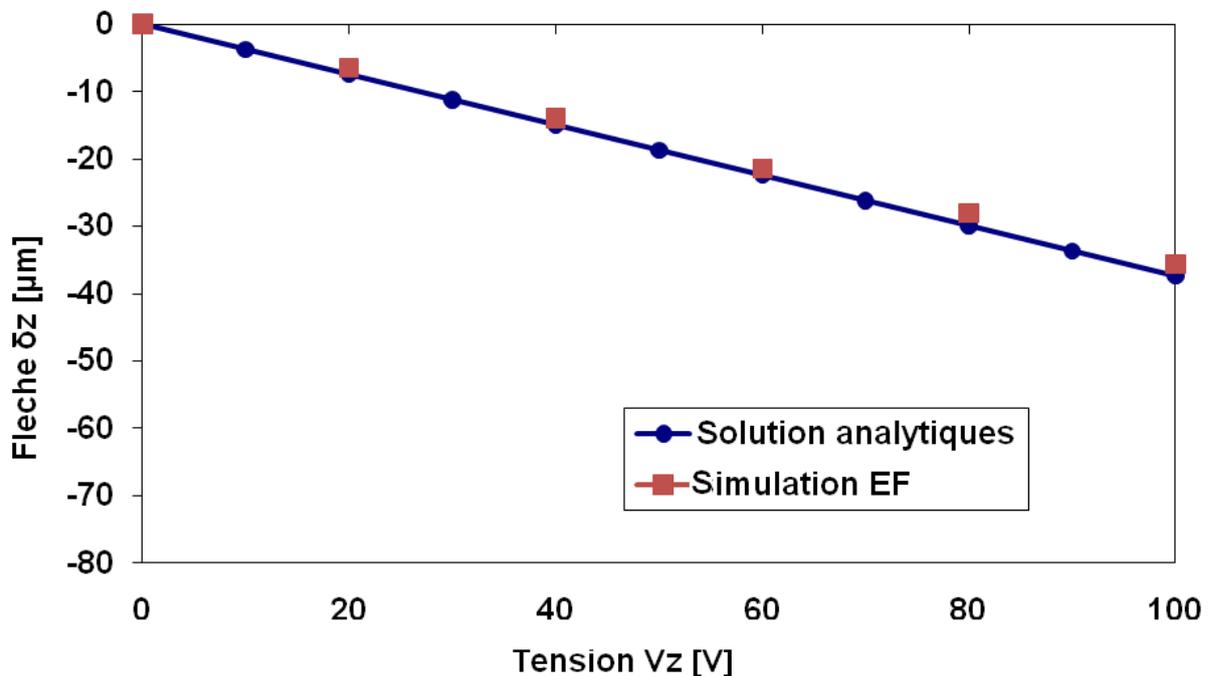


Figure IV.15 : Déflexions libres δ_z de la poutre piézoélectrique en fonction de la tension de commande V_z

Comme il est illustré dans la figure IV.15, la solution analytique en termes d'évolution de la déflexion en fonction de la tension est conforme avec la simulation numérique réalisée avec le

matériau piézoélectrique (PZT) cité ci-dessous. La courbe numérique étant quasiment équivalente à l'analytique.

IV.6.2 Influence des erreurs de centrage des électrodes a et b sur le couplage

Il est légitime, voire indispensable, de se préoccuper du couplage entre ceux-ci. Le terme de couplage dans les équations comportementales du bimorphe est lié aux deux facteurs C1 et C2 suivants.

$$C_1 = \frac{d_{31_1}}{s_{11}^{p_1}} a - \frac{d_{32_1}}{s_{11}^{p_2}} b \tag{IV-70}$$

$$C_2 = \frac{d_{31_1}}{s_{11}^{p_1}} H_1 a - \frac{d_{32_1}}{s_{11}^{p_2}} H_2 b \tag{IV-71}$$

Il faut ici considérer les deux cas de figure suivants :

- 1- Le cas le plus simple : si a = b = 0, on obtient C1 = C2 = 0 et le découplage est réalisé.
- 2- Dans toute autre situation, nous devons nous intéresser aux conditions suivantes :

$$C_1 = 0 \Rightarrow \frac{d_{31_1}}{s_{11}^{p_1}} a = \frac{d_{32_2}}{s_{11}^{p_2}} b \tag{IV-72}$$

$$C_2 = 0 \Rightarrow H_1 = H_2 \tag{IV-73}$$

On a donc découplage si :

$$\frac{d_{31_1}}{s_{11}^{p_1}} a = \frac{d_{32_2}}{s_{11}^{p_2}} b \text{ et } 4\bar{z} = h_{p_1} - h_{p_2} \Rightarrow \tag{IV-74}$$

$$(h_{p_1} - h_{p_2}) \left(\frac{h_{p_1}}{s_{11}^{p_1}} + \frac{h_{p_2}}{s_{11}^{p_2}} \right) = 2 \frac{h_{p_1}^2}{s_{11}^{p_1}} - 2 \frac{h_{p_2}^2}{s_{11}^{p_2}} \tag{IV-75}$$

Dans le cas particulier où $s_{11}^{p_1} = s_{11}^{p_2} = s_{11}^p$, la relation IV.75 se simplifie par

$$(h_{p_1} - h_{p_2}) \left(\frac{h_{p_1} + h_{p_2}}{s_{11}^p} \right) = 2 \frac{h_{p_1}^2 - h_{p_2}^2}{s_{11}^p} \tag{IV-76}$$

On voit donc que si $h_{p_1}=h_{p_2}$ le découplage est réalisé si :

$$\frac{d_{31_1}}{s_{11}^{p_1}} a = \frac{d_{32_2}}{s_{11}^{p_2}} b$$

Ceci nous amène à la conclusion importante que si les deux plaques piézoélectriques qui constituent la poutre sont identiques (ce qui est notre situation), le découplage est réalisé si l'erreur de centrage des électrodes est la même sur les deux faces du bimorphe, soit a = b.

Qui explique l'équation (IV.53) :

$$\delta_z = \frac{3}{2} \frac{d_{31} L^2 h_p}{s_{11}^p w B_1} (w - w_0) V_z \quad (\text{IV-77})$$

Pour a=-b l'équation devienne :

$$\delta_z = \frac{3}{2} \frac{d_{31} L^2 h_p}{s_{11}^p w B_1} [(w - w_0) V_z - 2b V_y] \quad (\text{IV-78})$$

De plus, il est possible de tracer sur un même graphique les courbes de la déflexion de la poutre bimorphe obtenues pour différentes valeurs des erreurs a et b. La superposition de ces courbes permet de quantifier la valeur de la déflexion au bout du cantilever. Il a été constaté que cette déflexion est directement proportionnelle à la valeur du champ électrique V_y en fixant la tension $V_z=100V$ (cf.fig.IV.16).

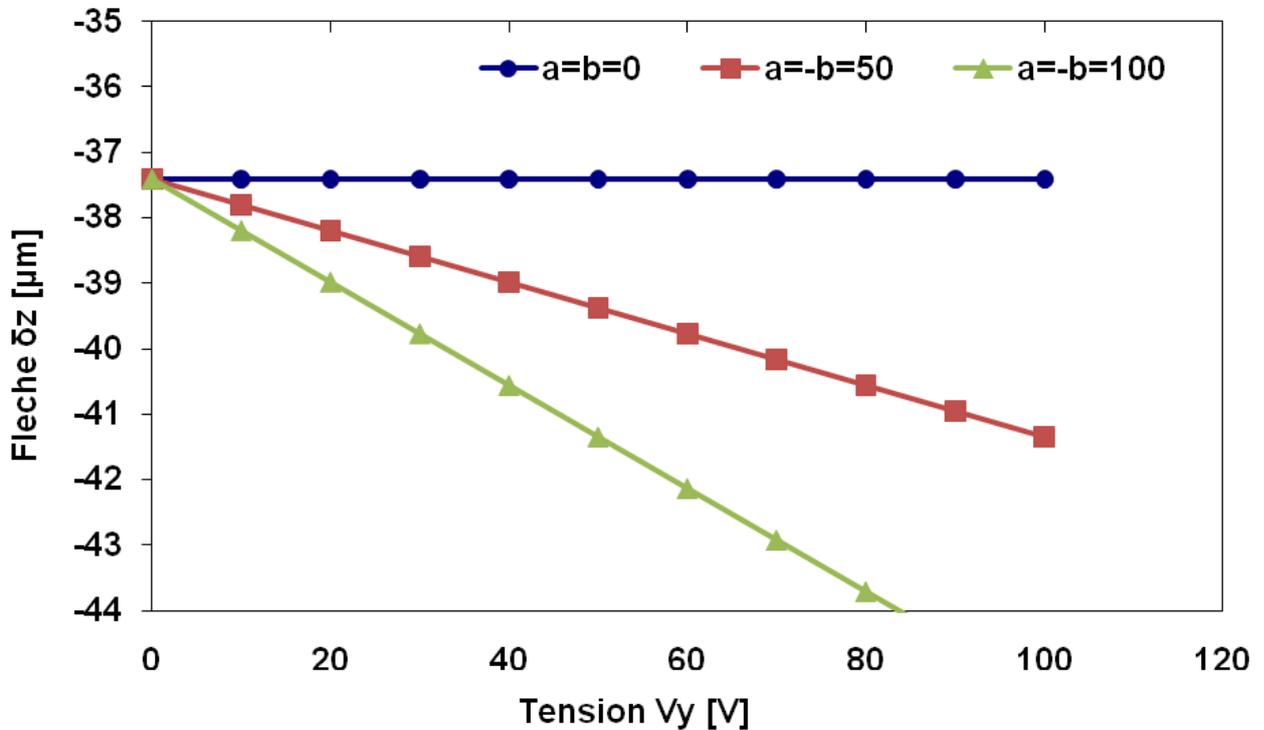


Figure V.16 : Déflexions δ_z en fonction de V_y pour plusieurs erreurs de centrage tel que $a=-b$ et $V_z=100V$

Dans ce cas on remarque que pour a=b=0 on a une stabilisation de la déflexion pour n'importe quelle valeur de la tension V_y par contre pour $V_y=100V$ on obtient les mêmes résultats sans tenu en compte les valeurs des erreurs a et b (cf.fig.IV.17). Cependant, les valeurs de a et b dépendent avant tout des moyens techniques de réalisation mis en œuvre pour l'élaboration de ces actionneurs. D'un point de vue technologique, il est difficile de satisfaire strictement la condition $a = b = 0$, ni même $a = b$. Essayons maintenant de fixer les deux tensions et on trace les déflexions en fonction des erreurs de centrage des électrodes a et b sur le couplage dans le cas de a=-b

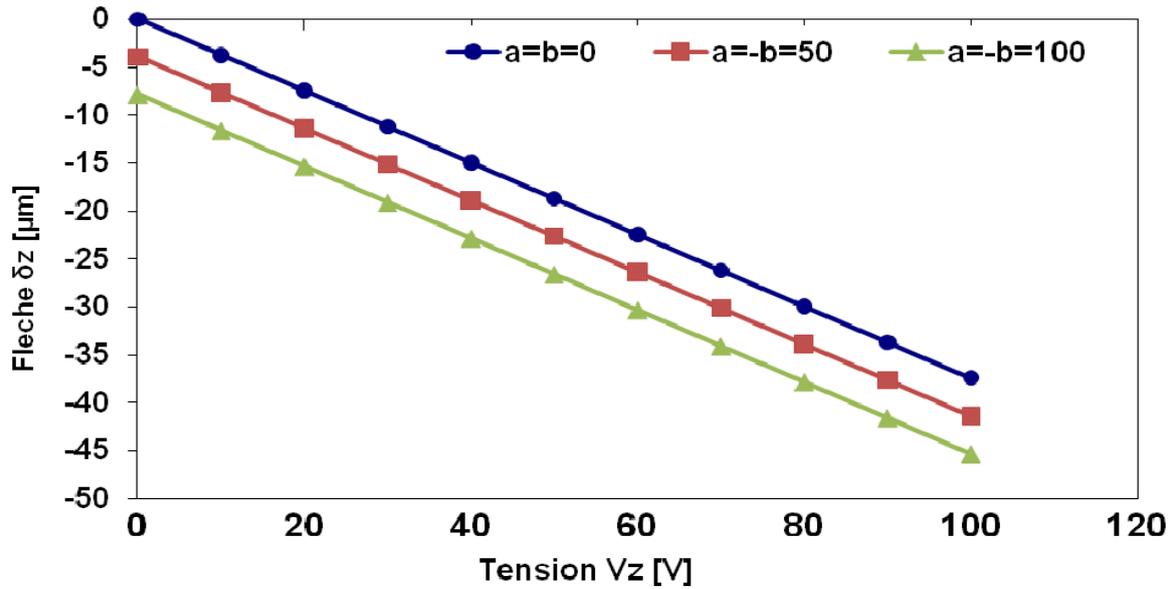


Figure IV.17 : Déflexions δ_z en fonction de V_z pour plusieurs erreurs de centrage tel que $a=-b$ et $V_y = 100\text{V}$

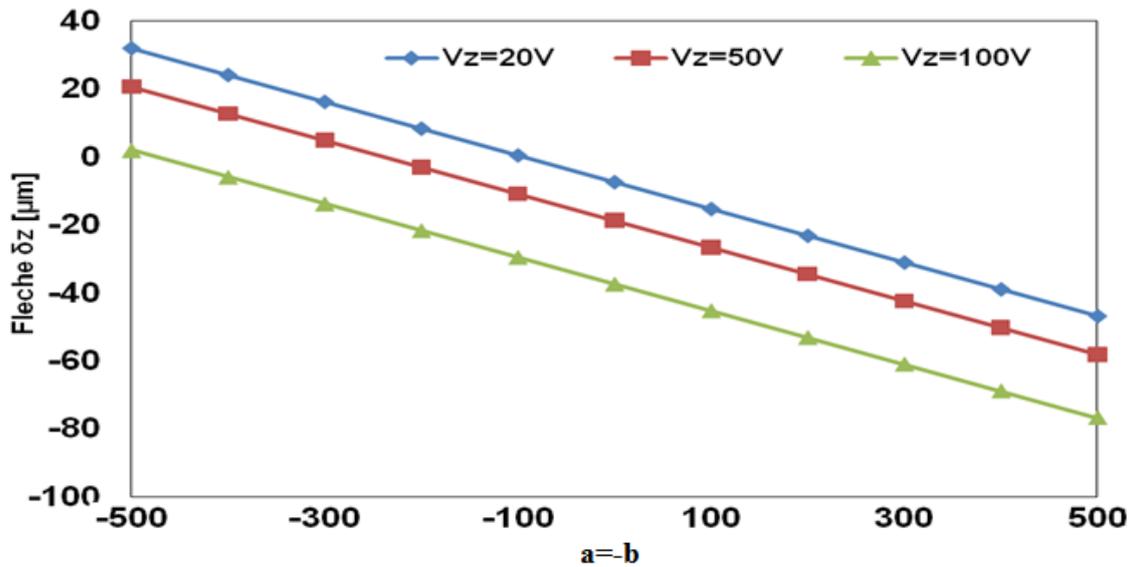


Figure IV.18 : Déflexions δ_z en fonction de V_z pour plusieurs erreurs de centrage tel que $a=-b$ et $V_y = 100\text{V}$

La figure IV.18 présente la déflexion δ_z en fonction de $a=-b$, pour $V_y = 100\text{V}$ et pour plusieurs valeurs de V_z . Dans ces conditions, nous observons non seulement une baisse de la déflexion lorsque $a = b$ croît mais également un couplage de V_z sur δ_z .

IV.6.3 Influence du gap sans électrode w_0 sur la déflexion δ_z

Dans le cas d'un bimorphe, il existe une bande étroite de largeur w_0 au centre de la poutre dépourvue d'électrode (ou légèrement décalée du centre des valeurs a et b , (cf.fig.IV.11)). Cet intervalle est utile non seulement pour appliquer des potentiels différents sur la droite et la gauche de la poutre mais un intervalle minimum est aussi nécessaire pour éviter les champs de claquage

Chapitre IV : Identification de la loi de comportement

dans l'air. La courbe de Paschen (cf.fig.IV.19) donne la valeur de la tension disruptive en fonction du produit pression-distance pour une température de 20°C.

Dans l'air, à pression atmosphérique normal d'environ 1000mBar, nous devons respecter une différence de potentiel de l'ordre de 350V pour une distance d'une dizaine de micromètres. En pratique, les électrodes, soumises à des tensions jusqu'à ±150V soit une différence de potentiel maximale de 300V, doivent par conséquent respecter une distance minimale de 9µm.

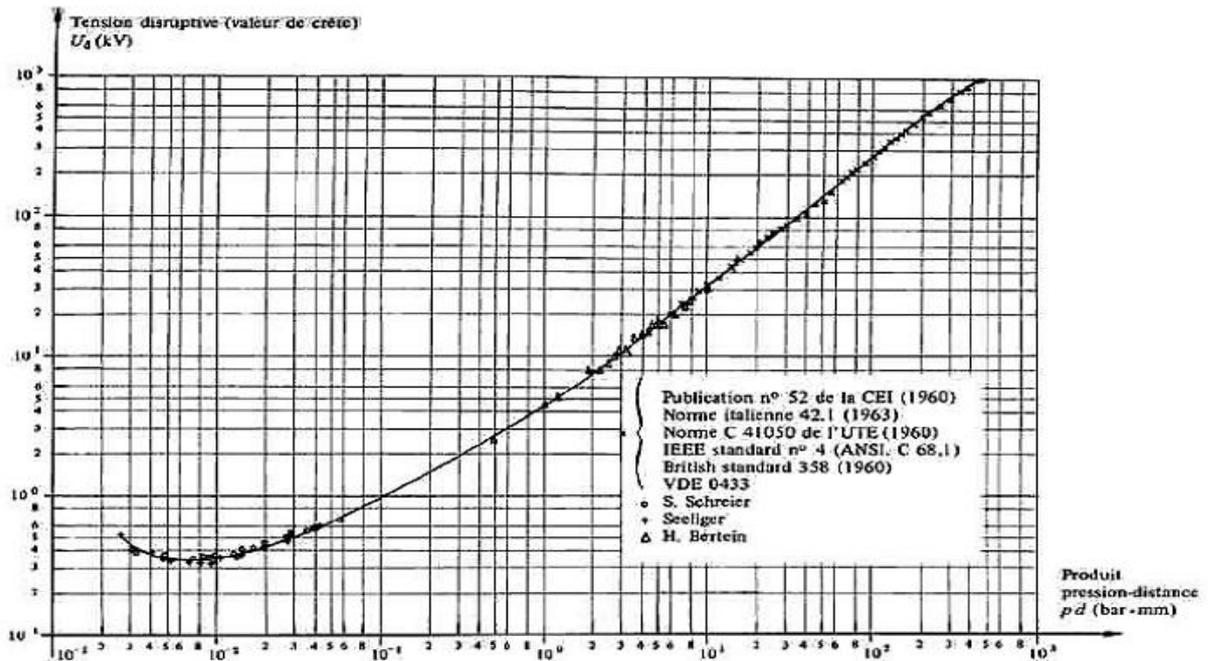


Figure IV.19 : Courbe de Paschen dans l'air (température 20°C)

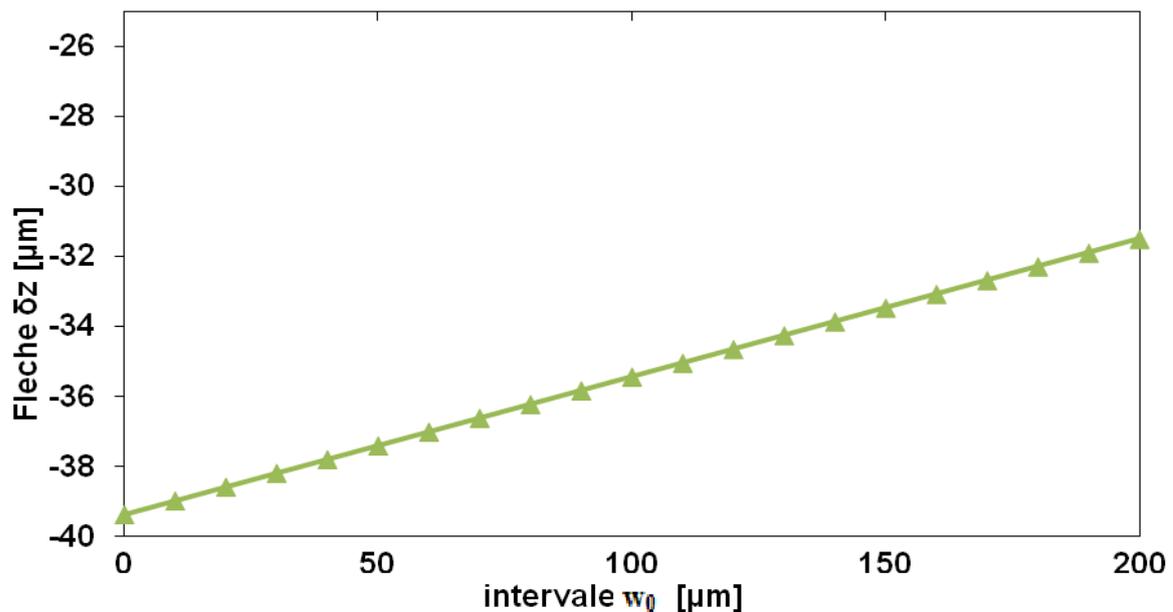


Figure IV.20 : Déflexion δ_z en fonction de l'intervalle w_0 entre les électrodes adjacentes, pour $V_y=V_z=100V$

On observe dans la figure IV.20 une variation proportionnelle de la déflexion δ_z avec l'augmentation de l'intervalle w_0 entre les électrodes adjacentes.

IV.6.4 Influence du force concentrée et du potentiel électrique sur une poutre piézoélectrique

Dans le cadre de la conception et le développement d'un outil de micro manipulation, après avoir identifier la loi de comportement d'une poutre bimorphe, faisons une étude comparative entre notre modélisation analytique et les résultats numériques en deux dimensions présentés précédemment en magistère et qui sont le sujet d'une publication international dans la revue IREME en mars 2011, La géométrie ainsi que les conditions aux limites de la poutre sont représentées sur la figure IV.21. Rappelons que la poutre est soumise à une force concentrée F appliquée au bord libre de la poutre et un potentiel électrique V , la déformation globale (δ_T) d'une

poutre piézoélectrique en flexion est la somme des deux déflexions pour $x=L$ est :
$$\delta_T = -\frac{Fl^3}{3EI} + d_{31} \frac{Vl^2}{h^2}$$

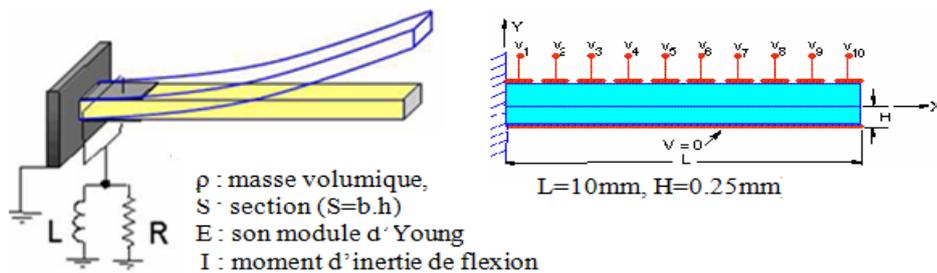


Figure IV.21: Caractéristique de la poutre piézoélectrique de type cantilever

La simulation a permet d'obtenir l'évolution des déplacements δy en tout point de la structure déformée avec des différentes valeurs de potentiel électrique aussi que l'évolution de la déformée d'une poutre bimorphe sous différentes sollicitations électrique et mécanique (cf.fig.IV.22, 23).

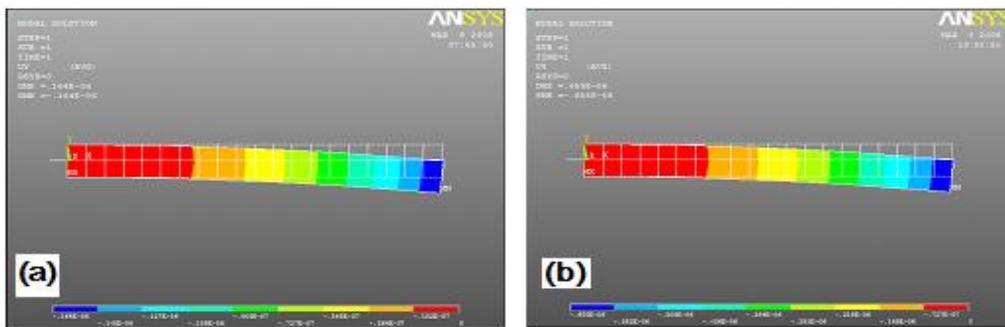
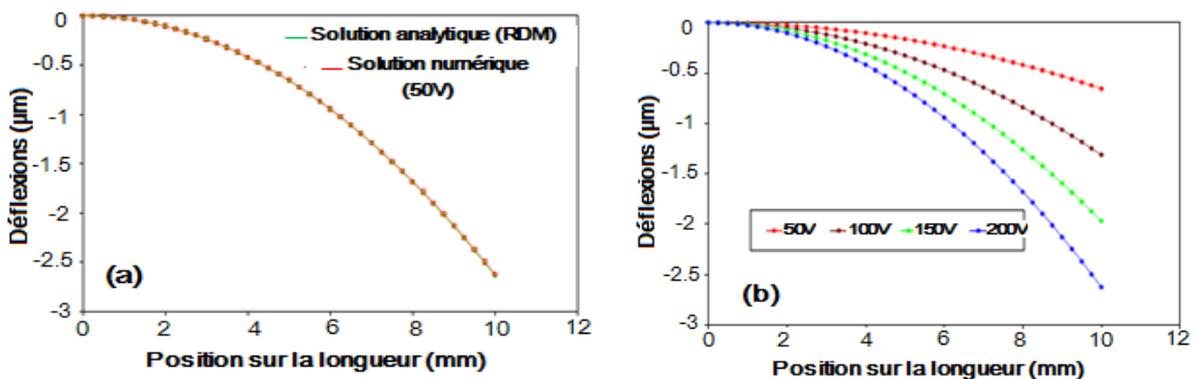


Figure IV.22 : Déformées des poutres bimorphes actionnées par extension (a) 50 volts (b) 200 volts



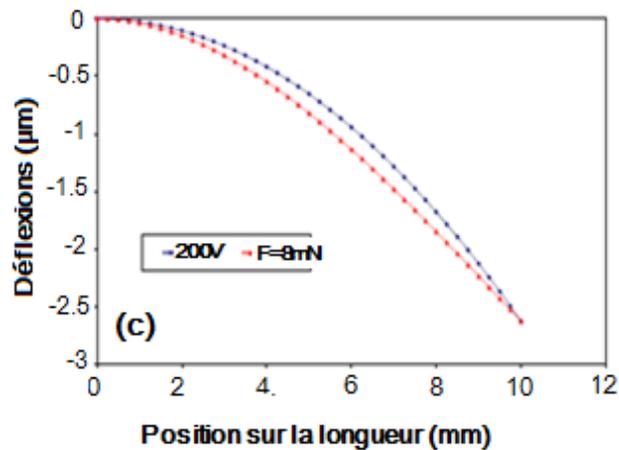


Figure IV.23: Comparaison de l'évolution de la déformée d'une poutre bimorphe sous différentes sollicitations électrique et mécanique

Comme il est illustré dans les figures ci-dessus, la simulation réalisée avec la poutre piézoélectrique indique un bon accord avec la solution analytique en termes d'évolution de la déflexion en fonction de la position. La courbe numérique étant quasiment équivalente à l'analytique. On peut donc admettre que les résultats de la simulation sont corrects. Ces résultats nous donne l'opportunité dans nos prochains chapitres de concevoir une micro pince par l'intermédiaire de deux poutres bimorphes soumise à des champs électriques dans deux sens différents.

IV.7 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre de nombreux aspects techniques. On a commencé par une introduction sur le domaine d'utilisation la micromanipulation avec et sans contact ainsi qu'une présentation de différents actionneurs des micro-pinces, On a cité les différents types de micro-pinces ainsi que leurs caractéristiques dans la micromanipulation, donc le choix de notre modélisation c'est sur la micro-pince piézoélectrique en prenant un doigt de cette dernière (une poutre bimorphe) sur laquelle on a étudié l'identification de la loi de comportement . On a montré aussi la performance de la poutre piézoélectrique en étudiant l'influence de quelques paramètres de couplage, et pour donner un éclaircissement et une concordance entre le modèle analytique et le modèle numérique, on a procédé à des simulations de type éléments finis déjà faites sur un doigt d'un micro-pince qui correspond à notre poutre piézoélectrique avec un seul degré de liberté.

Chapitre V

Modélisation et simulation numérique d'un microactionneur piézoélectriques

Nous avons réalise des simulations numériques de l'essai de traction et/ou flexion avec le logiciel Ansys® sur des éprouvettes de forme haltère avec différent types des matériaux piézoélectrique de différentes propriétés physique et piézoélectrique Nous poursuivons ce chapitre par une comparaison des performances des matériaux piézoélectriques et choisir le matériau le plus intéressant et performant.

V.1 Simulations électromécaniques par la méthode des éléments finies

Les calculs analytiques présentés précédemment issues de la résistance des matériaux RDM vont être très vite limitées à la description de structures simples. En effet, il devient difficile d'utiliser ces équations d'une part dans des géométries plus complexes (discontinuités, déformations localisées, trous...) et d'autre part pour traiter le couplage électromécanique dans ces dispositifs. Pour résoudre ce type de problèmes, nous avons fait appel à un simulateur mécanique : Ansys®. L'objectif de cette simulation par éléments finis est de construire un modèle moins restrictif, du point de vue des hypothèses, que le modèle analytique. Le modèle consiste à représenter un actionneur de type poutre en prenant en considération : l'effet piézoélectrique, les excitations externes ainsi que la géométrie tridimensionnelle de l'actionneur. L'analyse numérique par le logiciel Ansys® permet d'offrir des possibilités de simulations multi physiques. Ses domaines d'applications sont vastes :

Mécaniques des solides déformables, mécanique des fluides, électrostatique, électromagnétisme, hyperfréquence, thermique. Il est possible par exemple, de coupler une analyse mécanique avec une analyse électrique. La formulation variationnelle du problème à résoudre est discrétisée, puis la solution est calculée en tenant compte des conditions aux limites.

De part son caractère multi physiques, Ansys® propose un vaste choix d'éléments finis (plus d'une centaine) pour résoudre un grand nombre de problème. Entre le calcul des contraintes sur une pièce mécanique de forme quelconque et le calcul des contraintes sur une poutre en flexion, il n'y a priori aucune différences. A ceci près que pour la poutre, une formulation 2D peut suffire (gain en temps de calcul et en place mémoire). On choisira alors dans ce cas un élément fini spécialement dédié. Pour la simulation de système piézoélectrique avec le code de calcul Ansys®, citons quelques types d'éléments finis pour : 1 élément 2D, PLANE 13 et deux éléments 3D, SOLID5 et SOLID98. L'élément fini 2D PLANE13 (cf.fig.V.1) peut être utilisé pour une étude magnétique, thermique, électrique, piézoélectrique ou mécanique avec des possibilités de couplage limitées entre ces domaines physiques. L'élément est défini par quatre nœuds disposant chacun au maximum quatre degrés de liberté. Pour une étude piézoélectrique, ces degrés de liberté sont : le potentiel électrique V , le déplacement mécanique selon U_x et celui selon U_y .

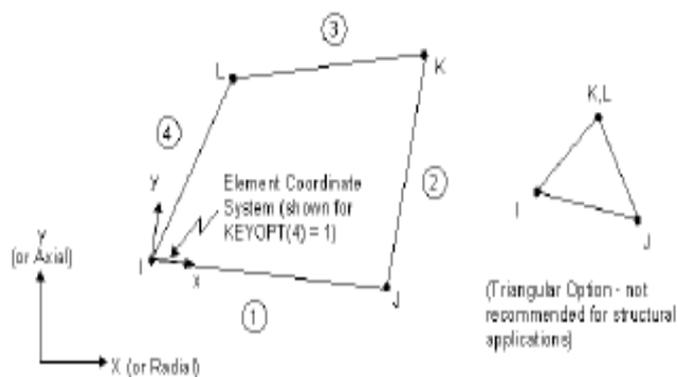


Figure V.1 : Définition géométrique de l'élément fini PLANE 13

L'élément fini SOLID5 (cf.fig.V.2) possède les mêmes champs physiques d'application que PLANE13. C'est un élément 3D défini par huit nœuds ayant chacun quatre degrés de liberté : U_x , U_y , U_z et V .

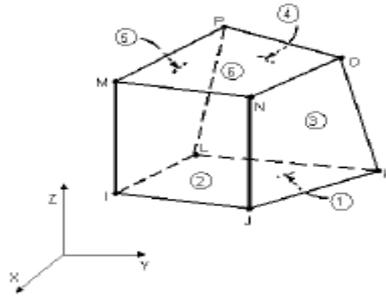


Figure V.2 : Définition géométrique de l'élément SOLID5

L'élément SOLID98 (cf.fig.V.3) diffère de SOLID5 uniquement par sa forme géométrique tétraédrique.

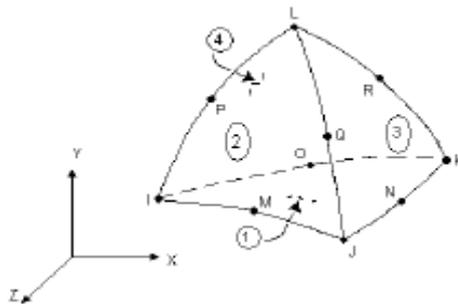


Figure V.3 : Définition géométrique de l'élément fini SOLID98

Ces éléments finis ont été créés à l'origine pour l'analyse de capteurs piézoélectriques et de transducteurs piézoélectriques basses fréquences. Le maillage de telles structures ne pose pas de problème particulier. Le choix de l'élément fini à utiliser va dépendre de la complexité du problème.

V.2 Choix d'un matériau piézoélectrique

Dans l'optique de choisir un matériau piézoélectrique pour faire de la récupération d'énergie, il est important de choisir un matériau avec un bon coefficient de couplage électromécanique, pour que l'énergie électrique soit transformée en énergie mécanique de façon efficace avec un bon rendement de conversion. Il est aussi avantageux d'avoir une constante diélectrique faible, pour avoir une tension importante pour un déplacement de charges donné. Dans ce contexte, nous avons choisi d'utiliser quatre matériaux piézoélectriques de différentes structures cristallines :

le niobate de lithium (LiNbO_3), le quartz (SiO_2) et deux matériaux piézoélectriques de type titanate zirconate de plomb ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$), plus connu sous le terme de PZT (PZT PIC 141 et PZT PIC 255), dont les propriétés électriques et mécaniques utilisés lors des simulations seront explicitées dans l'annexe A. Le niobate de lithium présente le grand avantage d'avoir un comportement non hystérétique et des constantes piézoélectriques, élastiques et diélectriques du deuxième et troisième ordre connues. La structure cristalline de ce matériau est trigonale (classe 3m) et sa densité volumique à l'état libre est de 4700 kg/m^3 . Le quartz est une espèce minérale du groupe des silicates. Il se présente soit sous la forme de grands cristaux incolores, colorés ou fumés, soit sous la forme de cristaux microscopiques d'aspect translucide. La structure cristalline du quartz est monocristalline et sa densité volumique est de 2650 kg/m^3 . Enfin, les céramiques PZT à structure type Perovskite offrent d'intéressantes propriétés par leurs forts coefficients piézoélectriques et leurs faibles pertes diélectriques. La masse volumique du PZT varie entre 7500 et 7800 kg/m^3 .

Dans cette étude nous avons cherché le matériau le plus convenable, nous intéresserons aux propriétés électriques et mécaniques de ces matériaux, en particulier pour la récupération d'énergie en tenant compte de leur capacité à être intégrés dans des microsystèmes.

V.3 Hypothèse de simulation

Nous avons réalisé des simulations numériques de l'essai de traction avec le logiciel Ansys® sur des éprouvettes de forme haltère. Les calculs sont effectués avec ou sans couplage électrique. Ces exemples permettent de réaliser une comparaison au niveau de performance de ces matériaux, obtenus par simulation numérique issues des essais de traction et/ou de flexion. Certaines hypothèses pour la modélisation des conditions aux limites ont été proposées. Pour simuler l'effet direct, l'éprouvette est supposée encastree à sa partie basse alors qu'un déplacement de 1 mm est imposé à la partie haute tandis que l'effet inverse est simulé par un champ nul imposé à la partie basse de l'éprouvette alors que la partie haute subit un potentiel électrique de 1 volt (cf.fig.V.1). Le maillage de l'éprouvette est constitué de 1088 éléments de type SOLID226 à 20 nœuds. Ce type d'élément permet de réaliser à la fois la géométrie cubique de l'élément et le couplage entre la contrainte et la résistivité du matériau.

Il peut aussi être utilisé pour simuler l'effet piézoélectrique et thermomécanique. La géométrie ainsi que les conditions aux limites du problème sont représentées sur la figure V.4a et b.

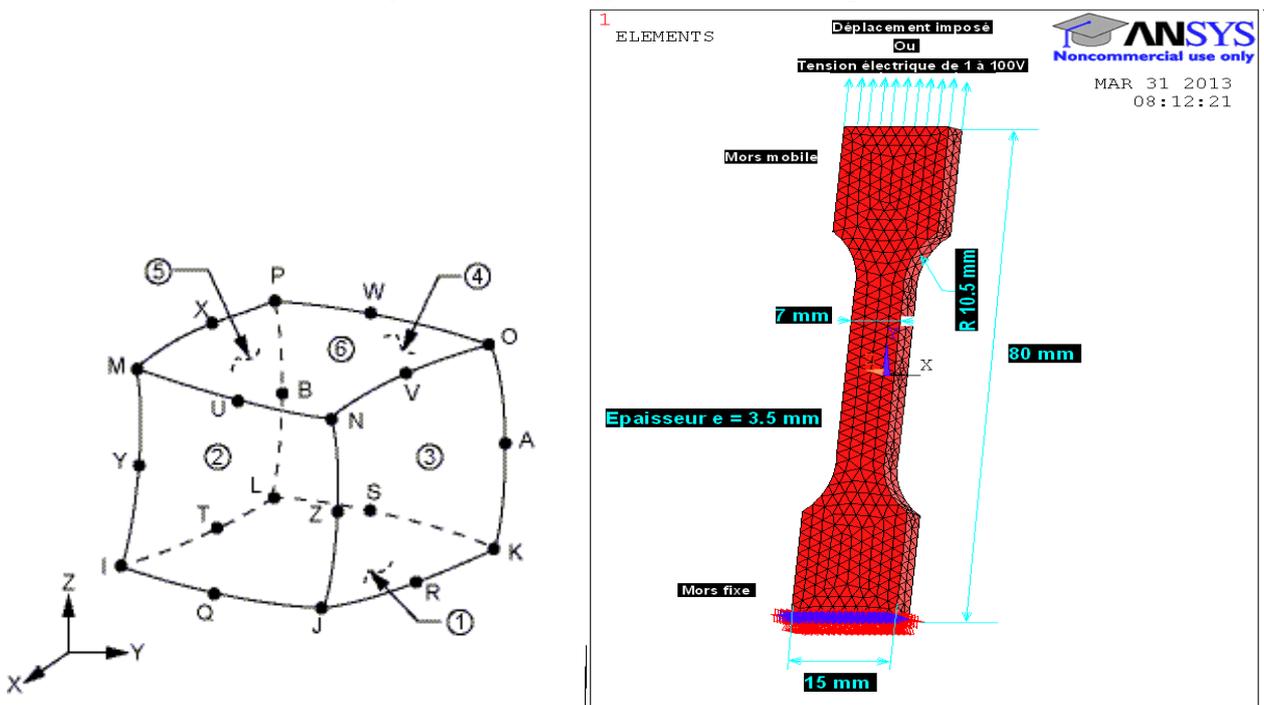


Figure V.4 : (a) élément SOLID226, (b) configuration de l'éprouvette utilisée lors du test de traction – maillage de l'éprouvette et conditions aux limites

V.4 Résultats de la simulation

On se propose de valider le modèle de comportement du matériau PZT en confrontant les résultats obtenus par la simulation avec les résultats déjà validés dans des exemples d'application dans le chapitre suivant. L'éprouvette utilisée est celle de la figure V.4, les paramètres rhéologiques correspondant au comportement du matériau ont été donnés précédemment. Le logiciel Ansys® permet d'obtenir l'évolution des contraintes en fonction des déformations en tout point de la structure déformée.

V.4.1 Simulation du comportement électromécanique sous déplacement imposé

V.4.1.1 Déplacement

Les résultats obtenus sont reportés sur les figures V.5a,b,c et d en terme d'isovaleurs de déplacement U_{yy} dans une éprouvette de traction en extension, pour quatre types de matériaux de différentes classes cristallines, on remarque que le déplacement max et min sur les deux extrémités de l'éprouvette de chacun de ces matériaux piézoélectriques sont identique, ce qui explique que les propriétés électromécanique n'influent pas sur le déplacement longitudinale de la poutre en traction.

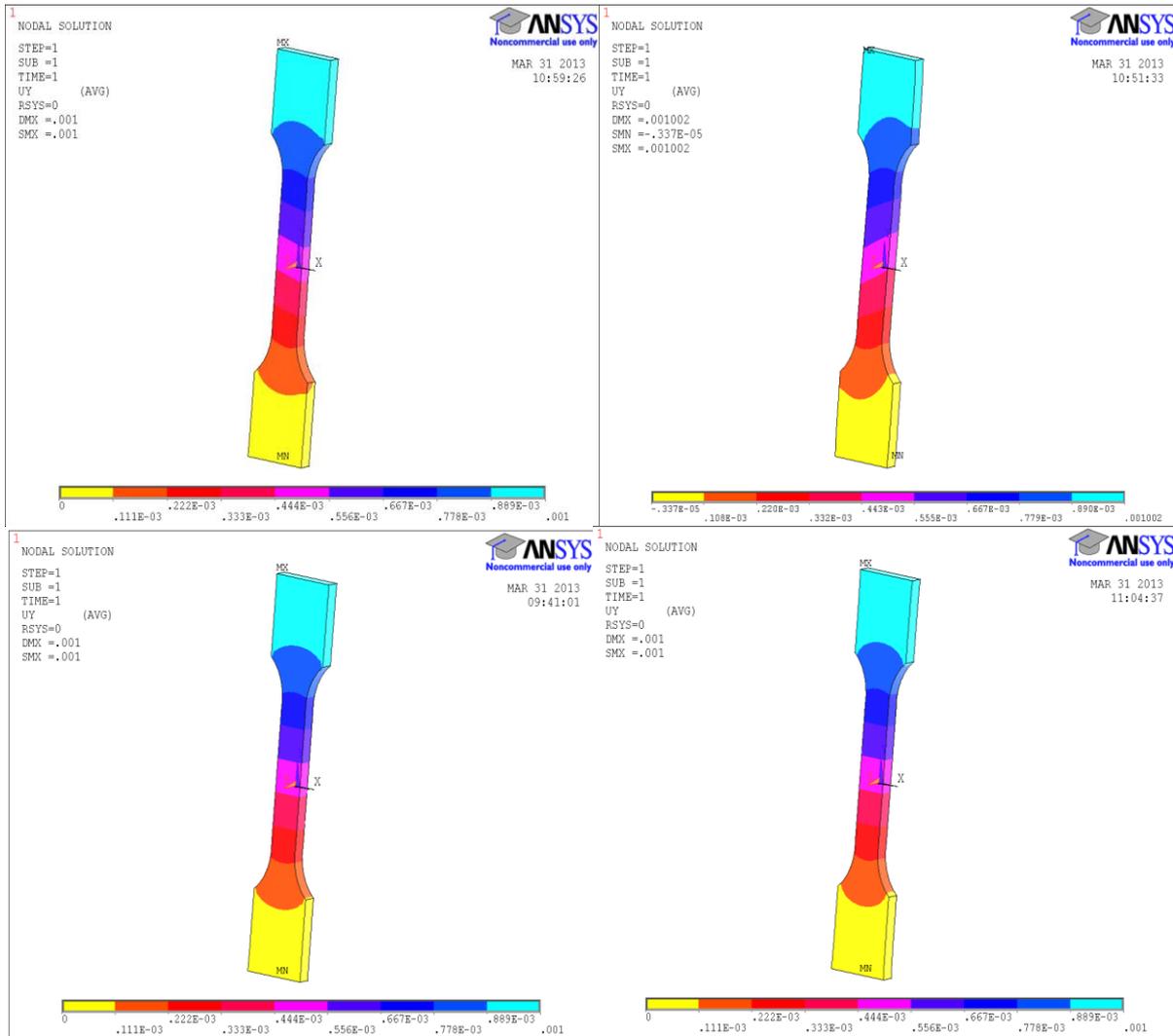


Figure V.5 : Isovaleurs de déplacement U_{y-y} dans une éprouvette de traction en extension: (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255

V.4.1.2 Potentiel électrique

La Figure V.6 représente le potentiel électrique qui apparaît en surface de l'éprouvette de traction pour ce mode de déformation imposé. Dans cette configuration, on remarque que la valeur maximum et sur la figure V.6a n'est pas sur l'extrémité libre, ce qui explique que le niobate de lithium ne répond pas au besoin de notre micromanipulation, de même pour le monocristalline quartz qui présente des valeurs du potentiel électrique très élevés, on a des valeurs un peut rapprochées sur les extrémités de l'éprouvette pour les deux matériaux PZT PIC ou le potentiel électrique de PZT PIC255 est inferieur que celle de PZT

PIC141 à cause de la constante piézoélectrique de charge d_{33} . Donc pour un déplacement imposé de 1mm on a besoin d'un potentiel électrique bien déterminé pour mieux manipuler l'objet.

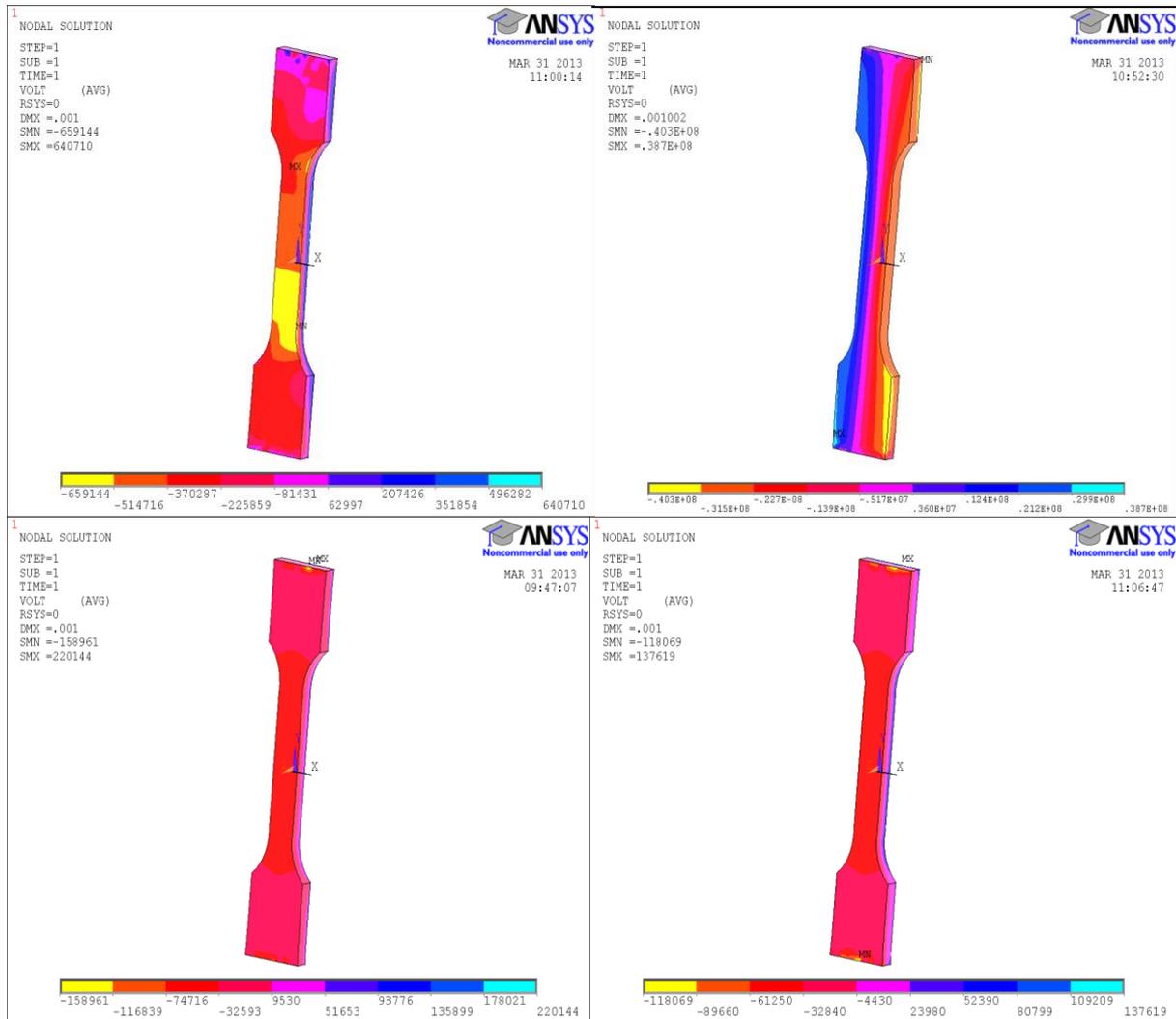


Figure V.6 : Isovaleurs du potentiel électrique cumulé dans une éprouvette de traction en extension : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255

V.4.1.3 Contrainte σ_{yy}

Les figures V.7 en termes d'isovaleurs de contrainte σ_{yy} montrent la réponse des structures pour différents actionneurs. L'influence des propriétés électromécanique du PZT est majeur : les quatre figure ont des valeurs de contraintes maximale ainsi sur la minimale se convergent entre eux avec des emplacements sauf que le matériau PZT-PIC141 qui possède dans ce cas des valeurs différente par diminution par rapport aux autres matériaux, ce qui explique que pour un déplacement de 1mm dans notre travail on a besoin seulement des valeurs de contraintes minimale pour la micromanipulation.

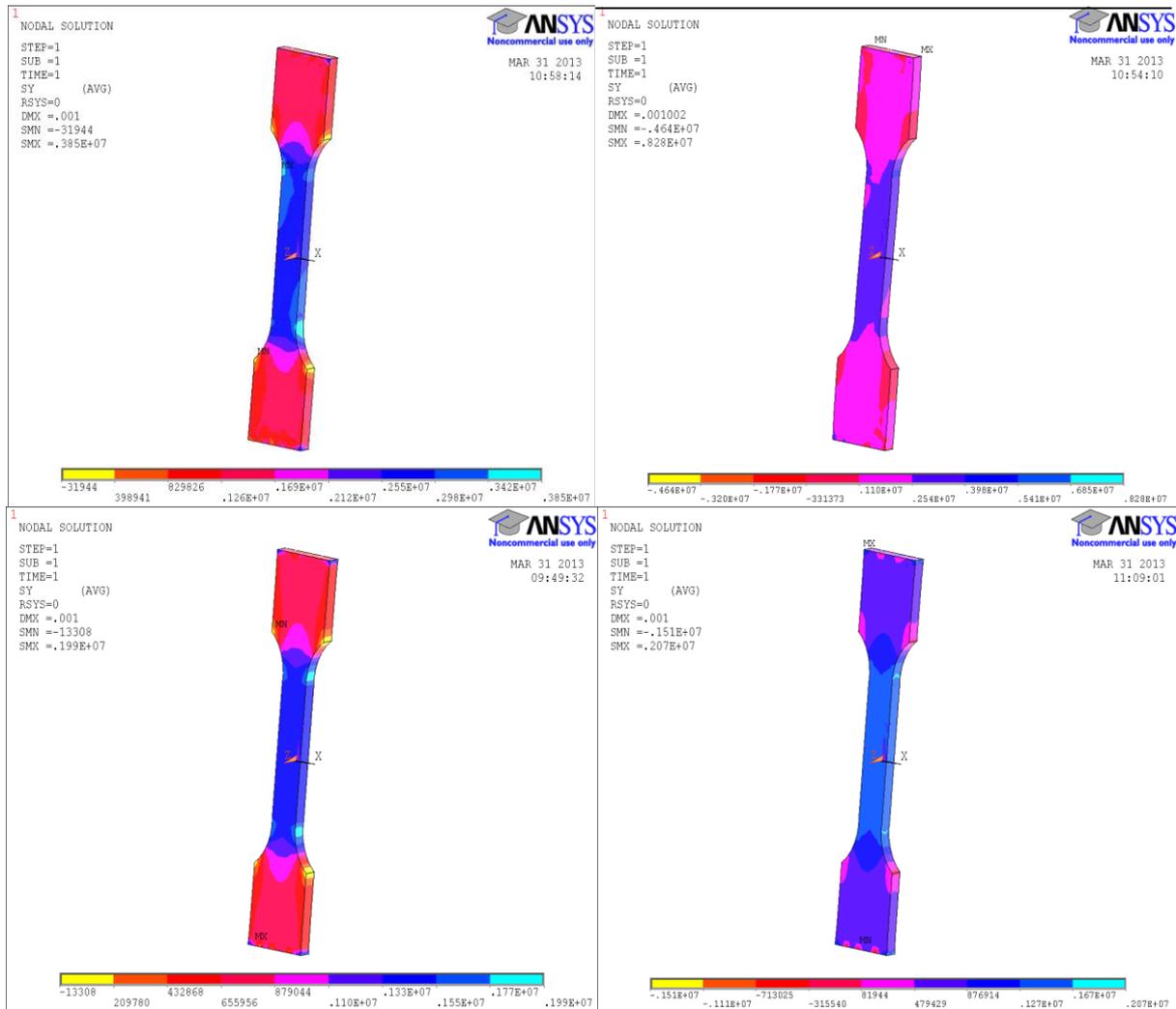


Figure V.7 : Isovaleurs de la contrainte σ_{yy} cumulée dans une éprouvette de traction en extension : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255

V.4.2 Simulation du comportement électromécanique sous champs électrique

V.4.2.1 Déformé en mode de traction

On a ensuite appliqué un chargement électrique sur les faces de normale X (voir la Fig.V.4b) pour simuler l'effet inverse et on obtient la déformée. Le potentiel appliqué est choisi arbitrairement à 1 V.

V.4.2.1.1 Déplacement

D'après la les figures V.8, On constate que les trois matériaux a, c et d n'ont presque pas de déformation suivant x, seul le monocristallin quartz qui à un léger déplacement car se dernier ne possède pas de moment dipolaire permanent se qui donne une réaction du à ce potentiel électrique.

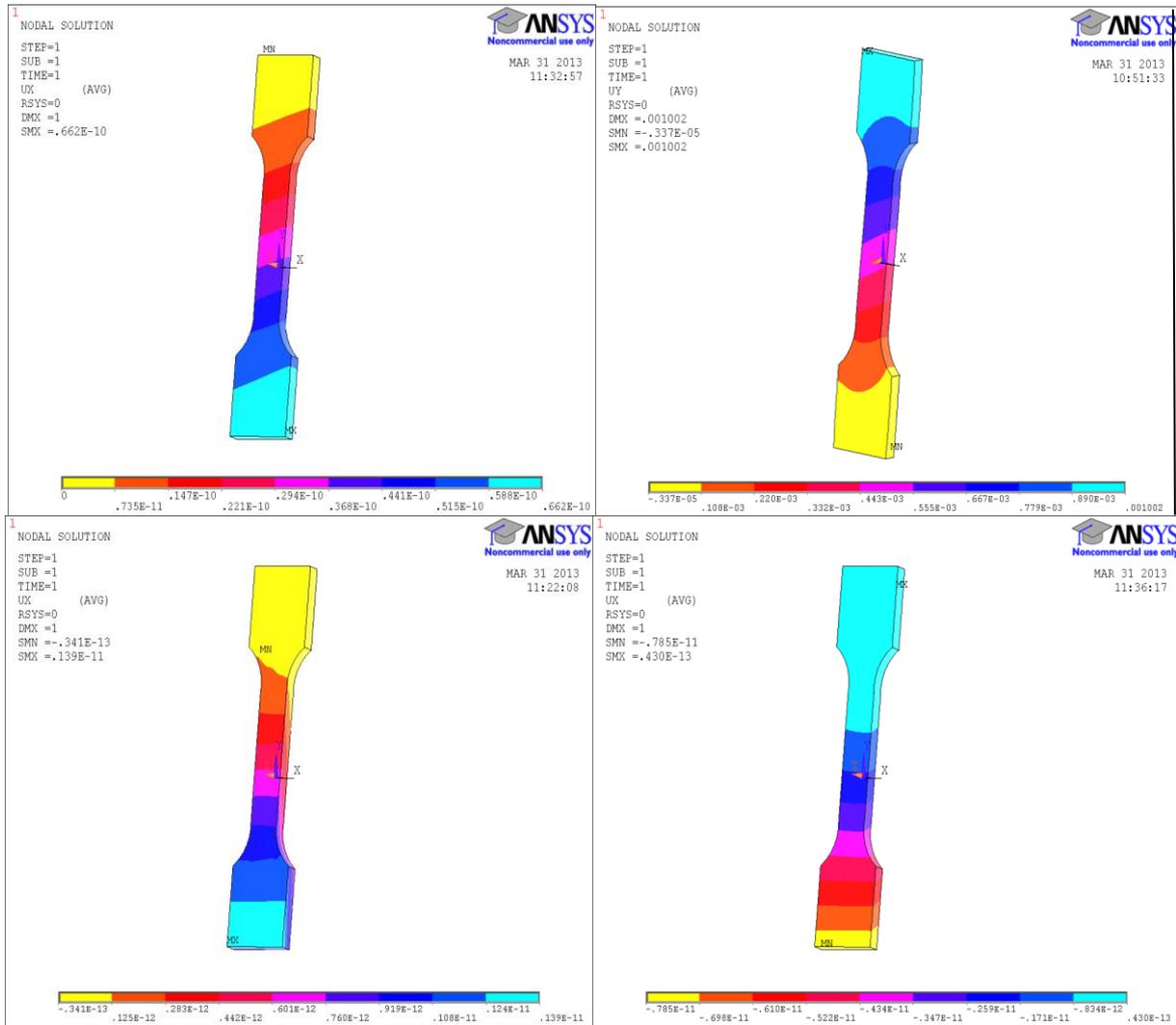


Figure V.8 : Isovaleurs de déplacement U_{xx} dans une éprouvette de traction en extension: (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255

V.4.2.1.2 Potentiel électrique

D'après les résultats des figures V.9, le fait de considérer cette fois-ci un potentiel électrique de 1V on remarque qu'on a des valeurs identiques pour les quatre matériaux, donc pas d'augmentation ou de diminution du potentiel simplement une augmentation de 0.52V pour le monocristallin quartz.

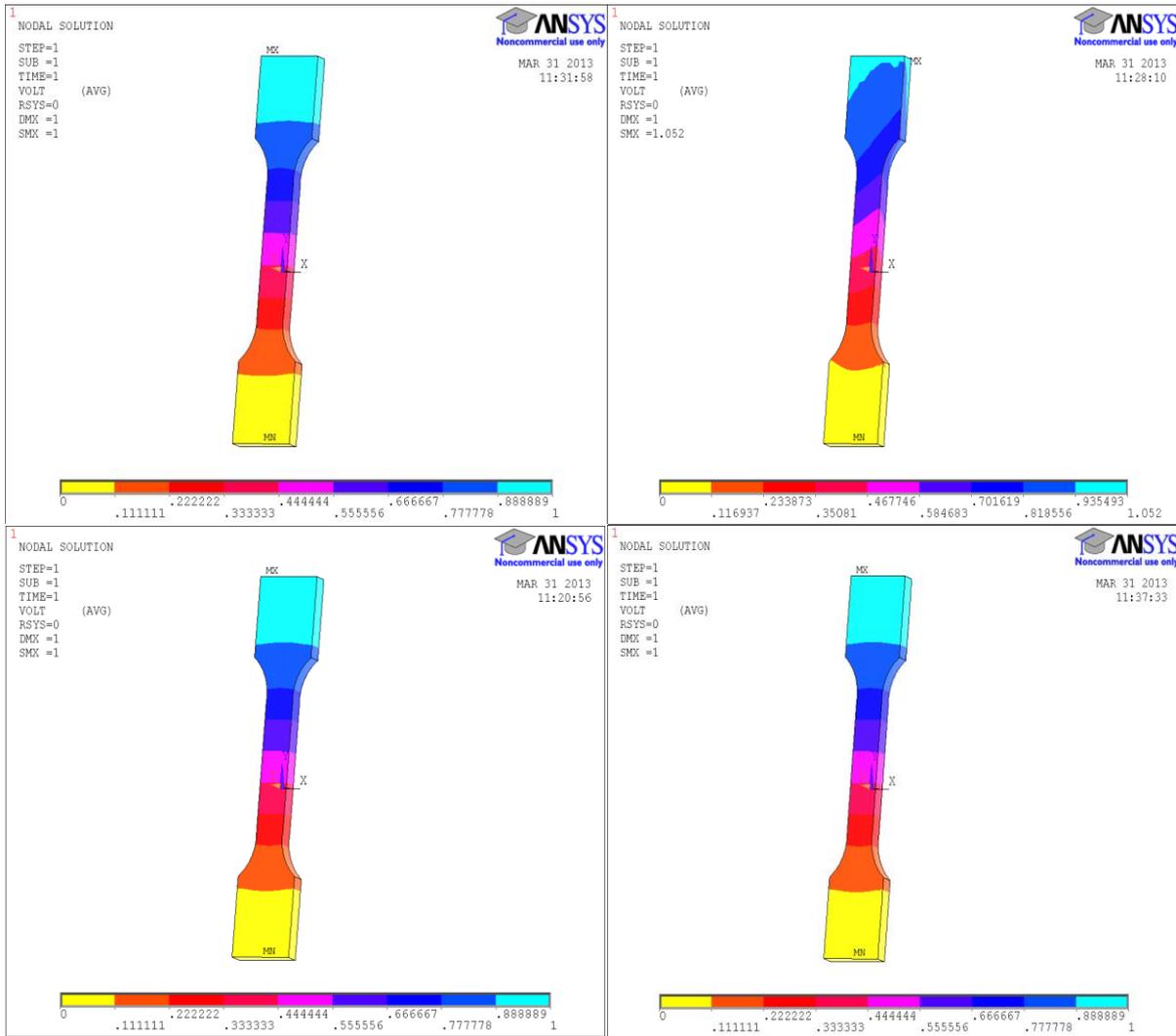


Figure V.9 : Isovaleurs du potentiel électrique cumulé dans une éprouvette de traction en extension : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255

V.4.2.2 Déformé en mode de flexion

Continuant l'application d'un chargement électrique sur les faces de normale X, cette fois-ci faisons quelques simulations numérique issues des essais de flexion.

V.4.2.2.1 Champ électrique

D'après les résultats obtenus dans cette simulation on remarque que l'essai en mode de flexion nous montre que la déformé pour les deux matériaux monocristaux LiNbO_3 et le SiO_2 ont presque un comportement de cisaillement en plus de la flexion selon z c'est a cause des valeurs non nulles de la matrice piézoélectrique et aussi différent l'un par rapport au autre, en revanche les céramique piézoélectrique ont presque le même comportement de déformation avec une légère différence pour le PZT PIC141 du de la valeur e_{33} un peut élevé que la valeur e_{33} de l'autre PZT

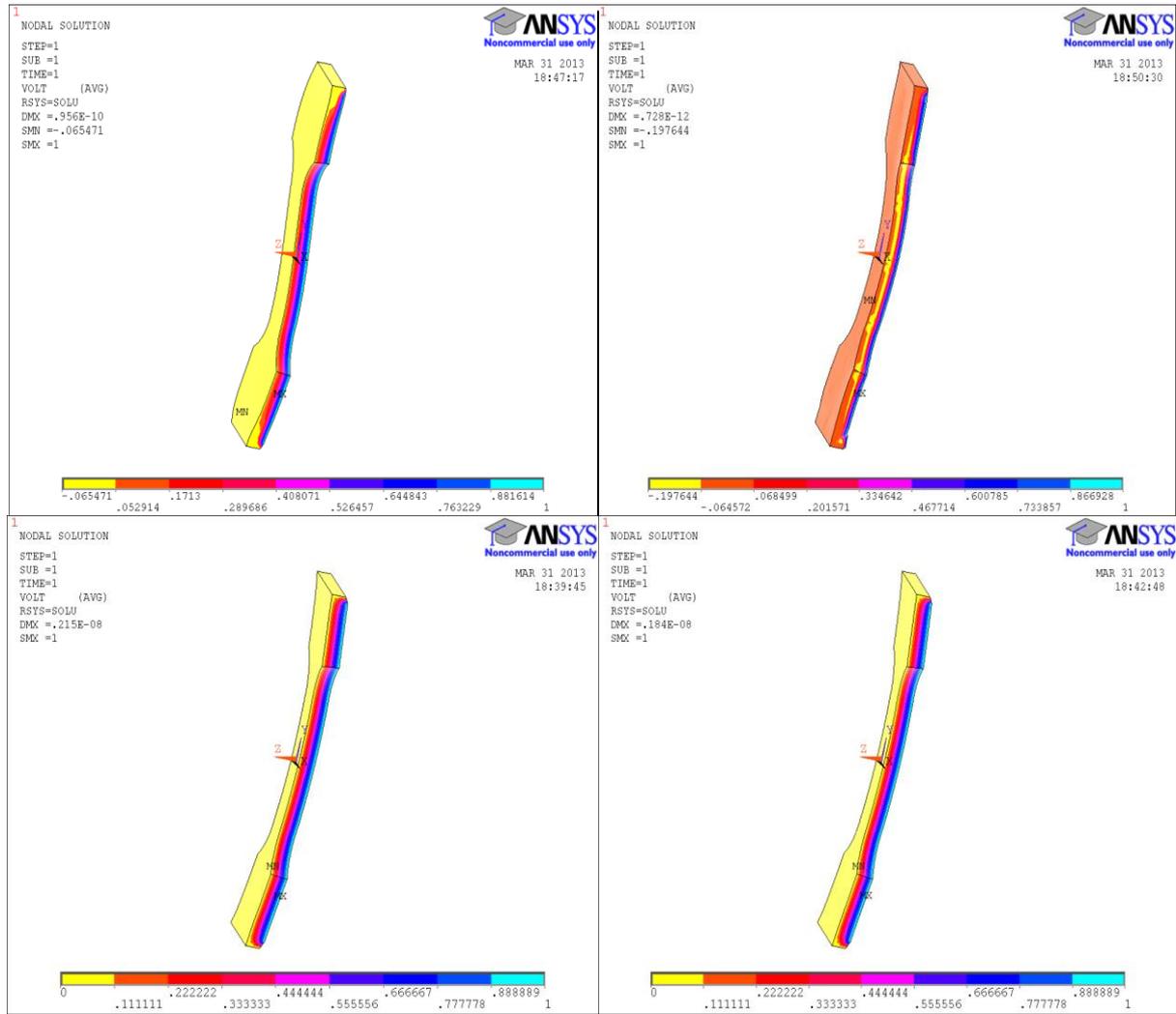


Figure V.10 : Isovaleurs du champ électrique cumulé dans une éprouvette en mode de flexion : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255

V.4.2.2.2. Déplacement global

Sur la figure V.11 est représenté respectivement les isovaleurs de déplacement global cumulé dans une éprouvette en mode de flexion, on remarque de même que la simulation précédente les deux matériaux LiNbO_3 et SiO_2 se déforme en flexion et en cisaillement à cause des constantes de la matrice d'élasticité non nul de plus le déplacement global maximal du niobate de lithium n'est pas au milieu de l'éprouvette mais près du mors fixe et cela du aux constantes piézoélectrique non nulles d'une part et d'autre part les deux céramiques piézoélectriques qui ont des résultats similaires alors que le PZT dur PIC141 se déforme un peut plus que le PZT doux PIC255.

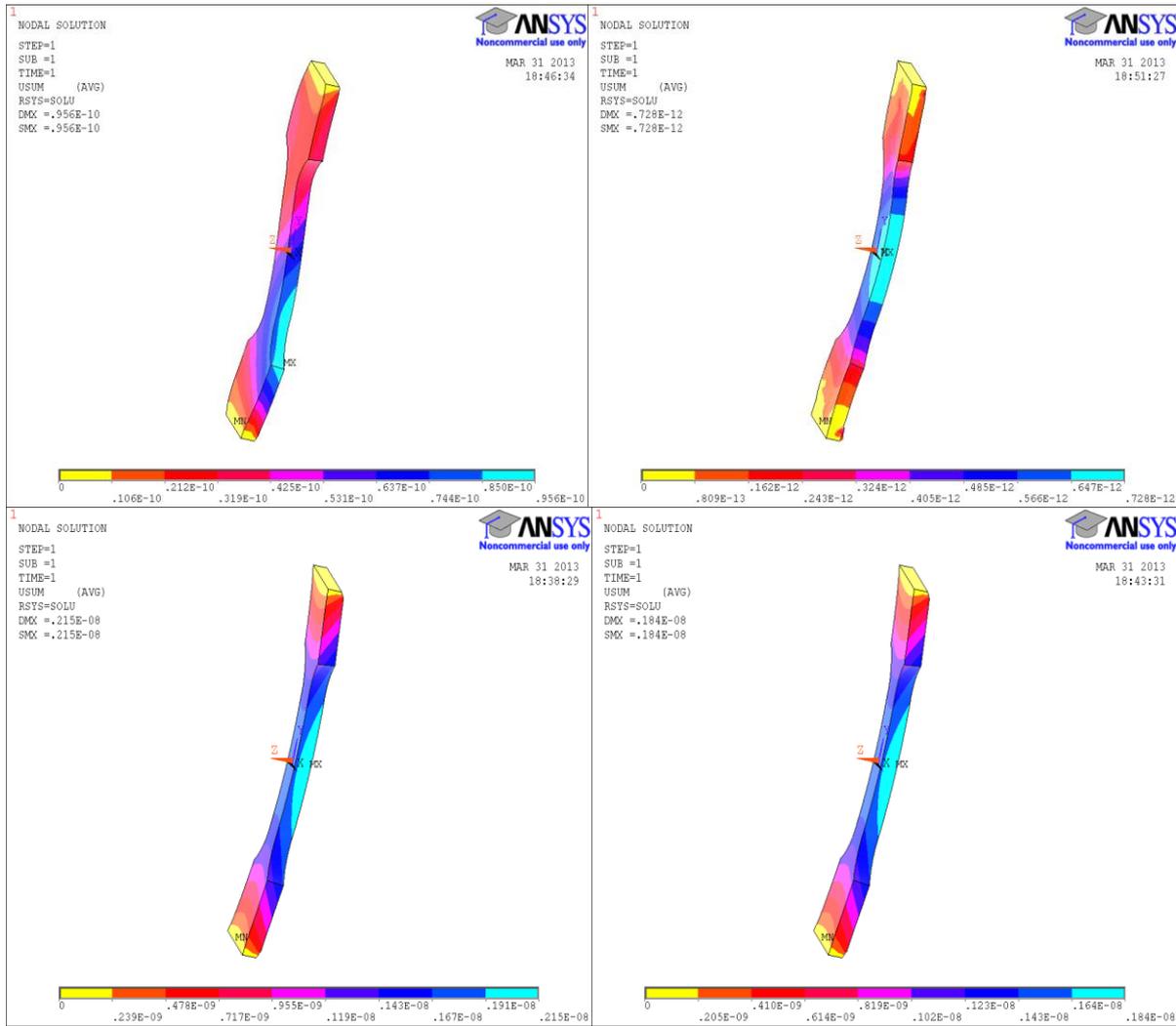


Figure V.11 : Isovaleurs de déplacement global cumulé dans une éprouvette en mode de flexion : (a) niobate de lithium, (b) quartz, (c) PZT PIC 141et (d) PZT PIC 255

Au niveau des coefficients piézoélectriques, le matériau le plus performant est le PZT PIC 141, avec notamment un couplage électromécanique très important. Le second matériau avec de très bons coefficients piézoélectriques est le PZT PIC 255, qui présente un bon couplage, avec une permittivité diélectrique moins importante que le PZT PIC 141, et des pertes diélectriques aussi moins importantes.

Les deux autres matériaux semblent moins intéressants, avec des modes de déformations très complexes (spaciale). Donc le PZT PIC141 est plus important dans notre travail de manipulation car il a plus de déformation que le PZT PIC 255

V.4.2.2.3 Déplacement du PZT PIC 141 pour différent voltage

Les résultats obtenus sont reportés sur la figure V.12 en termes d'isovaleurs de déplacement pour six valeurs de potentielle électrique. On remarque qu'à bas tension électrique de 1 à 10V, on a le même déplacement en revanche on observe que la variation du potentielle électrique de 20 à 100V nous donne une augmentation d'environ 0,1 à 0,2 %. Sur la comparaison des performances des matériaux piézoélectriques, le matériau massif le plus intéressant et performant est le PZT PIC 141, même s'il est très cher. Au niveau du PZT, il présente les meilleurs résultats au niveau de capacité à déformer une structure.

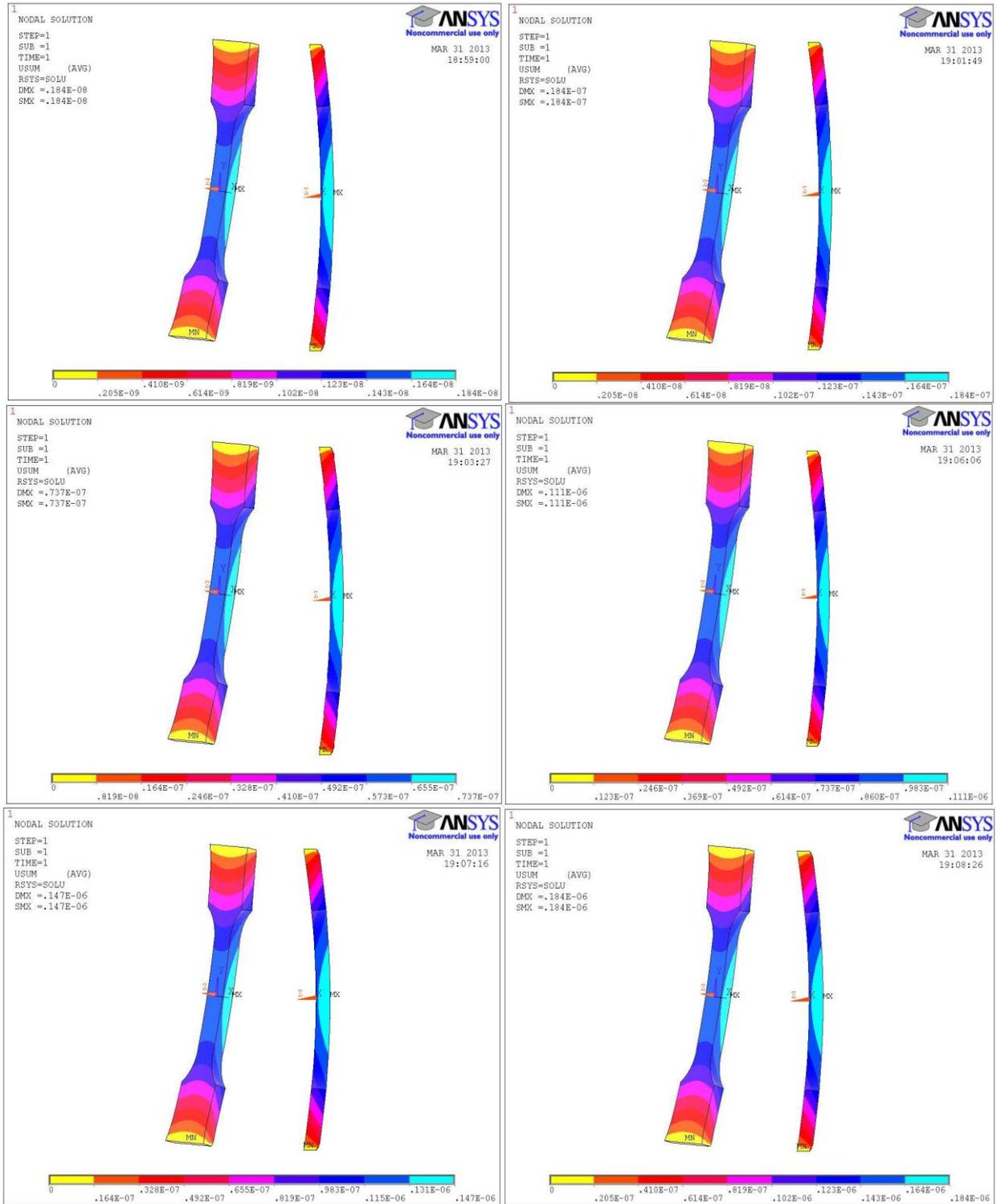


Figure V.12 : Isovaleurs de déplacement global cumulé dans une éprouvette en mode de flexion du PZT PIC 141 pour un voltage de 1, 10, 40, 60, 80 et 100V

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a développé et présenté des simulations avec le logiciel Ansys® d'une éprouvette piézoélectriques, nous avons utilisé quatre matériaux piézoélectriques de différentes structures cristallines, on a fais une modélisation de l'effet direct par la simulation du comportement électromécanique sous déplacement imposé aussi que l'effet inverse avec une simulation sous champ

électrique. Ces simulations ont montré que les propriétés élastique et piézoélectrique sont les paramètres à prendre en compte pour élaborer un tel matériau en plus les deux matériaux monocristaux présentent des dilatations piézoélectriques de deux ordres de grandeur inférieurs à celle du PZT.

La déformation piézoélectrique des matériaux est liée essentiellement à leurs propriétés piézoélectriques intrinsèques (données par e_{33}) et leur rigidité (donnée par c_{33}). Il semblait donc a priori que le PZT, qui est environ deux fois moins rigide que le niobate de lithium et le quartz, mais qui a des propriétés piézoélectriques vingt fois plus importantes, donc le choix de notre matériau entre les deux céramiques piézoélectriques PZT PIC141 et PZT PIC255 qui ont une performance fonctionnelle bien déterminée à cause d'un facteur de couplage important et des coefficient piézoélectrique élevés et bien placés sur la matrice piézoélectrique avec une légère différence entre ces deux derniers matériaux notamment le PZT PIC141 qui est un matériau dur par comparaison avec le PZT PIC255 qui est un matériau doux. Ces résultats sont nécessaires à la conception, à l'optimisation et au développement des systèmes pour la micromanipulation et l'assemblage des micros objets. Elle nous donne l'opportunité dans nos prochains travaux de concevoir une micro pince par l'intermédiaire de deux poutres bimorphes soumise à des champs électriques dans deux sens différents.

Chapitre VI

Modélisation et simulation numérique de la déformée d'un microsysteme intelligent pour la micro-robotique

Ce chapitre est consacré à des simulations bien spécifiques dédié aux microsystemes intelligent de type poutre piézoélectrique à deux doigts de serrage parallèle pour la micromanipulation des micro-objets, ces simulation ont comme but faire évoluer les fonctionnalités de ces microsystemes avec une étude de l'influence des paramètres sur leurs performances, on a validé notre modèle numérique avec des études de références déjà publié.

VI.1 Introduction

La micromanipulation et le micro-assemblage sont en expansion depuis un peu plus d'une dizaine d'années. Cependant, le développement de stratégies adaptées aux contraintes imposées par la réduction d'échelle reste encore aujourd'hui un défi majeur et, par conséquent, un champ de recherche ouvert. Les systèmes de micromanipulation et micro-assemblage doivent prendre en compte notamment les dimensions des objets manipulés (entre 1 μm et 1 mm) et leur comportement à ces échelles. Ceci entraîne de difficulté lors de leur préhension, la mesure des micro-efforts exercés, les moyens de visualisation de la scène de travail et l'automatisation des tâches de micromanipulation. Dans le domaine de la micromanipulation, le but recherché est d'améliorer les performances des micro-robots à manipuler de micro-objets et par conséquent, un meilleur rendement. Pour répondre à ces besoins, il est très utiles non seulement de connaître les principes physiques des matériaux actifs dites « matériaux intelligents » avec lesquels sont fabriqués ces systèmes intelligents mais également de modéliser et simuler par la méthode des éléments finis les phénomènes physiques liés à leurs utilisations dans des microstructures soumises à des sollicitations complexes et l'interaction du produit final avec son environnement. Cette interaction se manifeste par leur capacité à s'adapter de façon appropriée afin d'aboutir à un état maîtrisé de la microstructure conforme aux objectifs de performance. Les microsystemes de nouvelle génération utilisent les propriétés fonctionnelles des matériaux avancés. Comme l'indique la Figure VI.1, les composants fondamentaux d'un microsysteme intelligent.

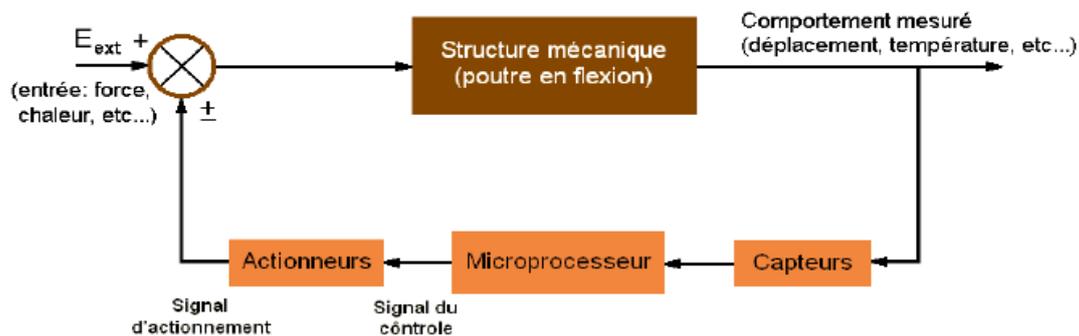


Figure VI.1 : Organisation d'un microsysteme intelligent

Plusieurs applications dans des cas réels de micromanipulation ont été récemment réalisées avec succès et permettent d'envisager l'utilisation de ce système pour l'assemblage de microsystemes complexes. Elle concerne de nombreux secteurs, que ce soit l'assemblage de pièces micrométriques rigides (micro-roues dentées, microlentilles optiques, circuits hybrides, etc...). Ou la manipulation d'éléments biologiques pour la médecine ou les biotechnologies (micro-organismes, cellules, ADN, etc...). La Figure VI.2 regroupe quelques clichés tirés d'une séquence vidéo qui illustrent les possibilités de la micromanipulation de micro-objets de forme et de taille différents.

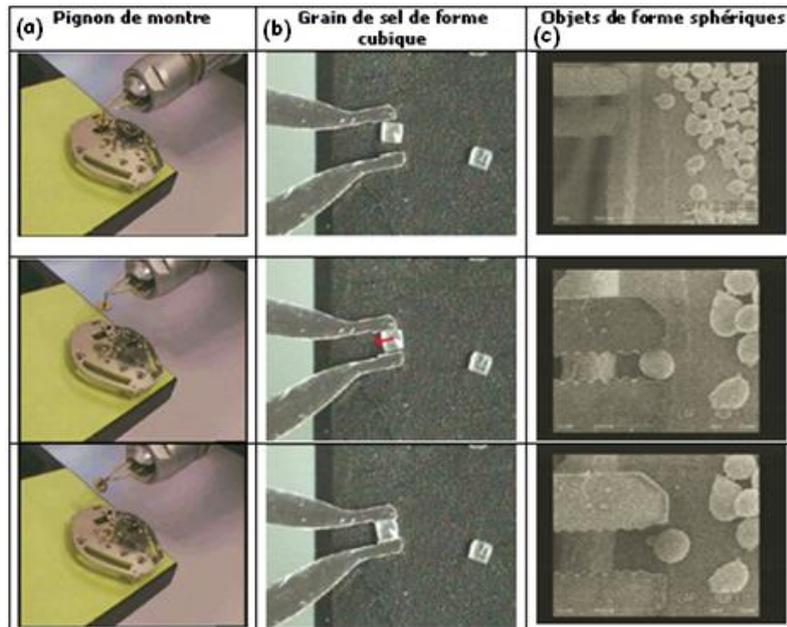


Figure VI.2 : Séquence (a) dépose et prise d'un pignon de montre, (b) auto-centrage d'un grain de sel entre les mors de la pince et (c) saisie et dépose d'un micro-objet de forme sphérique de 200 μm de diamètre (photo MEB)

Le premier exemple, comme l'illustre la Figure VI.2.a, concerne la manipulation télé-opérée d'un pignon de montre dont l'axe mesure 150 μm de diamètre. Le second présente la prise et la dépose télé-opérées de cubes d'environ 300 μm de coté sous une binoculaire (cf.fig.VI.2.b). Enfin, le troisième et dernier exemple montre des photos obtenues à l'aide de Microscope Electronique à Balayage (MEB), la manipulation de micro-objets globalement de forme sphérique de 150 à 200 μm de diamètre (cf.fig. VI.2.c).

Dans le cadre de cette thèse, nous concentrons en particulier nos efforts sur l'étude par simulation numérique d'une micro-pince intelligente de type poutre piézoélectrique à deux doigts de serrage parallèle pour la micromanipulation des micro-objets. Dans cette partie, quelques informations seront données sur les modèles utilisés et le prototype étudié ainsi que les nombreuses hypothèses de simulations simplificatrices requis pour la simulation de ces microsystèmes intelligents. Nous poursuivons ce chapitre par l'étude de l'influence de plusieurs paramètres sur les performances de la micro-pince afin de faire évoluer leurs fonctionnalités. Puis, nous comparons ce dernier avec des études de références pouvant servir à valider notre modèle numérique. Enfin, nous exploitons cette étude dans le cadre de la micromanipulation de deux micro-objets de forme cubique ou cylindrique dont la taille maxi mesure 500 μm .

VI.2 Présentation du prototype de micro-pinces intelligente

VI.2.1 Description du prototype

La micro-pince piézoélectrique étudiée se présente sous une forme standard est entièrement en PZT d'une masse d'environ de 45mg équipée d'organes terminaux en polymère thermoplastique avec deux mors pour manipuler des micro-objets de forme cubique ou cylindrique de petite, moyenne et grande taille correspondant respectivement à des intervalles au repos de 10 μm à 500 μm entre les deux mors (cf.fig.VI.3). La micro-pince est constituée de deux doigts piézoélectriques, de type PZT-PIC.

Chaque doigt peut fonctionner en configuration actionneur, commandé en tension, ou capteur, mesure de charge. Les organes terminaux sont maintenus par collage sur la structure en PZT au niveau de la jonction. Les dimensions des micro-pinces étudiées sont :

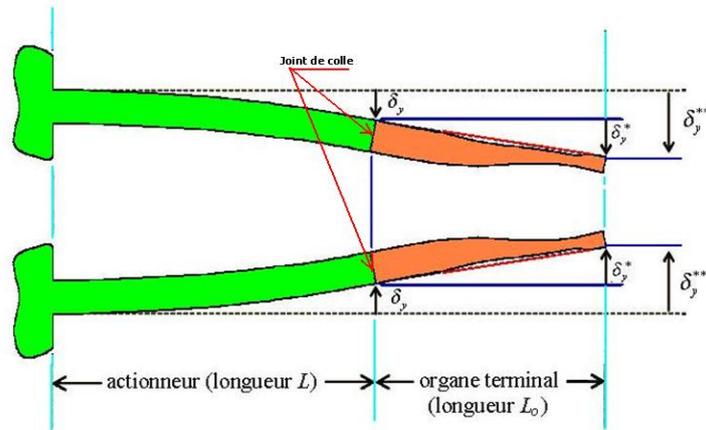


Figure VI.3 : Déflexion totale selon y d'une micro-pince composée de deux poutres PZT et des organes terminaux en polymère thermoplastique

1. Pour la manipulation des micro-objets : les poutres PZT intégrés dans ces prototypes sont de 4 mm de longueur, 200µm de largeur et 500µm d'épaisseur. Et pour l'organe terminal 1,5mm de long et 500µm d'épaisseur,
2. Pour la validation numérique : une poutre de type encastree-libre de 10mm de longueur, 1 mm de largeur et 200µm d'épaisseur (voir Chapitre IV),
3. Pour la validation expérimentale : une poutre de type encastree-libre de 25mm de longueur, 1mm de largeur et 200µm d'épaisseur.

A priori, les caractéristiques mécaniques et piézoélectriques des matériaux composants la micro-pince intelligente ne sont pas connues. Néanmoins les valeurs les plus fréquentes trouvées dans la littérature sont données par le tableau VI.1.

Tableau VI.1 : Propriétés mécaniques et piézoélectriques des doigts à serrage parallèle et les organes terminaux thermoplastiques [NGU 06]

Propriétés	PZT PIC 141	PZT PIC 255	Polypropylène
Masse volumique [kg/m ³]	7800	7800	1200
Module d'Young [GPa]	40	62	2,3
Module de cisaillement [GPa]	12	23	-
Coefficient de Poisson	0,31	0,34	0,37
Matrice de coefficients piézoélectriques [e]	Voir annexe	Voir annexe	-
Température de Curie T _c [°C]	295	350	-

VI.2.2 Adaptation des organes terminaux

Aucune contrainte n'est envisagée a priori quant à la nature et aux formes des micro-objets à manipuler. Cependant, les extrémités des doigts de la micro-pince intelligente, ou organes terminaux, en contact avec l'objet sont de toute importance car ils doivent être adaptés à celui-ci. La Figure VI.4 montre plusieurs exemples de réalisations possibles.

La première micro-pince peut être munie d'un mors plat et d'un autre à encoche en V, est particulièrement adaptée pour la manipulation de micro-pièces circulaires et assure également un auto-centrage de micro-objet. La seconde, pourvue d'un mors circulaires et d'un autre décrivant un appendice en Λ est une solution intéressante pour manipuler des micro-engrenages par exemple. Enfin, la troisième est équipée d'un ou deux mors dont les surfaces de contact sont rugueuses, ce qui permet de limiter les forces d'adhésion souvent importantes avec les micro-objets de très petite taille.

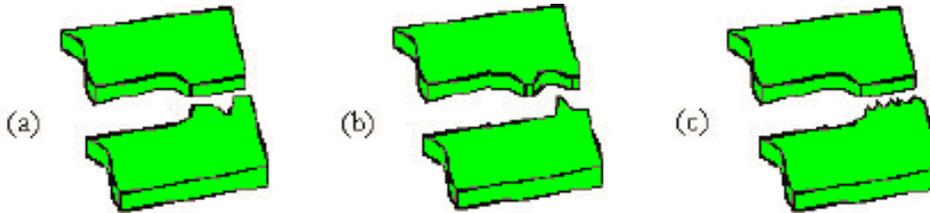


Figure VI.4 : Exemples d'organes terminaux de micro-pinces : (a) plat/encoche en V, (b) encoche circulaire/appendice en Λ et (c) plat/surface rugueuse

À travers ces exemples, nous nous rendons bien compte que l'adéquation entre l'extrémité de la micro-pince et le micro-objet est primordiale pour garantir le succès des opérations de manipulation. Cependant, il est illusoire de faire une liste exhaustive de tous les organes terminaux possibles tant les besoins sont nombreux et les solutions multiples pour une même application.

VI.3 Simulations par éléments finis

Pour tous les dispositifs piézoélectriques conçus, nous avons procédé à des simulations par éléments finis avec le logiciel de calcul de structures Ansys[®]. Nous avons ainsi pu obtenir par des solutions numériques à l'aide de méthode éléments finis, une analyse précise sur les différents modes de déformation des poutres piézoélectriques, relèvent un aspect majeur lié à la polarisation des poutres PZT. On s'est servi de cette étude numérique pour extraire le mode qui nous intéressait, le mode en flexion dans le plan et mettre en avant, d'une part, l'effet de la polarisation, et d'autre part, les propriétés mécaniques et piézoélectriques sur le fonctionnement de la micro-pince adaptable pour assurer la prise et la dépose des micro-objets de toute forme. Nous avons ensuite corroboré le tout avec l'analyse comparative pour confronter les trois études (analytique, numérique et expérimentale) pour une validation.

Dans un premier temps, les simulations ont été faites sur un seul doigt de la micro-pince piézoélectrique on le modélise par une poutre encasté à l'une de ses extrémités, vue la symétrie du problème. Pour faire simple, le bras déformé par un chargement électrique imposé, est modélisé sans l'organe de serrage. Dans un second temps, nous traitons le problème dans sa globalité en modélisant les différents modes de flexion de la micro-pince PZT. Les données géométriques, les propriétés mécaniques et piézoélectriques des matériaux et les conditions aux limites sont données dans les Figures VI.3, 4, 8 et 11 et le tableau VI.1. Une fois la structure définie, différentes analyses peuvent être effectuées sur la structure suivant l'utilisation que l'on souhaite en faire : statiques, modales ou harmoniques. Nous avons dans notre cas principalement utilisé des simulations statiques puisque nos structures se déforment en mode de flexion simple. Dans ces simulations ne nous tenant pas compte de l'effet de la tension de surface entre les organes de serrage et les micro-objets à manipuler liée au degré d'humidité de ces

éléments, des effets des forces électrostatiques générées par tribo-électrification ou de transfert de charge au moment des contacts et enfin des effets de forces atomiques de Van der Waals.

Les résultats numériques obtenus avec le code d'éléments finis Ansys® ont été finalement comparés aux expériences menées dans les mêmes conditions et couplées à des simulations numériques par éléments finis.

VI.3.1 Doigt piézoélectrique simplement supporté soumis à un champ électrique

Dans cet exemple, nous considérons un doigt de serrage PZT soumis à un champ électrique dont l'élément sensible est une poutre du type encasturé-libre à section rectangulaires d'épaisseur $500\mu\text{m}$, de longueur de 4 mm et de largeur de $200\mu\text{m}$ et orientée selon l'axe O_x (cf.fig.VI.5a). La poutre est modélisée par des maillages irréguliers avec 4468 éléments de type solid226, qui est un élément qui permet de coupler les champs, et qui a donc permis de définir le matériau piézoélectrique. Un potentiel uniforme a été imposé sur l'extrémité libre du doigt PZT pour simuler les électrodes. Il est choisi d'une façon à obtenir un déplacement transversal inférieur à $1\mu\text{m}$ en mode de flexion. La structure géométrique a été construite par extrusion : une surface est définie puis maillée avec les éléments Plane223 de type coque. Cette surface est alors extrudée pour créer un volume avec des éléments volumiques de type solid226. Les éléments de la poutre n'ont donc plus tous la même forme ni la même taille. Nous pouvons voir sur la Figure VI.5b, une poutre PZT de type encasturée libre, simplement maillée sous Ansys®.

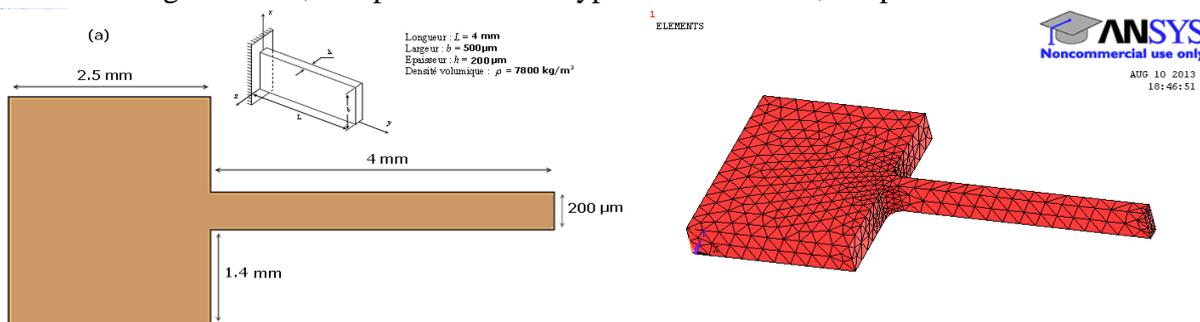


Figure VI.5 : (a) Dimensions en mm de l'un des deux doigts piézoélectrique d'une micro-pince intelligente à serrage parallèle, (b) une poutre PZT de type encasturée libre, maillée sous Ansys®

Pour notre application de micromanipulation, un seul mode de déformation nous sera utile, c'est l'un des deux modes de flexion orthogonaux autour de l'axe O_z de la poutre piézoélectrique, c'est-à-dire, dans le plan du micro-objet à manipuler. Cet élément sensible monolithique est réalisé à partir d'un matériau piézoélectrique déjà présenté en détail dans les chapitres précédents (cf.fig.VI.6). Le doigt PZT est soumis seulement à un champ électrique orienté selon l'axe O_y . Il faudra donc dans ce cas, dans nos simulations par EF, choisir une orientation de la poutre PZT adaptée à cette particularité. Par contre les résultats obtenus seront facilement transposables et l'on pourra comparer les performances des deux matériaux piézoélectriques, le PZT PIC 141 et le PZT PIC 255.

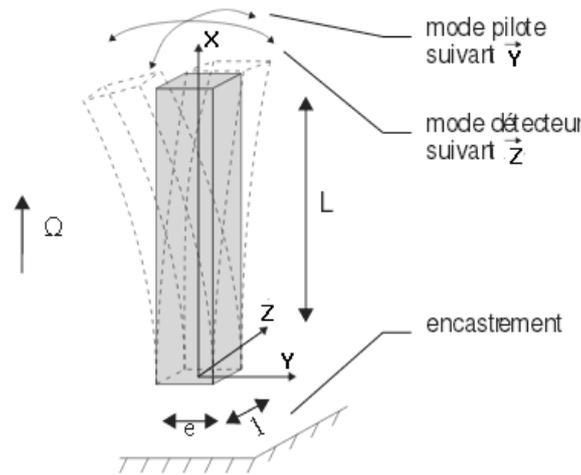


Figure VI.6 : Modèle de l'élément sensible

Des tentatives de simulations numériques ont été réalisées et les premiers résultats apparaissent, sur la Figure VI.7. Sur cette Figure trois modes de déformation obtenus dans différentes conditions sont représentés. Le potentiel électrique uniforme a été imposé sur l'extrémité libre du doigt PZT pour simuler les électrodes. Le mode de déformation qui nous intéresse pour notre application est celui pour lequel les doigts de la micro-pince piézoélectrique fléchissent dans le plan x-y, comme c'est le cas sur la Figure VI.7.b. Le potentiel appliqué dans ce cas est choisi arbitrairement à 100Volts. Sous l'action du champ électrique, l'actionneur piézoélectrique se déforme en flexion soit hors plan x-y ou dans son plan x-y, soit en extension suivant l'axe x.

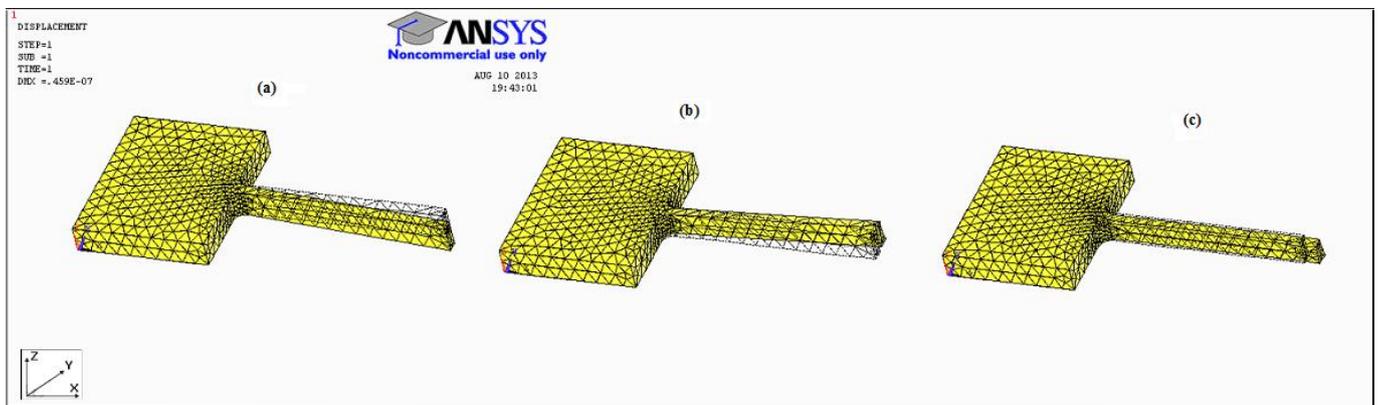


Figure VI.7 : Déformée d'une poutre piézoélectrique de type encastree libre en PZT PIC 141 : (a) en mode de flexion hors plan x-y (b) en mode de flexion dans le plan x-y et (c) en mode proche du mode d'extension

La déformée et le potentiel électrique correspondants au mode de déformation dans le plan x-y sont représentées par les Figures VI.8 et VI.9, respectivement. Le déplacement maxi suivant l'axe y est enregistré à son extrémité libre avec des valeurs plus élevées enregistrées sur le PZT PIC 255 par rapport au PZT PIC 141. Cette réponse dépend directement aux coefficients de couplage [e]. Il a été aussi constaté une diminution graduellement de la valeur du champ électrique traversant le matériau avec une valeur maxi enregistrée à l'extrémité libre et des valeurs nulles au niveau du talon de la micro-pince piézoélectrique.

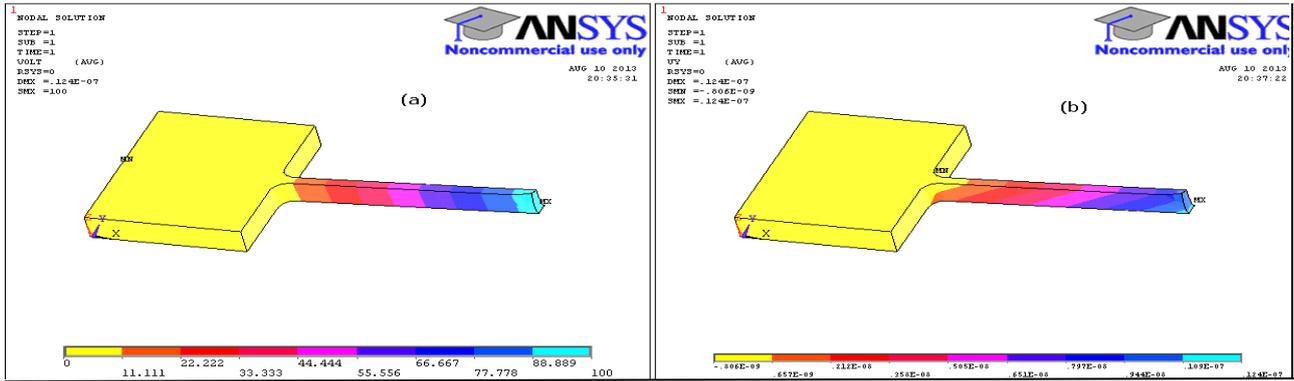


Figure VI.8 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée suivant l'axe y dans Ansys® d'une poutre piézoélectrique de type encastree libre en PIC 141, en mode de flexion dans le plan x-y

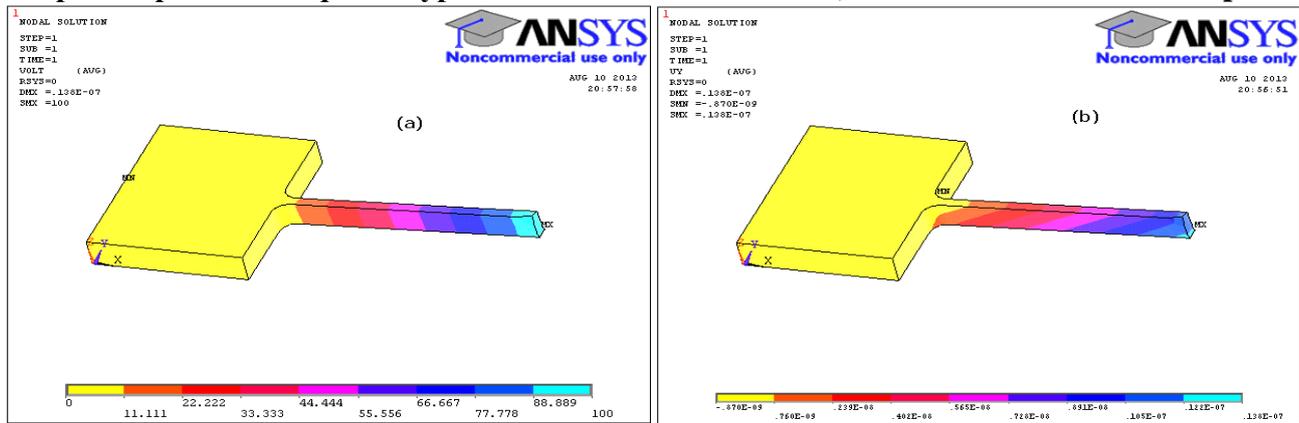
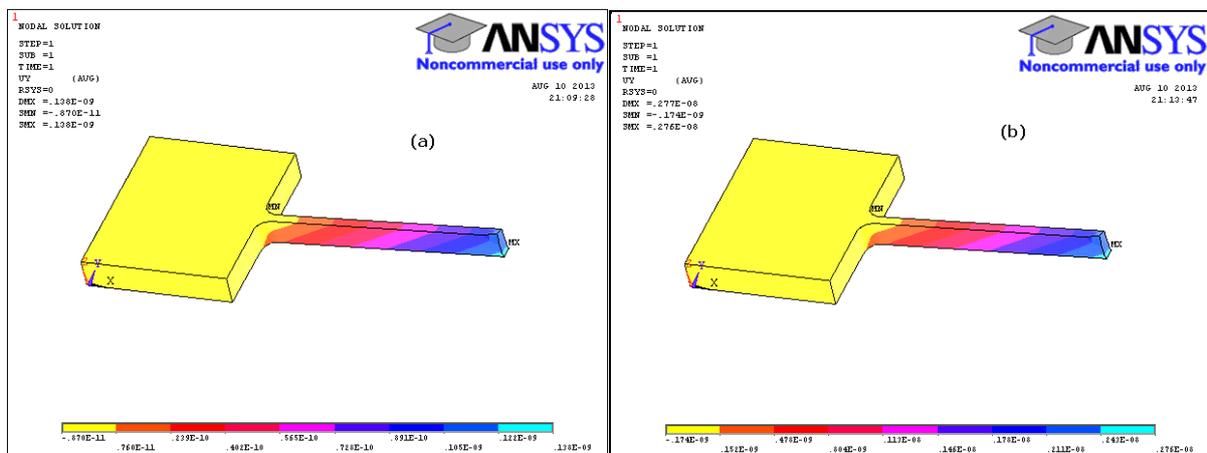


Figure VI.9 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée suivant l'axe y dans Ansys® d'une poutre piézoélectrique de type encastree libre en PIC 255, en mode de flexion dans le plan x-y

Nous avons ensuite étudié l'évolution de la déformée dans les poutres PZT de type encastree-libre, et vérifié que nous avons bien le comportement souhaité avec des contraintes mieux réparties. Nous pouvons voir que cet effet est bien présent avec une meilleure répartition spatiale et une diminution de la valeur de la flèche à l'extrémité libre avec la valeur du champ électrique appliquée comme cela est bien relaté dans la Figure VI.10.



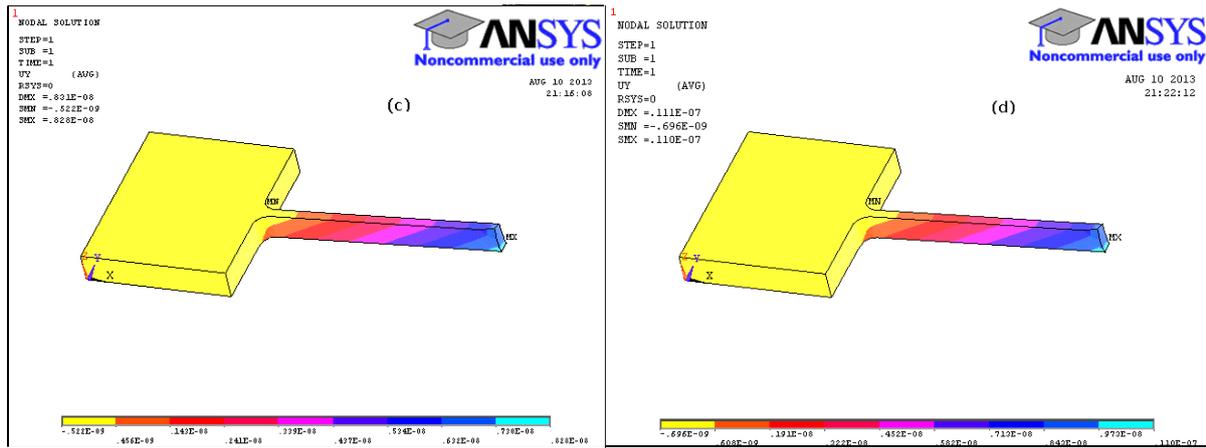


Figure VI.10 : Visualisation de la déformée suivant l'axe y dans Ansys[®] d'une poutre PZT de type encastree libre en PIC 255, en mode de flexion dans le plan x-y soumise à différentes valeurs de tension électrique : (a) 1Volt, (b) 20Volts, (c) 60 et (d) 80Volts

VI.3.2 Validation expérimentale et comparaison analytique

Il est donc très intéressant de valider nos résultats numériques par une seconde campagne couplant résultats expérimentaux et simulations numériques réalisés à l'aide d'un autre logiciel de calcul. Pour pouvoir atteindre cet objectif, il était nécessaire de travailler sur les mêmes structures utilisées soit par [Agnes et al.](#) [AGN 03] ou bien par [Kobayashi et al.](#) [KOB 08] dans leur campagnes d'essais expérimentaux, soit des poutres plus longue et plus rigide comparer aux dimensions des deux doigts piézoélectriques mais pour laquelle les moyens d'acquisition de mesure disponibles sont plus adaptés. Ces études expérimentales ont été utilisées avec le soutien de l'analyse analytique déjà développée au chapitre IV, pour valider notre modèle EF 3D sous Ansys[®].

La géométrie de la poutre est donnée sur la Figure VI.11.a. La poutre est considérée purement élastique avec une masse volumique égale à 7.8 g/cm^3 . Les propriétés physiques et électriques du matériau PZT sont illustrées dans la Table IV.1. La poutre est modélisée en 3D à l'aide du logiciel Ansys[®] en utilisant l'élément quadratique SOLID226 à 20 nœuds; un aperçu de la structure maillée est présenté dans la Figure VI.11.b. Le maillage EF a 1887 nœuds et 835 éléments. Les mêmes conditions aux limites mécaniques et électriques appliquées à la poutre instrumentée sont alors imposées à cette poutre PZT. La poutre finalement fléchit lorsqu'elle est soumise à un champ électrique. La Figure VI.12 montre la déformée de la poutre piézoélectrique obtenue sous Ansys[®].

Le potentiel électrique et la déformée de la poutre longue modélisé sous Ansys[®] sont illustrés dans la Figure VI.13 en mode de flexion. La zone la plus sollicitée est clairement l'extrémité libre de la poutre piézoélectrique qui correspond au point d'application de la tension électrique.

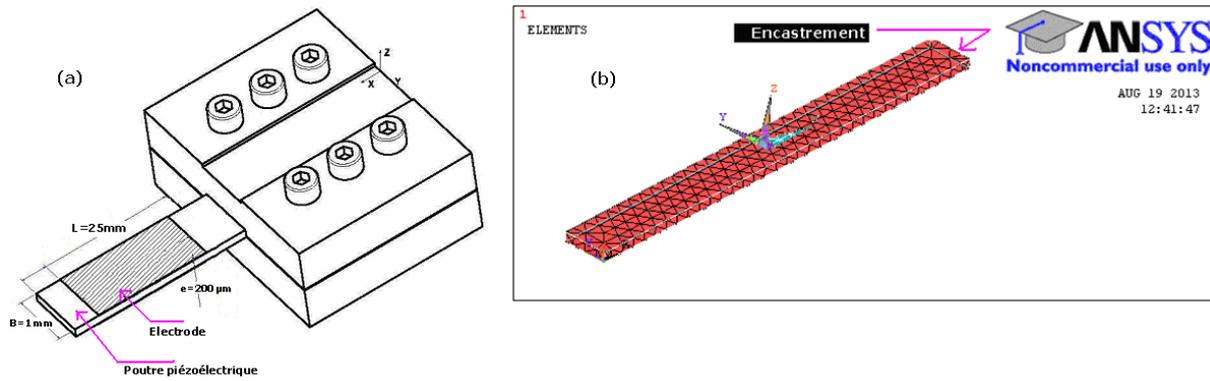


Figure VI.11 : (a) Vue isométrique du dispositif expérimental (dimensions en mm), (b) maillage EF 3D sous Ansys® de la poutre encastree libre

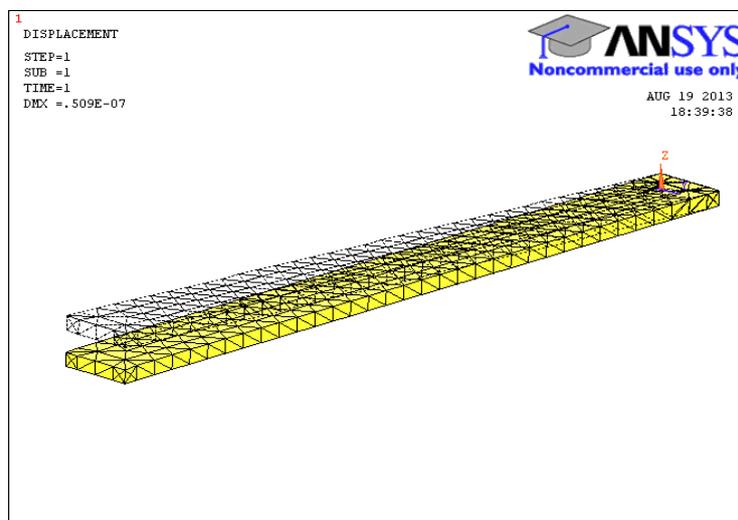


Figure VI.12 : Visualisation de la déformée suivant l'axe z du modèle 3D pour le cas d'une poutre PZT de type encastree/libre

Les résultats obtenus suite à l'étude de la poutre longue en contraintes planes sont très satisfaisants puisqu'ils sont très proches aux résultats du modèle numérique obtenus par Agnus et al. [AGN 03] (cf.fig.VI.14). Ainsi, l'écart entre les trois courbes modélisées ne dépasse pas 1%. La simulation par éléments finis et le modèle analytique sont cohérents. Les deux modèles montrent des comportements équivalents, ce qui permet de prendre l'un ou l'autre modèle pour les études de sensibilité. L'utilisation des éléments finis paraît plus souple et est conservée. Une fois validée, le modèle EF sera utilisé pour modéliser les différentes étapes de micromanipulation de micro-objets de différentes formes, c-à-d le serrage, maintien, posage et desserrage à faible pression.

Chapitre VI : Modélisation et simulation numérique de la déformée d'un microsystème intelligent pour la micro-robotique

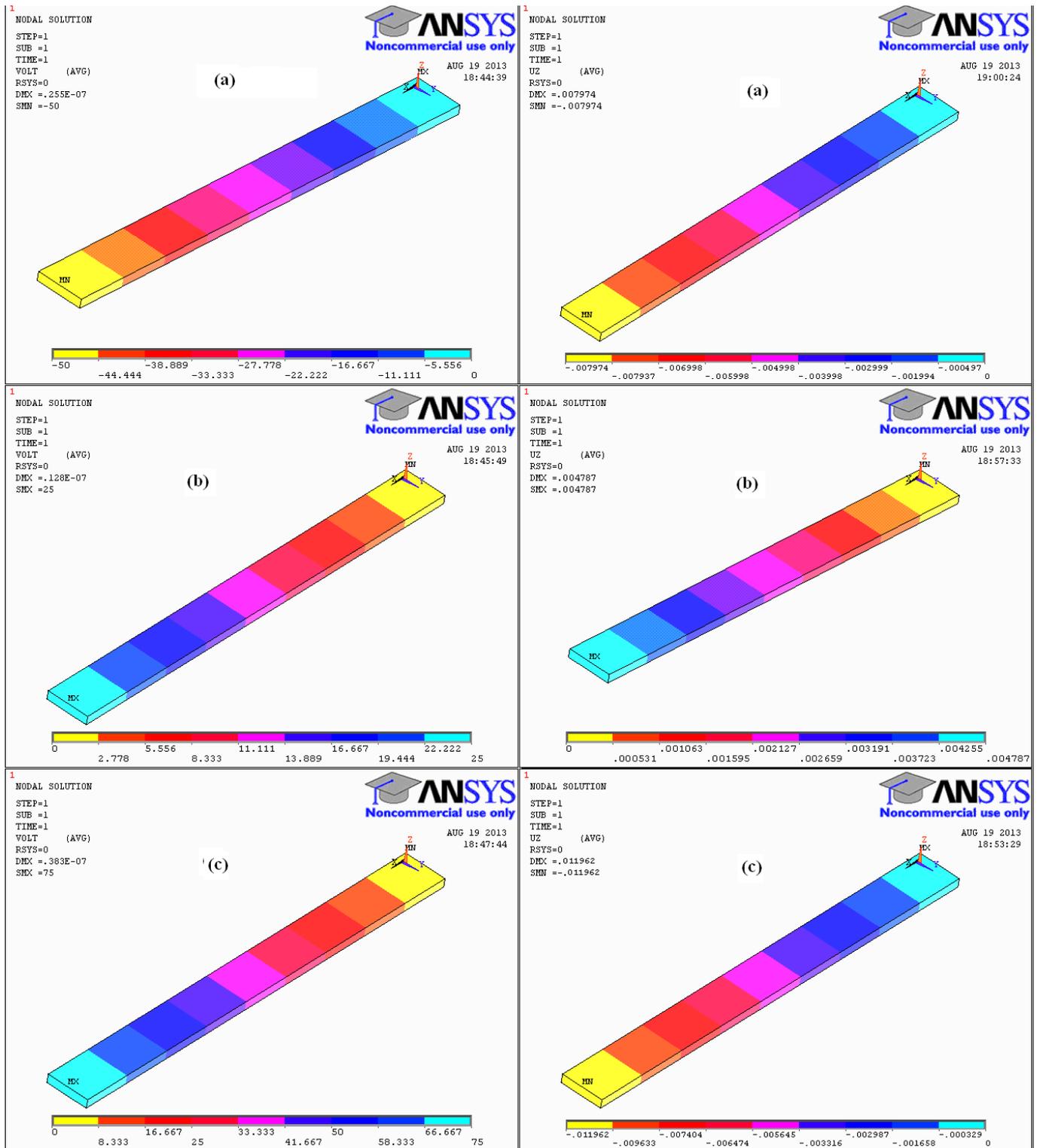


Figure VI.13 : Visualisation de la déformée et du potentiel électrique du modèle EF 3D pour le cas d'une poutre de type encastree/libre soumise à différentes valeurs de tensions électriques : (a) -50 volts, (b) 25 volts et (c) 75 volts

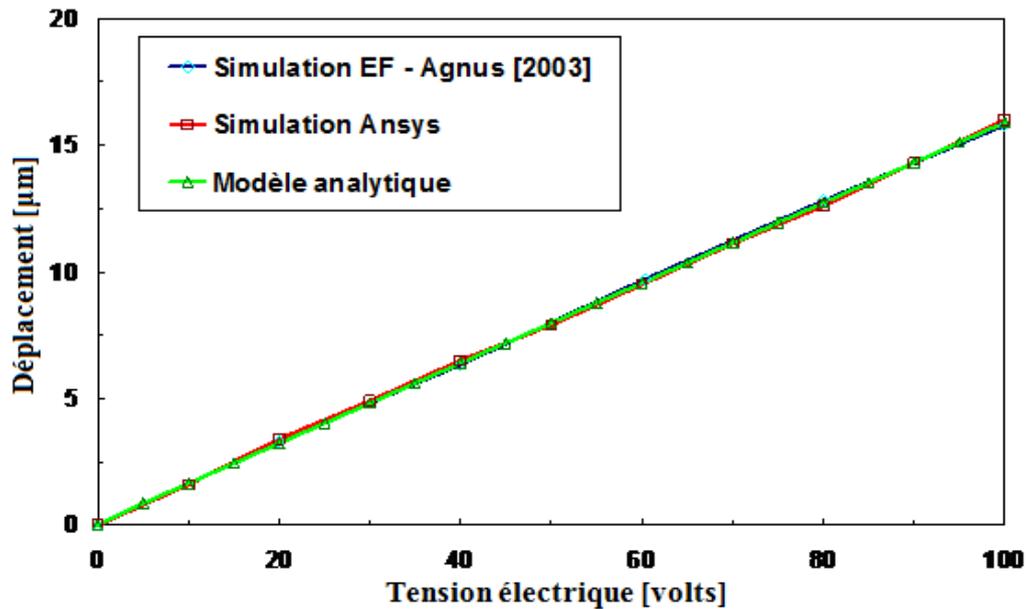


Figure VI.14 : Déflexion libre d'une poutre piézoélectrique en fonction de la tension électrique

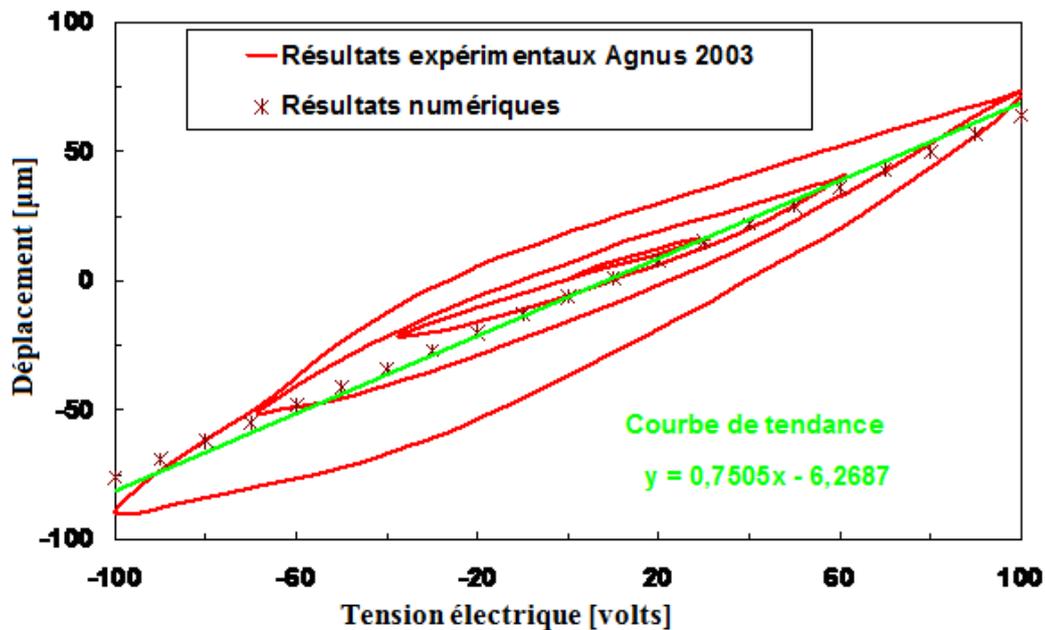


Figure VI.15 : Cycle d'hystérésis d'une poutre piézoélectrique commandé en tension électrique

Enfin, deux courbes comparatives montrent l'évolution de la déformée d'une poutre PZT pour notre approche numérique réalisée sous Ansys® et comparée aux valeurs expérimentales obtenues par Agnus et al. [AGN 03] et de Kobayashi et al. [KOB 08] et les courbes obtenues sont reportées respectivement sur les Figures VI.15 et VI.16. Les courbes issues des simulations par EF et les expériences ont les mêmes tendances. Nous nous sommes fixés dans le cadre de cette étude un objectif qui consiste à travailler avec un comportement statique linéaire fiable obtenu facilement avec des commandes à charge constante. Le problème à résoudre dans ce cas consiste à linéariser le phénomène d'hystérésis entre la tension électrique appliquée et les déformations engendrées qui nous permet d'améliorer le comportement des micro-pinces piézoélectriques (cf.fig.VI.17).

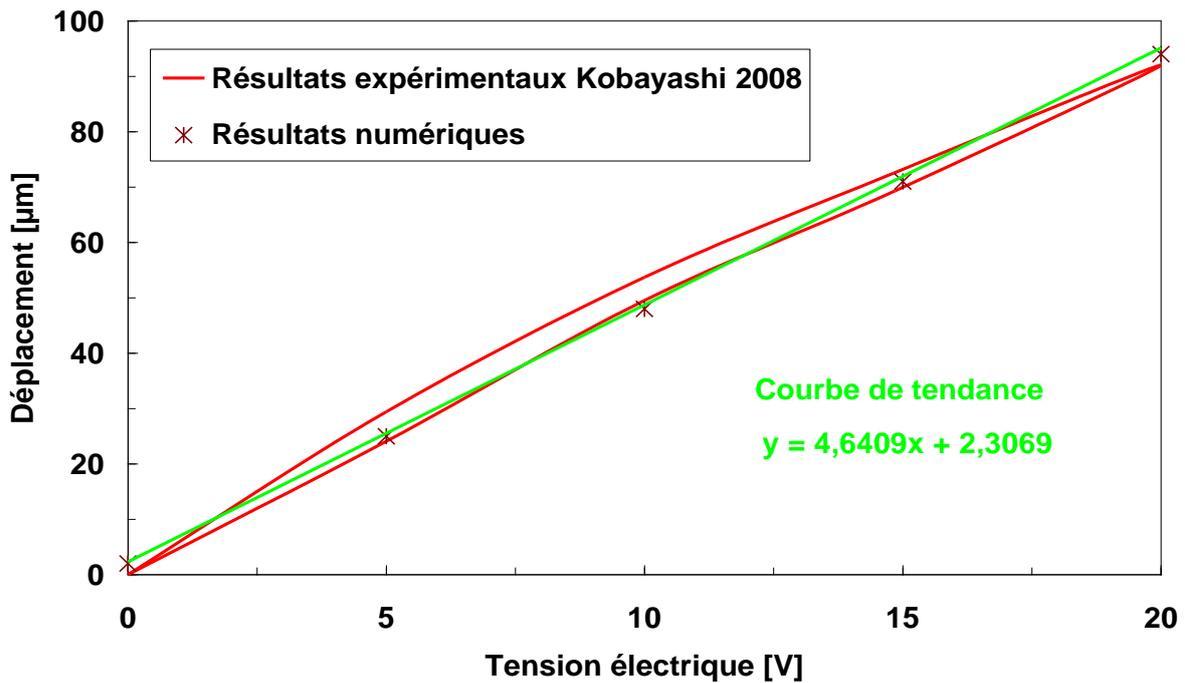


Figure VI.16 : Cycle d'hystérésis d'une poutre piézoélectrique commandé en tension électrique

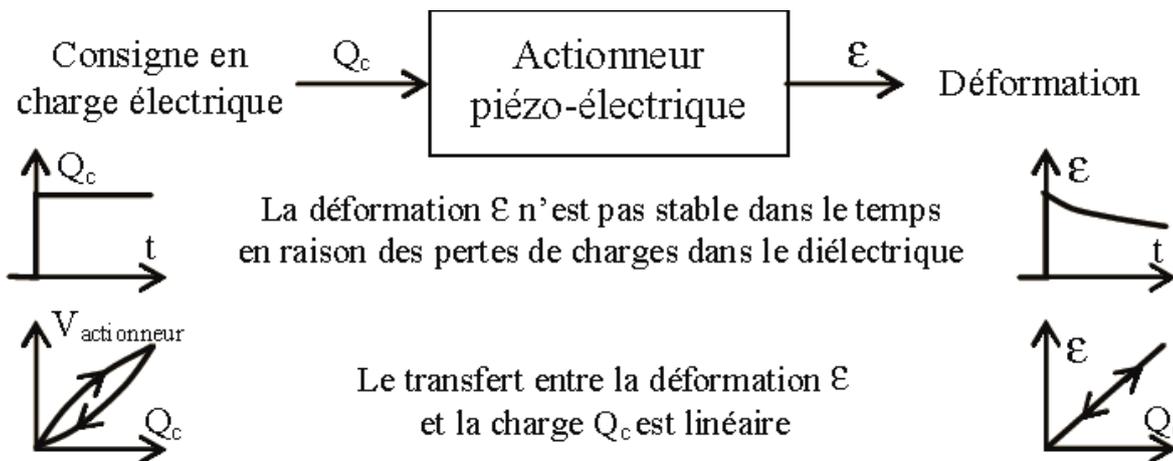


Figure VI.17 : Commande à tension constante d'un actionneur piézoélectrique

VI.3.3 Micro-pince piézoélectrique à deux doigts de serrage soumise à un champ électrique

VI.3.3.1 Modèle EF sans organes terminaux

Sur la base du modèle présenté aux sections précédentes, il nous semble utile à ce stade d'étudier et d'estimer les performances attendues d'un tel microsysteme intelligent dans le domaine de la micromanipulation. Pour cela nous reprenons les mêmes données matériaux relatées au tableau VI.1. Ce cas d'étude permet de vérifier le bon fonctionnement de la micro-pince piézoélectrique avec un mode de flexion plane bien adapté à notre application.

La Figure VI.18 montre la géométrie et les conditions aux limites d'une micro-pince intelligente à deux doigts de serrage de type encasturé/libre soumise à un champ électrique imposé à l'extrémité libre. Les deux doigts piézoélectriques ont la même épaisseur, la même longueur et la même largeur (cf.fig.VI.18a). Pour les conditions d'encastrement, on considère que la micro-pince PZT est encasturée au niveau du talon (cf.fig.VI.18.b). La structure a été discrétisée de la même manière que l'exemple précédant de la section VI.2.1 en utilisant des éléments solides quadratiques (20 nœuds) de sorte que le modèle EF résultant a 6846 éléments SOLID226 et 11385 nœuds. L'intégration réduite (IR) est activée par défaut pour les EF couplés dans Ansys®.

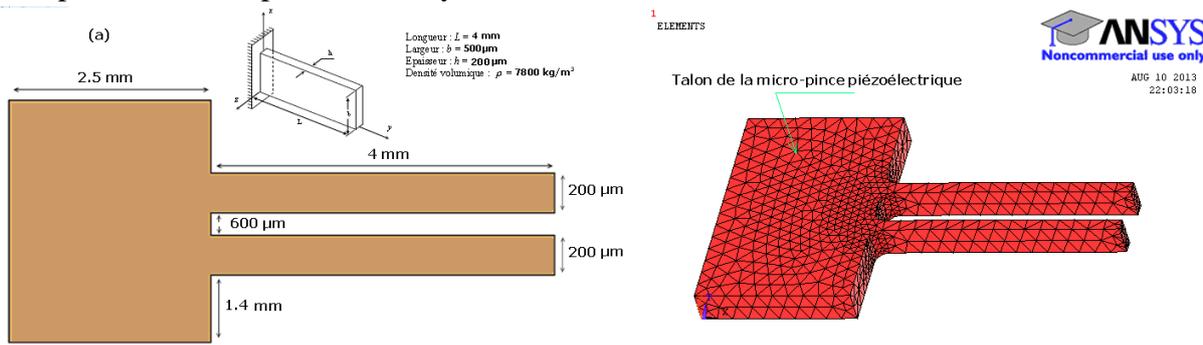


Figure VI.18 : (a) Dimensions en mm de la micro-pince piézoélectrique à serrage parallèle et (b) maillage de la structure de type encasturée libre sous Ansys®

Sur la Figure VI.19 sont représentés deux modes de déformations libres obtenus dans différentes conditions. Le mode de déformation qui nous intéresse est celui pour lequel les deux doigts de la micro-pince piézoélectrique fléchissent en sens inverse et dans le même plan x-y afin de bien saisir et déposer des micro-objets de différentes formes, comme c'est le cas sur la Figure VI.19.a. Concernant le deuxième mode de flexion, les deux doigts de la micro-pince se déforment aussi en opposition de phase, mais transversalement au plan x-y, c-à-d une flexion hors plan. Cette dernière est considérée comme un mode indésirable pour notre application (cf.fig.VI.19.b).

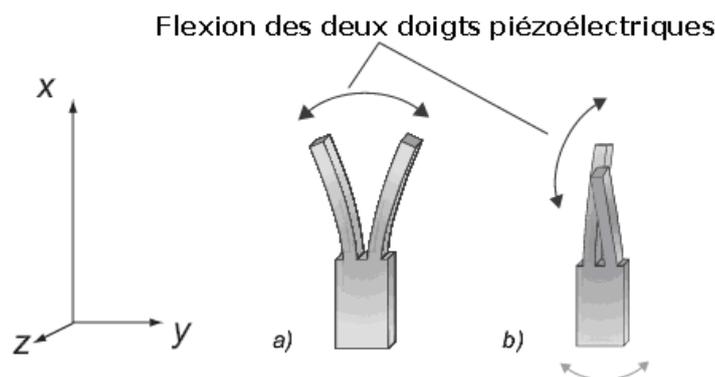


Figure VI.19 : Modes de déformation de deux doigts piézoélectrique d'une micro-pince adaptable : a) flexion dans le plan x-y ; b) flexion hors plan x-y

De par sa symétrie la micro-pince piézoélectrique présente l'avantage notable d'être mécaniquement équilibrée pour ce qui concerne le mode de flexion. Cette caractéristique assurerait de façon pratique, la possibilité de fixer la micro-pince PZT au support par son embase tout en profitant du bon découplage mécanique de ce mode, qui ainsi confiné, ne transmettrait pas d'énergie au support. La Figure VI.20 présente les six modes de déformation de la micro-pince PZT. Ces déformées sont obtenues en modifiant

la configuration des électrodes et le sens de polarisation de la poutre. La technique de conservation ou d'inversion de l'orientation (polarisation) des doigts PZT dans Ansys[®], consiste à remplir la matrice piézoélectrique [e], respectivement, par des valeurs positives ou négatives. Dans le cas d'une polarisation identique, les deux doigts ont la même orientation et donc la même matrice piézoélectrique [e]. Pour la polarisation opposée, les orientations des doigts sont opposées et chaque poutre a sa matrice piézoélectrique avec des signes opposés.

Les résultats relatés dans la Figure VI.20, sont présentés mode par mode, et systématiquement pour les deux doigts piézoélectriques en configurations serrage et desserrage. Les deux premiers modes correspondent principalement à l'extension et à la contraction des deux doigts piézoélectriques suivant l'axe x avec un coefficient de couplage électromécanique très faible. Ce mode peut nous servir pour déplacer les micro-objets vers l'avant ou vers l'arrière. Deux modes suivants correspondent à la déformée des deux doigts piézoélectriques hors plan x-y (cf.fig.VI.20.c et d). Le mode de flexion de la Figure VI.20.c peut nous servir à soulever les micro-objets. La Figure VI.20.e présente une flexion dans le même plan x-y et même sens. Ce mode peut nous servir pour déplacer les micro-objets après serrage, à gauche ou à droite. Enfin, le mode de déformation le plus intéressant et le plus utilisé en micromanipulation est illustré dans la Figure VI.20.f qui permet d'assurer le serrage, le maintien et aussi le desserrage, c'est le mode de flexion dans le plan x-y avec deux doigts fléchis dans le sens opposé. Il est intéressant de signaler que pour les modes de flexion, le coefficient de couplage piézoélectrique est assez élevé.

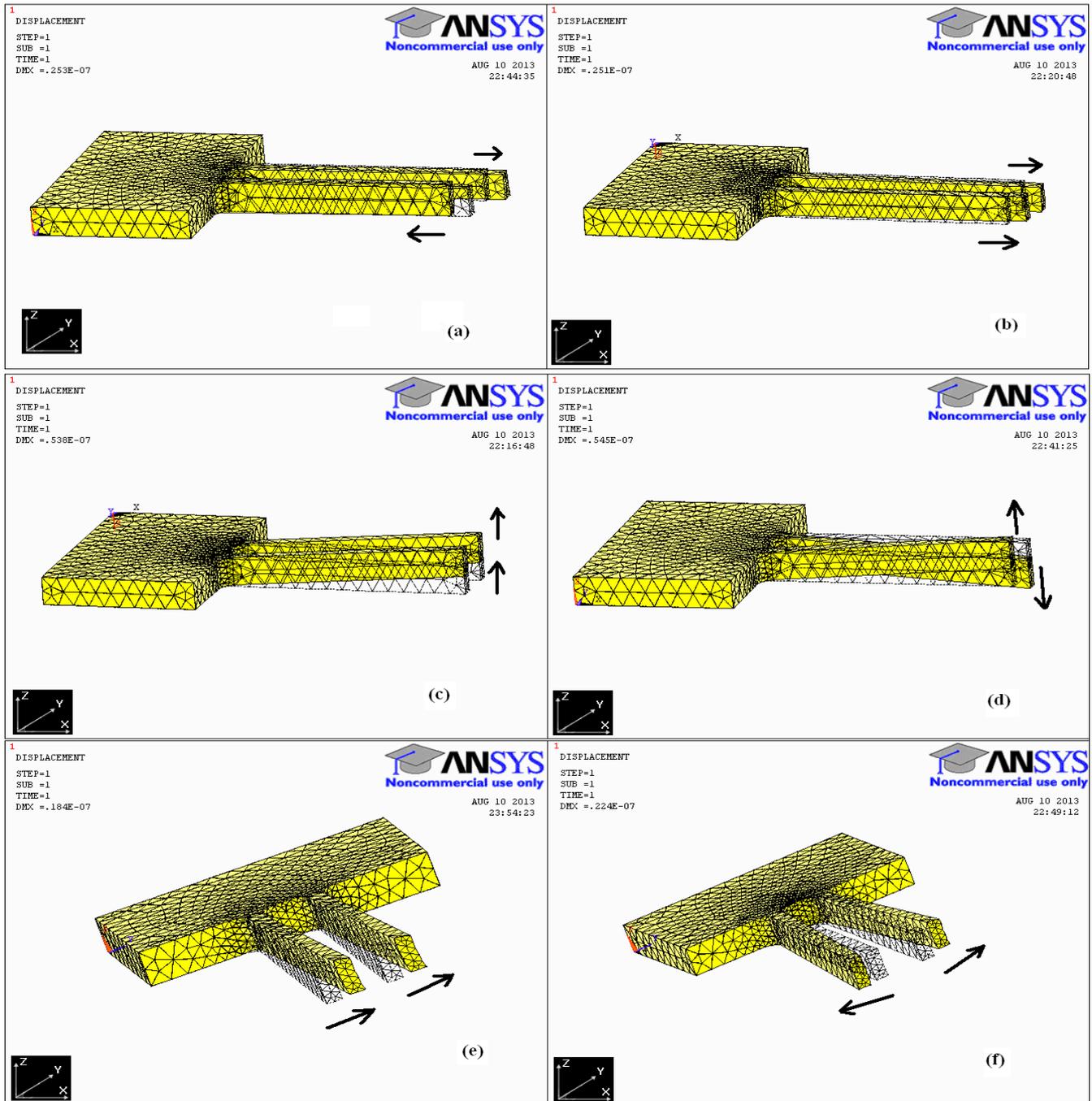


Figure VI.20 : Six modes de déformation caractéristiques de la micro-pince piézoélectrique : a) extension/contraction, b) extension/extension ou contraction/contraction, c) flexion hors plan x-y avec deux doigts PZT déformés dans le même sens, d) flexion hors plan x-y avec deux doigts PZT déformés dans deux sens opposés, e) flexion dans le plan x-y de deux doigts – même sens et f) flexion dans le plan x-y de deux doigts PZT– sens opposé

Les résultats de la modélisation numérique présentés à la Figure VI.21, permettent de constater que la déformation obtenue est très faible, elle est de l'ordre de quelques nanomètres ce qui correspond à ceux obtenus par Kobayashi et al. [KOB 08] et Agnus et al. [AGN 03]. La Figure VI.21 présente à titre d'exemple des isovaleurs du déplacement U_y dans la micro-pince adaptable possédant des polarités différentes et soumise à un champ électrique de 100Volts.

Nous avons remarqué bien que l'orientation polaire des doigts piézoélectriques a une influence majeure sur le comportement final de la micro-pince adaptable. Ces résultats fournis par notre modèle EF, nous ont permis de plus, de vérifier le bon fonctionnement de la micro-pince PZT avec un bon confinement de l'énergie volumique dans la structure PZT. Le modèle EF permet de simuler les deux fonctions de base qui nécessitent une grande dextérité, soit l'ouverture et la fermeture des deux doigts PZT. Enfin, ces microsystèmes possèdent une autre qualité, de fait qu'on peut même actionner chaque doigt indépendamment de l'autre en fonction du besoin de micromanipulation des micro-objets.

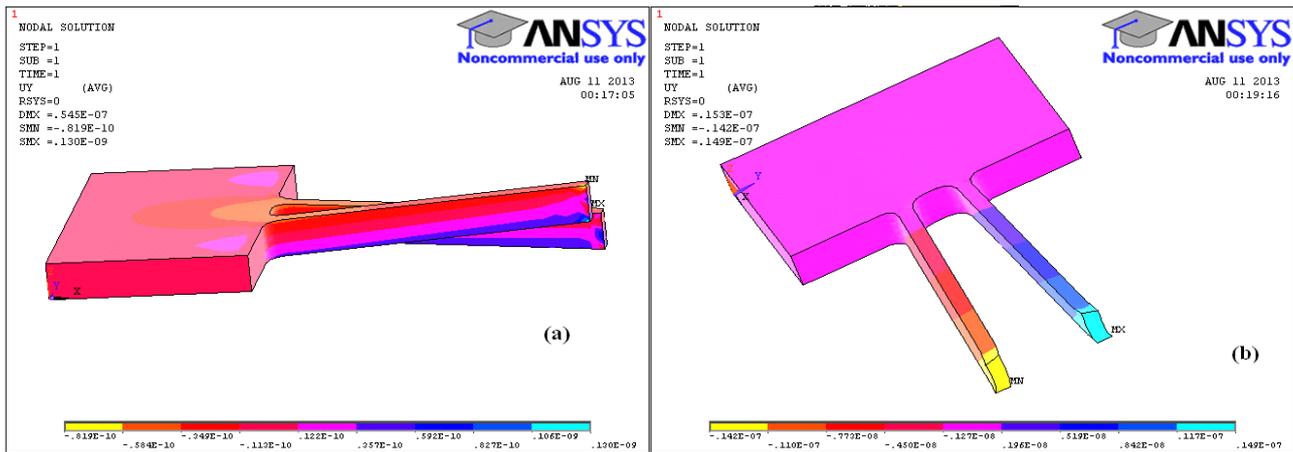


Figure VI.21 : Isovaleur de déplacement dans une micro-pince piézoélectrique soumise à un champ électrique de 100 Volts : a) flexion hors plan x-y des deux doigts PZT et orientés dans deux sens opposés, b) flexion dans le plan x-y des doigts PZT – même sens d'orientation

VI.3.3.2 Modèle EF avec organes terminaux

Un moyen simple pour manipuler des micro-objets consiste à utiliser une micro-pince piézoélectrique à deux doigts de serrage comme cela a été rapporté précédemment. Celle-ci peut, dans sa version la plus dépouillée, être constituée de deux poutres encastées capables de se déplacer en flexion. Grâce à ces mouvements, la saisie du micro-objet est plus aisée mais si les extrémités des poutres piézoélectriques restent parallèles entre elles. Pour éviter ainsi les mouvements brusques de fuite du micro-objet en envisage d'utiliser des organes terminaux. On aboutit alors à la configuration représentée sur la Figure VI.22.a. La micro-pince en matériau piézoélectrique et les organes terminaux en polymère thermoplastique ont été assemblés par collages au niveau de la jonction. L'ensemble a été discrétisé en utilisant des éléments solides quadratiques (20 nœuds) de sorte que le modèle EF résultant a 6846 éléments SOLID226 et 11385 nœuds. Les organes terminaux ont été maillée en utilisant des éléments solides quadratiques avec 9726 éléments SOLID186 et 16083 nœuds. Le modèle par éléments finis compte 16572 éléments et 27468 nœuds. L'élément SOLID186, est un élément purement mécanique tandis que l'élément SOLID226 est un élément qui permet de coupler les champs, et qui a donc permis de définir le matériau piézoélectrique dans le modèle proposé. L'option de l'intégration réduite (IR) a été activée pour l'EF élastique, car Ansys® l'utilise par défaut, pour les EF piézoélectriques couplés. La Figure VI.22 montre la géométrie des deux doigts piézoélectrique en configuration parallèle, encastés au niveau du talon de la micro-pince PZT et libres sur l'autre extrémité.

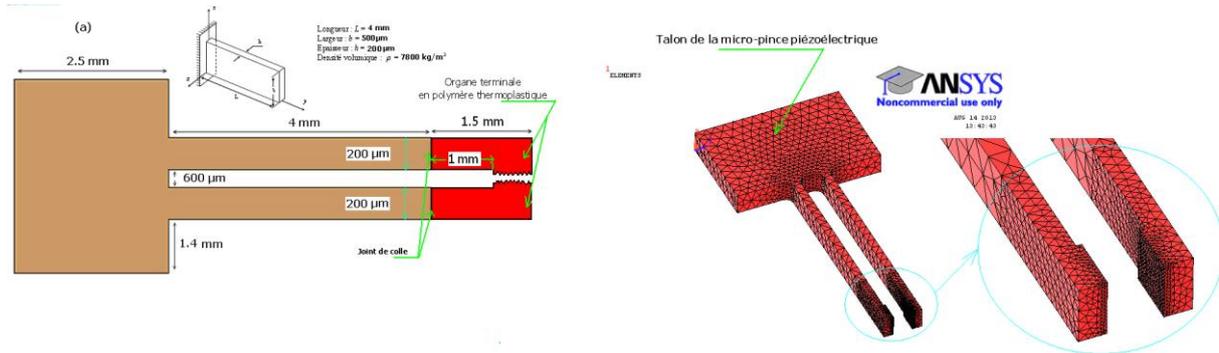


Figure VI.22 : (a) Dimensions en mm de la micro-pince piézoélectrique à serrage parallèle avec organes terminaux et (b) maillage de la microstructure adaptable de type encastrée libre sous Ansys®

Des simulations par EF de la micro-pince piézoélectrique ont été considérées en faisant varier la tension électrique entre -100 à 100 Volts, chaque doigt PZT présente une flexion dans le plan x-y avec une flèche maxi de l'ordre de $\pm 0,15 \mu\text{m}$, soit $0,30 \mu\text{m}$ maxi en tout. La course totale d'ouverture et de fermeture de la micro-pince PZT est de l'ordre de $500 \pm 0,30 \mu\text{m}$. Comme la distance entre les doigts PZT est un paramètre de conception de la micro-pince piézoélectrique, il est alors possible de manipuler des composants dont la taille peut varier de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres, voire le millimètre. Des simulations préliminaires par EF du modèle ont été considérées en premier lieu sans définir les contacts entre les doigts PZT et les éléments de serrages assemblés par collage. Les iso-valeurs de la Figure VI.23 montrent bien l'évolution du champ électrique dans la micro-pince PZT avec une valeur nulle enregistrée sur les organes terminaux ce qui est tout à fait logique puisque à la base ils sont fabriqués en polymères thermoplastiques. La flèche maxi est observée comme prévue à l'extrémité libre des doigts PZT avec un déplacement nul enregistré au niveau des organes terminaux puisque ces derniers ne sont pas liés à l'ensemble du microsystème.

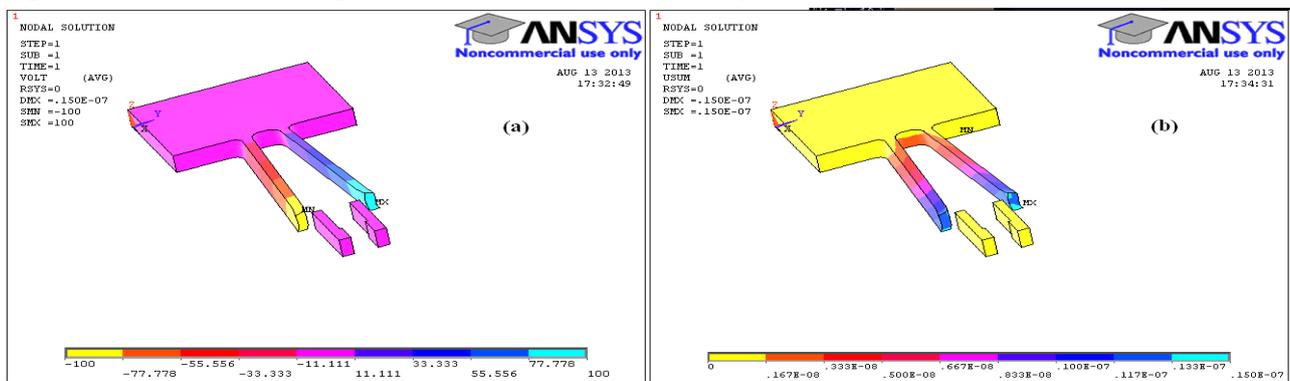


Figure VI.23 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée globale d'une poutre piézoélectrique en PZT PIC 255 avec organes terminaux en mode de flexion dans le plan x-y

Pour résoudre ce problème et définir la liaison par collage entre ces éléments, des éléments de contact de type CONTACT174 (Contact, surf-to-surf à 8-nœuds) ont été utilisés. Les éléments CONTACT174 sont généralement destinés à être utilisés pour des contacts rigide-souple ou flexible. Ils peuvent être utilisés aussi pour représenter le contact et le glissement en 3D entre deux surfaces (cf.fig.VI.23). Le frottement entre ces corps est un frottement de type Coulomb, avec un coefficient de frottement très élevé pour définir un contact parfait. Dans nos simulations numériques, la liaison par collage entre les doigts PZT et les organes terminaux en polymère thermoplastique a été finalement considéré comme un contact rigide parfait.

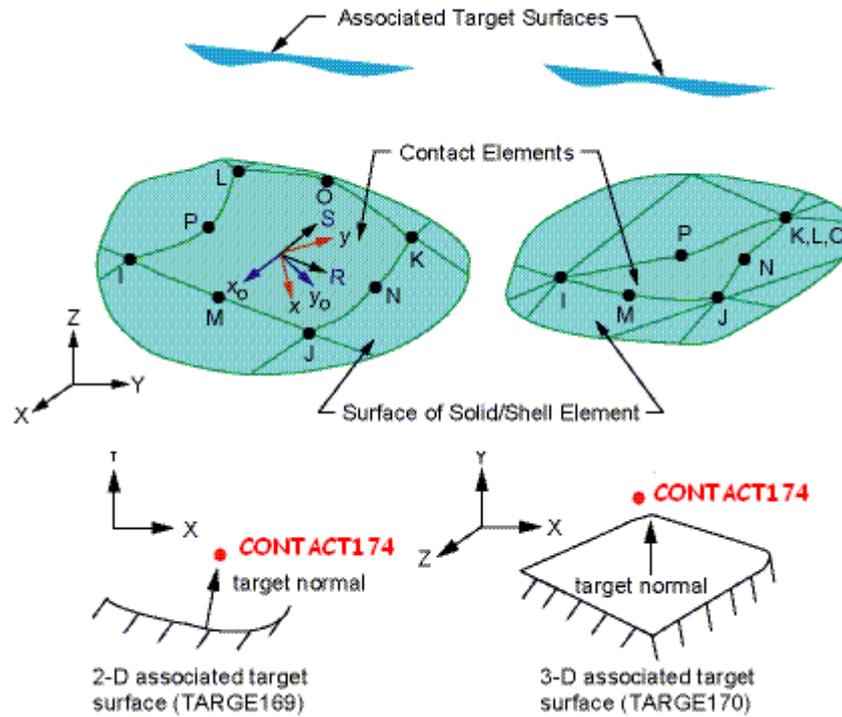


Figure VI.24 : Schéma descriptif de la géométrie des éléments de contact de type CONTACT174

Une fois que toutes ces étapes ont été effectuées, le calcul du champ électrique et de la déformée des doigts piézoélectriques à l'équilibre peut être lancé. Le contacte surface/surface entre doigts PZT et organes terminaux thermoplastiques a été finalement considéré dans nos simulations comme cela est bien illustré sur la Figure VI.24.a. Les premiers résultats en termes de déformation dans le plan x-y de la micro-pince piézoélectrique avec une polarisation identiques des deux doigts sont illustrés dans les Figure VI.24.b et VI.25.

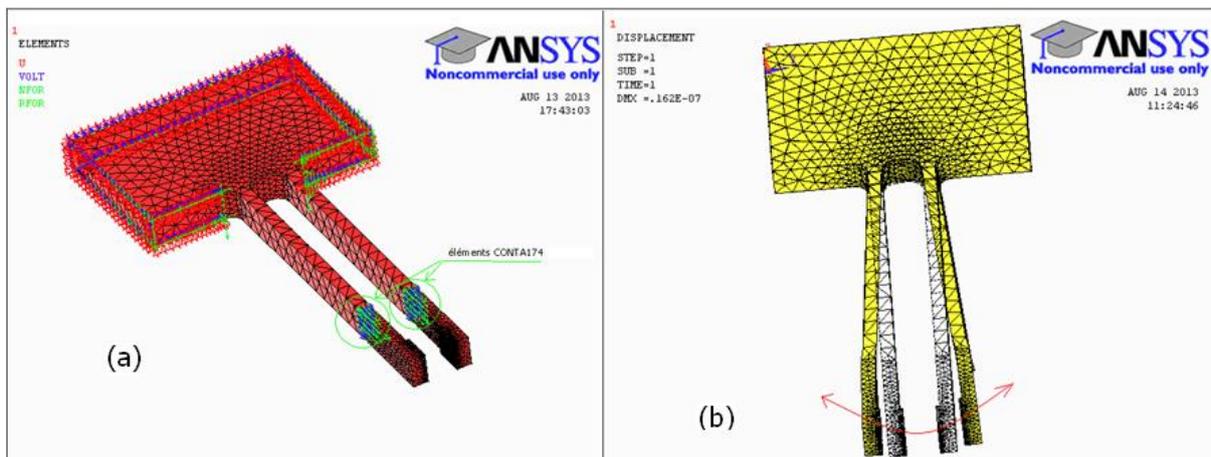


Figure VI.25 : (a) Discrétisation de la micro-pince PZT à serrage parallèle avec la prise en compte des éléments de contact de type CONTACT174, (b) mode de déformation de la micro-pince piézoélectrique en mode de flexion dans le plan x-y

Les résultats du modèle EF avec la prise en compte du contact de la micro-pince piézoélectrique soumise à un champ électrique de 100Volts sont représentés dans la Figure VI.26. Elle montre d'une part la distribution du potentiel électrique et d'autre part le déplacement global dans le système intelligent et cela avec les nouvelles conditions imposées au niveau du joint de colle. Sur cette Figure, il est évident

Chapitre VI : Modélisation et simulation numérique de la déformée d'un microsystème intelligent pour la micro-robotique

que l'homogénéité de la distribution du potentiel électrique au niveau des doigts piézoélectriques est respectée avec la prise en compte d'un contact parfait de type surface/surface défini par les éléments de contacts de type CONTACT174. Concernant le déplacement globale de la Figure VI.26.b, on constate aussi une bonne continuité au niveau du joint de colle, signe d'une liaison bien définie avec les paramètres de contact choisis entre doigts PZT et éléments de serrages thermoplastiques. Cependant, des déformations de l'ordre de 0.001% ont été calculées pour une tension de 10Volts. Ce débattement peut être amplifié en augmentant la valeur de tensions électrique appliquée. La flexion obtenue dépend fortement de la souplesse des deux doigts piézoélectriques, c.-à-d. le choix du matériau piézoélectrique souple ou rigide. On peut déjà conclure que ces micro-pinces piézoélectriques possèdent une résolution de positionnement très haute, inférieures au micron, typiquement de l'ordre de 100nm ou moins. Cette solution vienne au secours des robots classiques trop imposants et peu précis pour réaliser de telles tâches.

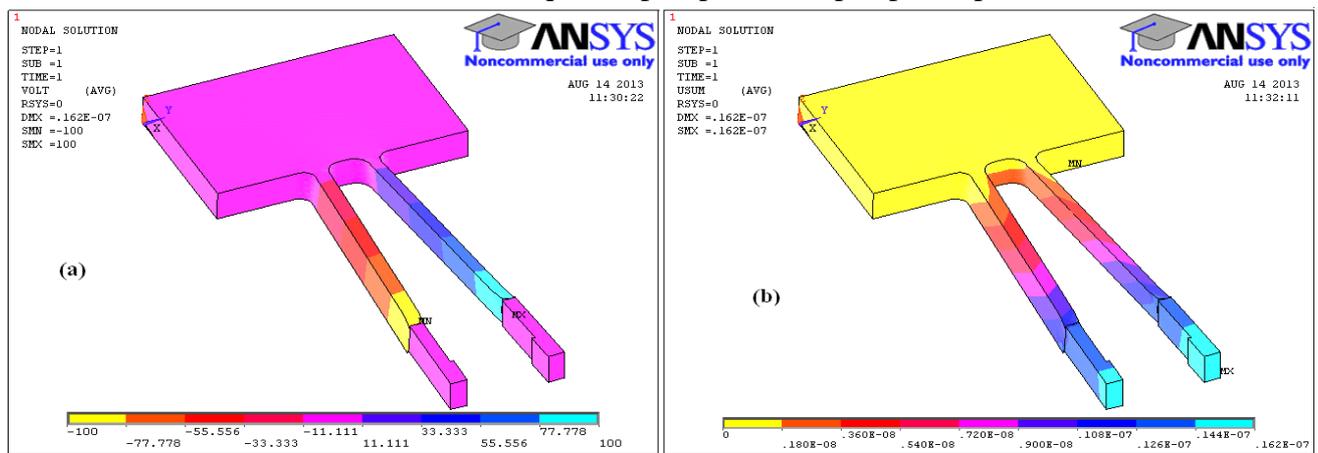


Figure VI.26 : Visualisation du potentiel électrique et de la déformée globale obtenus sous Ansys[®] d'une poutre piézoélectrique en PZT PIC 255 liée par une liaison parfaite aux organes terminaux

Faisant varier maintenant la valeur du coefficient de contact entre 0,6 à 1 qui correspond à l'épaisseur de la colle, nous avons constaté que la flexion est beaucoup plus sensible puisque nous avons calculé une perte de l'ordre de 12,3 % par rapport à la flexion analytique. En conclusion, l'épaisseur de colle doit être la plus fine possible, ce qui était un résultat prévisible mais que nous avons ici quantifié. La Figure VI.27 montre la symétrie de la densité du flux d'énergie électrique dans les deux doigts d'une micro-pince PZT.

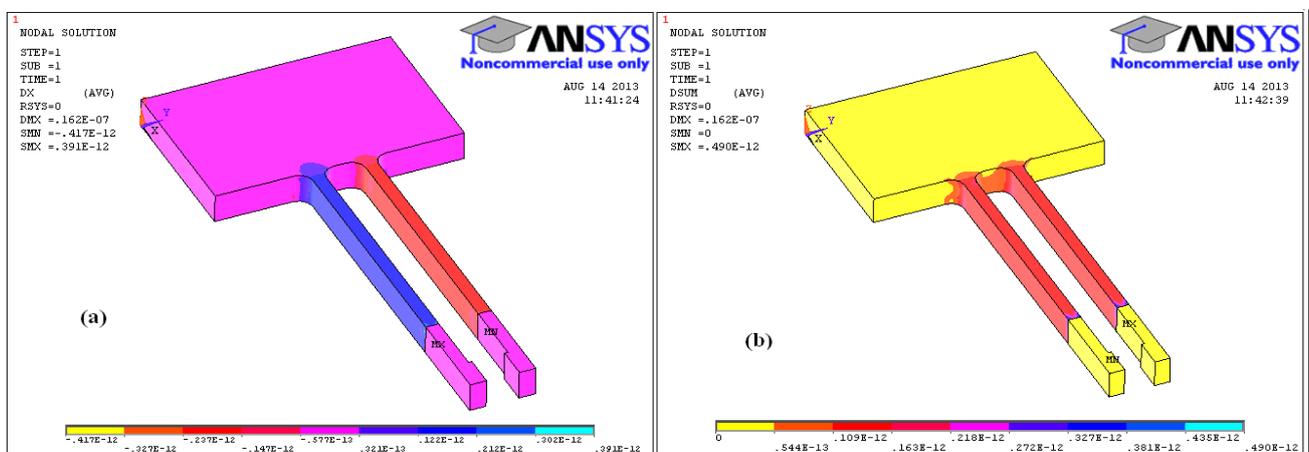


Figure VI.27 : Visualisation de la densité du flux électrique (a) suivant l'axe y et (b) densité globale obtenue par modélisation sous Ansys[®] d'une poutre piézoélectrique en PZT PIC 255

VI.3.4 Exemple d'application à la manipulation de micro-objets

Dans le but de simuler des tâches complètes de micromanipulation non destructives sur des objets de petites tailles, des simulations numériques à l'aide du modèle EF développé ont été lancés. Ces simulations nous ont permis de décrire le comportement de ces micromanipulateurs, utilisant des poutres piézoélectriques et de mesurer les efforts exercés sur ces micro-objets à manipuler.

La Figure VI.28 présente deux exemples à modéliser sous Ansys® pour effectuer des tâches de prise-dépose. La micro-pince adaptable est actionnée grâce à l'effet inverse de la piézoélectricité. L'ouverture et la fermeture du microsystème est effectué en faisant passer un courant électrique dans la micro-pince. Dans ce type de manipulateurs, il est même possible d'actionner un doigt individuellement, ce qui permet de résoudre un certains cas des problèmes de préhension (position du micro-objet par rapport aux doigts de la pince...etc.).

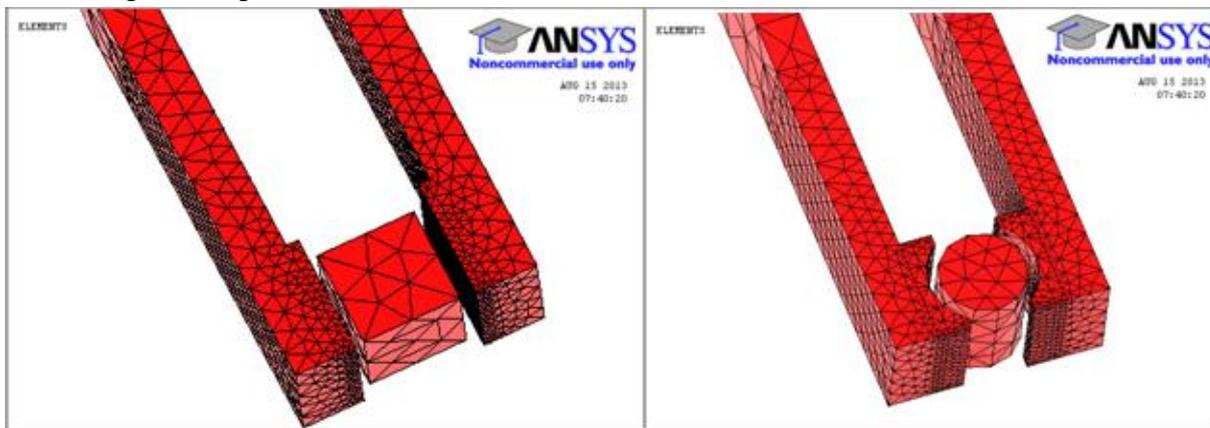


Figure VI.28 : Maillage 3D de la micro-pince piézoélectrique à serrage parallèle équipée de deux organes terminaux pour manipuler des micro-objets de forme cube de 400 μm de cote ou de forme cylindre de 400 μm de diamètre et de 500 μm de hauteur

Grace à l'utilisation des matériaux piézoélectriques dans ces micromanipulateurs, des actions élémentaires telles que la prise, le transport et la libération sans détérioration des micro-objets est maintenant facilement réalisable. L'utilisation des organes de serrage qui interagit directement avec ces micro-objets à manipuler rend la tâche plus facile, comme cela est visible sur les premiers résultats de simulation par EF relatés dans la Figure VI.29.

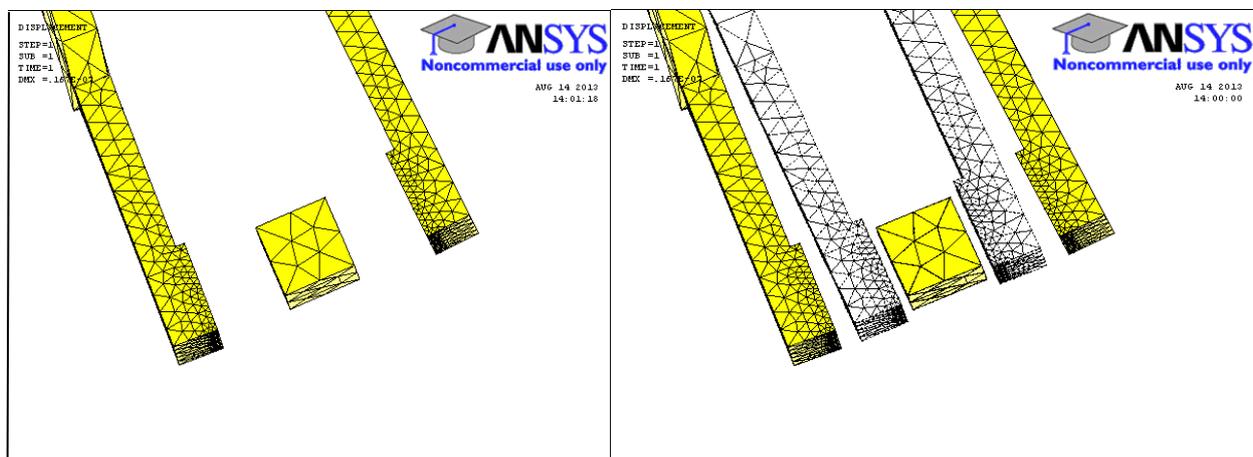


Figure VI.29 : Visualisation de l'étape de fermeture et serrage à faible pression d'un micro-objet de forme cubique de 400 μm de cote sous Ansys®

Chapitre VI : Modélisation et simulation numérique de la déformée d'un microsystème intelligent pour la micro-robotique

Les déformées en mode de flexion et le potentiel électrique résultant sont présentés dans la Figure VI.30 pour le modèle 3D d'une micro-pince piézoélectrique soumise à différentes valeurs de tensions électriques comprise entre ± 0.1 à ± 100 volts imposé à l'extrémité libre des doigts et des potentiels nuls au niveau du talon de la micro-pince PZT. Ce micromanipulateur est capable d'effectuer de micro-déplacements avec une très haute précision de l'ordre de 10nm. La Figure VI.30 relate un micromanipulateur mobile équipé de deux doigts PZT pour tenir un micro-objet de forme cubique dont la flexion engendre des pressions de serrage et des forces exercées sur les micro-objets afin de contrebalancer le poids à soulever.

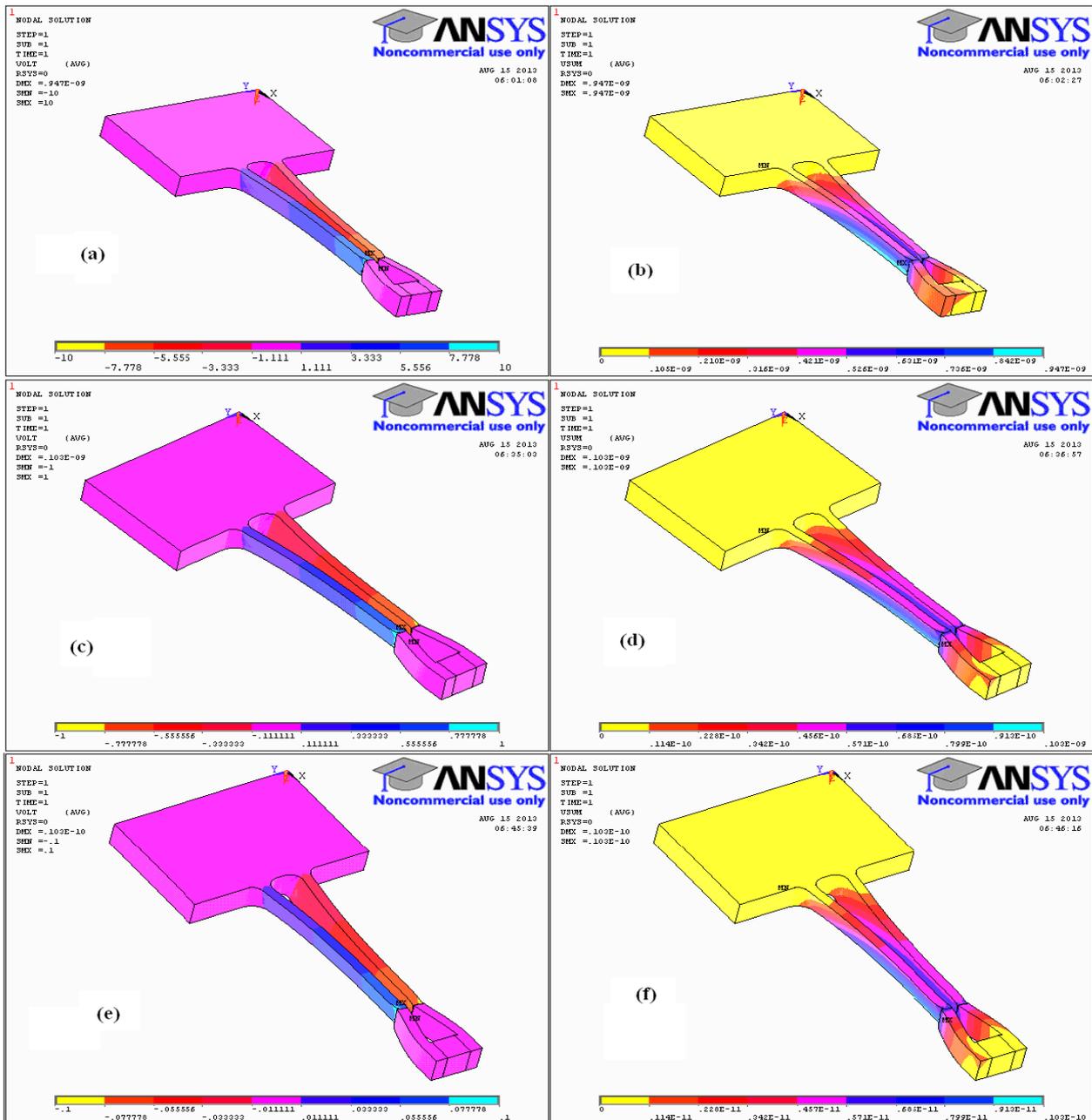


Figure VI.30 : Visualisation du potentiel électrique et du déplacement globale dans la micro-pince pendant le serrage à faible pression d'un micro-cube modélisé sous Ansys®

Chapitre VI : Modélisation et simulation numérique de la déformée d'un microsystème intelligent pour la micro-robotique

Les forces générées par ce type de micro-pince piézoélectrique n'ont pas été mesurées à ce jour. Pour avoir une idée plus précise des forces de serrage, nous avons simulé sous Ansys® l'étape de serrage et ainsi calculé par le modèle EF, les forces exercées sur le micro-cube. Nous obtenons à titre d'exemple, une force de blocage de 25mN pour une tension de 60Volts. Il en résulte le fait qu'il est possible d'obtenir des contraintes plus importantes en multipliant tous simplement la valeur de la tension appliquée. Cette propriété est mise à profit dans la micromanipulation. Cependant lorsque ces micromanipulateurs sont bien maîtriser, les forces de serrage peuvent constituer un moyen intéressant pour manipuler des micro-objets.

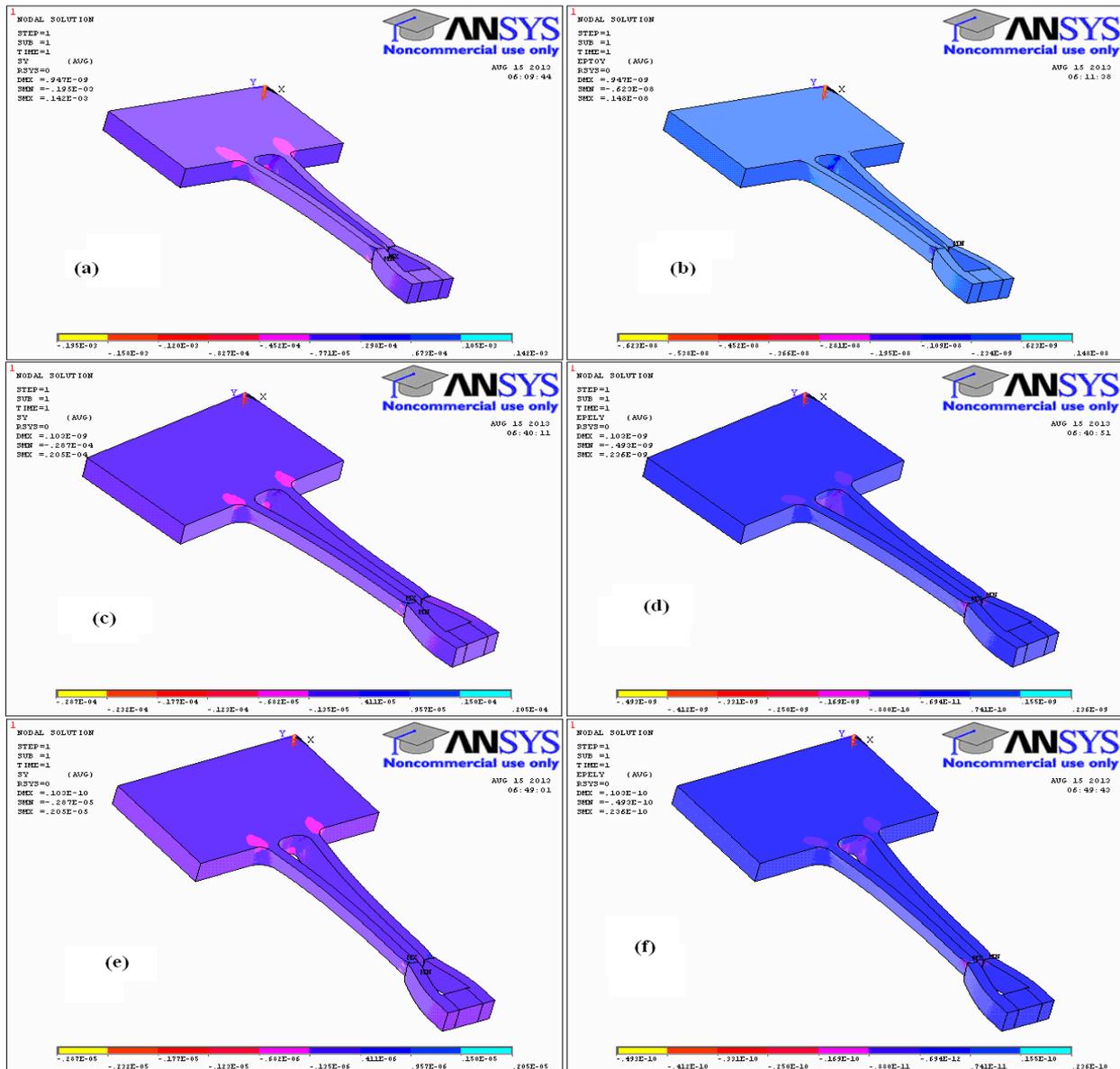


Figure VI.31 : Iso-valeurs de la contrainte σ_{yy} et la déformation ε_{yy} dans la micro-pince piézoélectrique pendant le serrage à faible pression d'un micro-objet de forme cubique

La répartition des contraintes et les déformations dans la micro-pince piézoélectrique sous l'effet de différentes valeurs de tensions électriques imposées sont présentées dans la Figure VI.31. Elle a permis de vérifier si nous avons bien le comportement souhaité avec des contraintes mieux réparties dans la microstructure.

Nous pouvons constater que l'effet d'un bon serrage est bien présent sans déformation du micro-objet, ainsi qu'une diminution des contraintes et de déformations avec une meilleure répartition spatiale. Il a été constaté que les contraintes ne sont pas localisées au niveau de l'encastrement, elles sont mieux réparties et de façon homogène dans le micromanipulateur piézoélectrique. Afin de tester le bon fonctionnement de notre modèle EF pour d'autres formes, nous avons procédé à des simulations numériques à l'aide du logiciel d'éléments finis Ansys®. La Figure VI.32 relate bien les différentes étapes de micromanipulation pour lesquelles les doigts PZT sont dans une situation complètement ouverte et se ferme progressivement. Concernant les forces de serrage, elles ont été estimées à quelques milli-Newton pour une tension de 10Volts. La Figure VI.32 présente différentes tâches de micromanipulation précise d'un micro-objet de forme cylindrique sans destruction et dans les bornes.

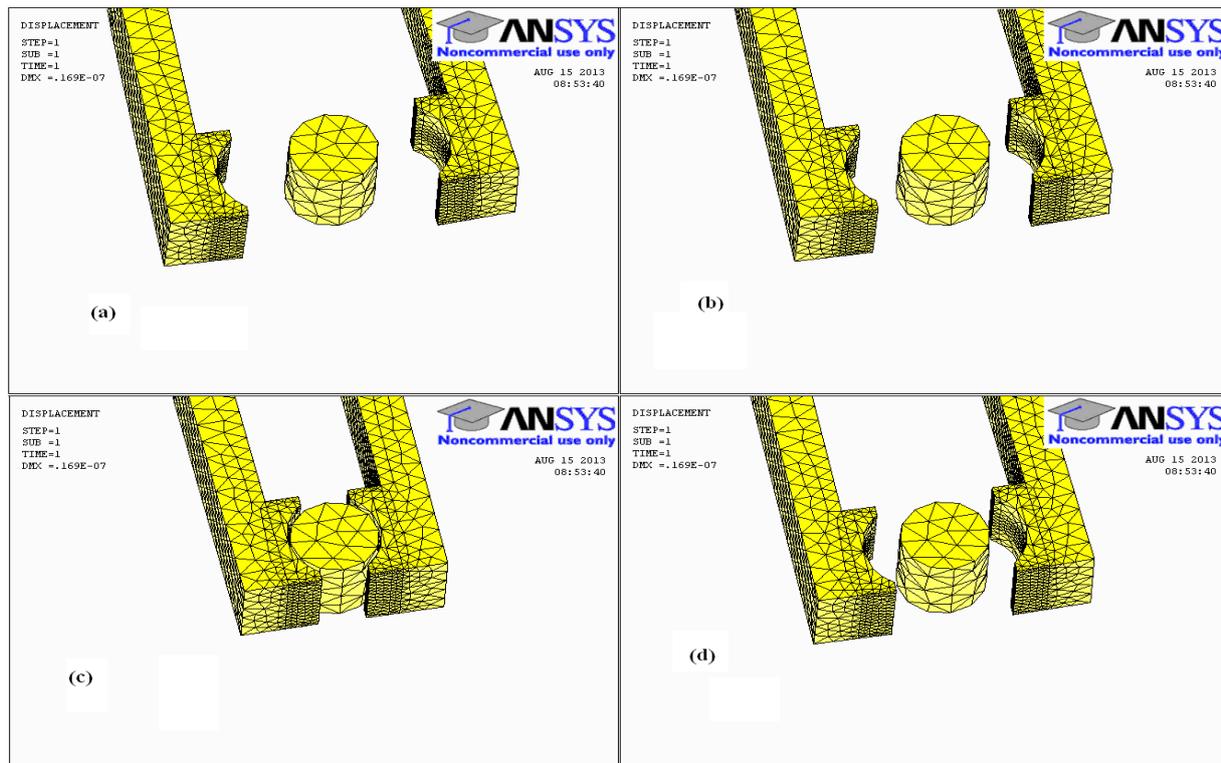


Figure VI.32 : Manipulation d'un micro-objet de forme cylindrique avec une micro-pince piézoélectrique réalisée sous Ansys®

A titre d'exemple, deux résultats de serrage d'un micro-objet de forme cylindrique sans ou avec contact entre doigts et l'objet à soulever sont illustrés sur la Figure VI.33. La Figure VI.33.a on voit bien que la micro-pince ne détecte pas le micro-objet puisque les deux doigts se croisent avec une pénétration dans le corps du micro-objet tandis que sur la Figure VI.33.b le serrage se passe dans les bonnes conditions grâce aux éléments de contacts prises en compte dans les calculs. La Figure VI.34 présente un micromanipulateur piézoélectrique qui réalise différents mouvements pour déplacer l'objet à gauche et à droite sur de petites distances et peuvent même être tournés de plus de 2° sans être lâché.

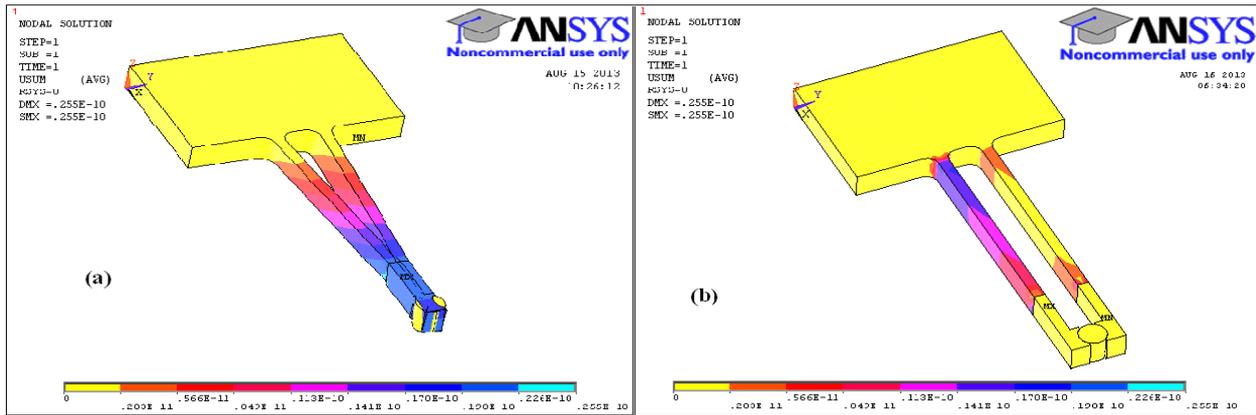


Figure VI.33 : Iso-valeurs de la déformation ϵ_{yy} dans la micro-pince piézoélectrique pendant le serrage à faible pression réalisé sous Ansys® sans ou avec les éléments de contact défini entre l'objet à serrer et les organes terminaux

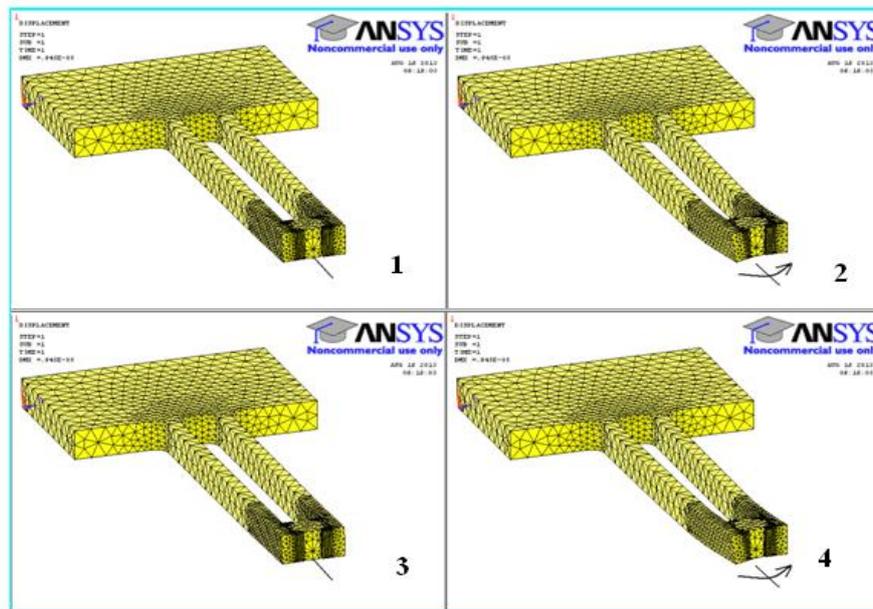


Figure VI.34 : Serrage à faible pression d'un micro-objet de forme cylindrique suivi d'un déplacement à gauche et à droite obtenu sous Ansys®

Que ce soit pour réaliser des opérations de micro-assemblage ou pour visualiser un micro-objet à l'aide d'un microscope, il est très utile, parfois indispensable, de pouvoir calculer par simulation par EF l'amplitude et la limite des forces de serrage à appliquer sur les micro-objets à serrer sans les détruire (cf.fig.VI.35). Les résultats obtenus pour deux micro-objets sont présentés sur la Figure VI.35 en termes de forces de serrage F_y à appliquer à l'extrémité libre des doigts de serrage en fonction de la tension électrique pour maintenir l'objet sans détérioration et sans aucune erreur de centrage. Pour l'actionneur PZT PIC 255, nous obtenons une flexion dans le plan (selon l'axe y) de l'ordre de $36\mu\text{m}$ et une force de blocage d'un objet de forme cubique de $400\mu\text{m}$ de cote d'une dizaine de milli-Newton pour une tension de 10Volts. Concernant le micro-objet de forme cylindrique, la flexion atteint $35\mu\text{m}$ et la force de blocage est de l'ordre de 7mN pour la même tension.

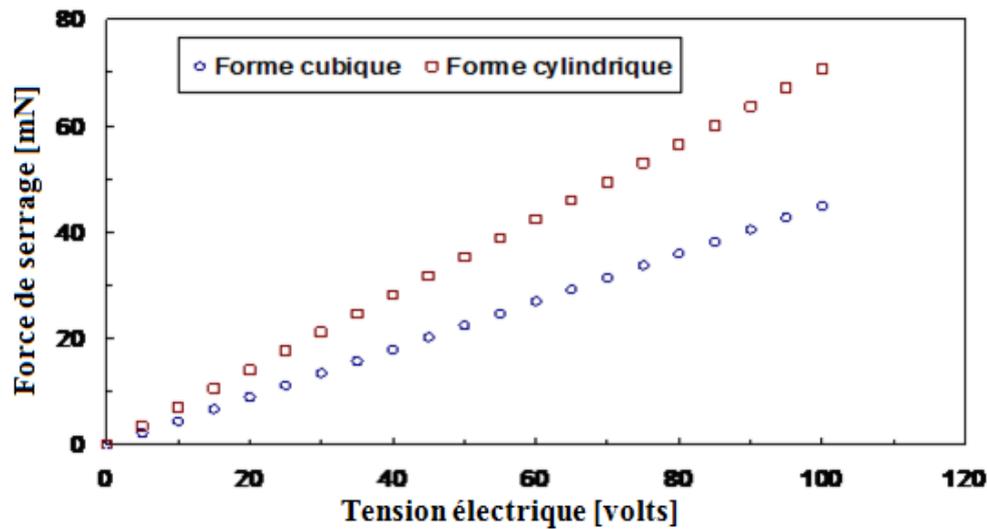


Figure VI.35 : Amplitude des forces exercées sur les micro-objets

VI.4 Conclusions

Dans un premier temps, les simulations ont été faites sur un seul doigt de la micro-pince piézoélectrique on le modélise par une poutre encasté à l'une de ses extrémités, vue la symétrie du problème. Pour faire simple, le bras déformé par un chargement électrique imposé, est modélisé sans l'organe de serrage. Ces simulation faites l'objet de savoir les différentes modes de déformation d'un seul doigt de serrage sous un effet inverse et de connaître la valeur exacte du potentiel électrique pour un déplacement bien précis. Par la suite on a fait une Validation expérimentale et comparaison analytique avec des travaux déjà faits en tenant compte sur les mêmes conditions aux limites ou on a trouvé une cohérence entre les deux modèle analytique et numérique avec l'expérimentale. Dans un second temps, nous traitons le problème dans sa globalité en modélisant les différents modes de flexion de la micro-pince PZT avec deux doigts de serrage avec et sans organe terminal ou on a vu six modes de déformations dans lesquels on a constaté le mode le plus utilisé en micromanipulation qui permet d'assurer le serrage, le maintien et aussi le desserrage, à la fin de ce chapitre deux exemples d'application à la manipulation de micro-objets avec des simulations numériques à l'aide du modèle EF développé ont été lancés par un micro-pince en utilisant le PZT PIC255 car c'est un matériau piézoélectrique mou qui a des bonnes performances électromécanique. D'ailleurs, toutes les performances de la pince ne sont pas figées et peuvent être adaptées à l'application ; les déflexions et les efforts développés peuvent être ajustés en modifiant la géométrie des actionneurs.

Chapitre VII

Modélisation et simulation numérique d'un micromanipulateur à base d'actionneurs à mémoire de forme pour la manipulation de micro-objets en milieu liquide

On a présenté dans ce chapitre la modélisation et la caractérisation d'un micromanipulateur des micro-objets dans un milieu humide , pour cela on a modélisé une nouvelle pince hybride que nous avons proposée spécialement pour effectuer des tâches de saisie, de maintien, de déplacement et de positionnement en milieu liquide est composée de deux bras en composite adaptable de type époxy/AMF. Pour parvenir à cet objectif, nous avons réalisé des simulations numériques des structures adaptables visant à améliorer les performances des micro-pinces AMF à positionner des micro-objets.

VII.1 Introduction

L'objectif est de positionner des micro-objets d'une taille typiquement de l'ordre du micromètre en vue de réaliser un assemblage. L'approche retenue dans cette étude consiste à utiliser un moyen de positionnement avec contact adapté aux problèmes d'assemblage inhérents à cette échelle [CED 05, REG 10, DAF 06, DRO 01]. Dans ce contexte, l'utilisation de micro-pince en matériaux piézoélectriques qui génèrent des déplacements de haute résolutions (souvent nanométrique), leur grande bande-passante (plus du kHz pour certains micro-actionneurs) et leur grande densité de force permet d'assurer un positionnement bien maîtrisé des micro-objets [AGN 03, DAF 04]. A titre indicatif, les micro-pincettes piézoélectriques sont utilisées en particulier dans le domaine biomédical pour le micro-assemblage et la micromanipulation [LIU 04, HER 06]. Leur structure permet principalement de saisir et de transporter des éléments fragiles tels que des cellules ou des vaisseaux sanguins. Or, la relation entre la tension appliquée et la distance entre les deux doigts de serrage est souvent caractérisée par un comportement classiquement non-linéaire et fortement hystérétique. De fait, il est très difficile de contrôler le point de pull-in, c'est-à-dire la tension (densités de charges imposées) à partir de laquelle les doigts vont subitement se plaquer l'un contre l'autre. De plus, l'utilisation de ce type de matériaux nécessite des travaux particuliers de modélisation de leur comportement et de recherche de méthodes de commande adaptées et robustes. Un deuxième point essentiel qui peut affecter le bon fonctionnement des micro-pincettes PZT pour la réalisation de micromanipulation et tout particulièrement de micro-assemblage est l'environnement de travail [WAT 04, LOP 08, DRI 06, REG 06]. En effet, le comportement des actionneurs actifs et des micro-objets étant fortement dépendant des conditions environnementales telles que la température et l'humidité dans l'air, les vibrations ainsi que la composition chimique dans un liquide (voir Figure VII.1). Le contrôle de l'environnement est donc nécessaire pour fiabiliser un processus automatique de micromanipulation. Pour résoudre l'ensemble de ces problèmes, on propose en remplacement des PZT, d'utiliser les alliages à mémoire de forme (AMF) qui présentent des avantages de simplicité de contrôle et de faible coût de fabrication. En effet, les AMF possèdent l'effet mémoire de forme basé sur une déformation cristalline induite par un changement de température entre une phase ductile et une phase à très grande résistance [ABA 16, YAN 16]. A faible température, le matériau se déforme facilement. Sa forme initiale est finalement rétablie à haute température. Les micro-pincettes actionnées par un alliage à mémoire de forme offrent de très larges déplacements, mais leur temps de réponse long réduit parfois leur utilisation.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés aux matériaux adaptables obtenus de l'association d'un liant résineux et d'un renfort de fibres longs en AMF unidirectionnels. Dans ce chapitre seront présentés les matériaux et les techniques expérimentales utilisées pour mener à bien leur caractérisation. Enfin, une seconde partie de ce chapitre est consacrée à la validation de l'étude numérique pour une comparaison avec des essais expérimentaux réalisés en étroite collaboration avec Monsieur SAHLI Mohamed, Docteur et chef de projets européens à l'Université de Franche-Comté (France). Enfin, ce chapitre se termine par des simulations d'une micromanipulation typique des micro-objets de forme géométrique simple en milieu liquide. Les méthodes de modélisation et de caractérisation proposées dans ce chapitre seront prochainement exploitées pour la conception, la réalisation et la commande de stratégies de micromanipulation dans un milieu mixte (à l'air libre et très humide).

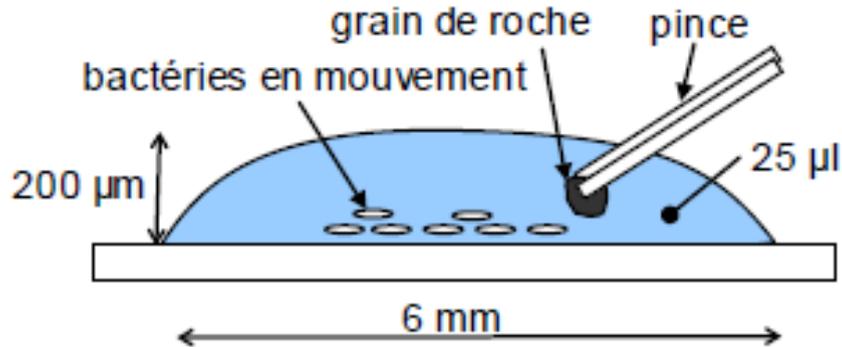


Figure VII.1 : Schéma de principe d'une micromanipulation pour éliminer un caillou dans un milieu biologique [LIU 04]

VII.2 Présentation des composites adaptables utilisés

Dans notre étude nous avons utilisés les matériaux adaptables UD sous forme des plaques minces en fibres TiNi. Ces fibres sont orientées dans la même direction et en parallèle à l'axe longitudinal du vecteur n (cf.fig.VII.2). Ces structures sont composées de matrice époxy obtenue par réaction d'un pré-polymère et d'un durcisseur. Cette matrice est renforcée par des fibres d'AMF.

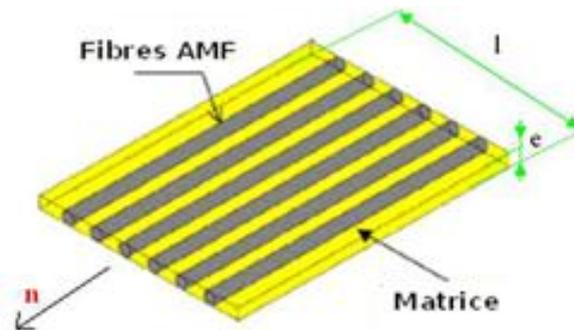


Figure VII.2 : Alignement des fibres dans un matériau adaptable

Notre travail est de réaliser des plaques minces en époxy renforcées par des fibres d'AMF bien répartie et régulier dans la matrice. Cette structure sera active avec une source externe de chaleur. Le principe c'est intégré ces actionneurs de fibres dans la résine époxy après avoir réalisé un pré-étirement jusqu'à 10% de ces derniers en phase martensitique, Et on obtient après durcissement de la résine une structure adaptable. Pour que les fibres retrouvent leurs formes initiales, il faut augmenter la température au delà de la température de transformation de phase, en ce moment la contraction des fibres nous donne des contraintes de compression suivant la direction de sollicitation. (cf.fig.VII.3).

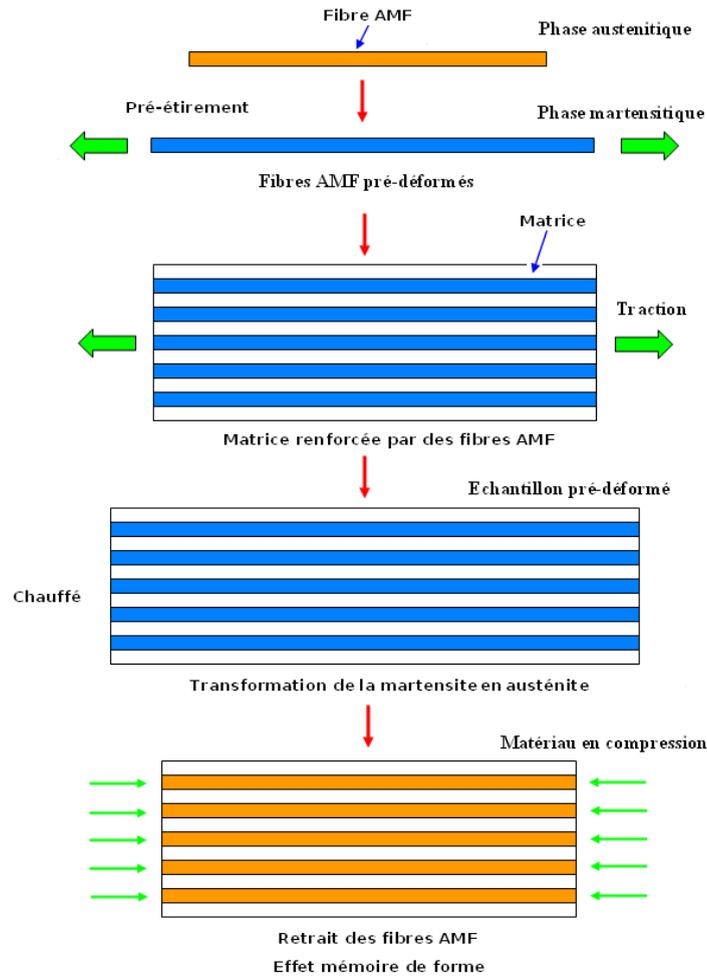


Figure VII.3 : Conception d'une structure adaptable

VII.3 Simulation numérique d'un matériau adaptable TiNi/epoxy

Le modèle de simulation a été élaboré en trois étapes. Tout d'abord, on définit la géométrie et les propriétés des matériaux. Ensuite le maillage de la structure qui a une influence directe sur les résultats de simulation. Enfin, la dernière étape c'est de définir les charges ainsi que les conditions aux limites. En premier lieu, nous allons simuler le comportement mécanique en traction d'une plaque mince en résine époxy de dimensions égales à 0,5mm d'épaisseur, 30mm de largeur et 100mm de longueur. Cette résine contient 30 fibres répartie de façon régulière dans la matrice époxy en TiNi de diamètre 0,2mm le long de la plaque.

La structure a été maillée avec des éléments SOLID45 de type volumique possède 8 nœuds et trois degrés de liberté sont les déplacements suivant x, y et z. Le système est discrétisé par 1756200 éléments Solid45 à 3 degrés de liberté en translation par nœud (cf.fig.VII.4), se qui entraîne un long temps de calcul. On a utilisé Les comportements de la structure des bases de données matériau d'Ansys[®]. La plaque époxy est supposée viscoélastique, tandis que les fibres AMF sont considérer super-élastique dans les deux états soit l'état mémoire de forme martensitique ou bien l'état austénitique.

Chapitre VII : Modélisation et simulation numérique d'un micromanipulateur à base d'actionneurs à mémoire de forme pour la manipulation de micro-objets en milieu liquide

La modélisation du contact de la résine époxy et fibres TiNi est réalisée par des éléments de contact. Après avoir accomplir toutes ces étapes, On peut lancer le calcul de la déformation de la poutre à l'état d'équilibre. Les nœuds de la structure situés à l'une de ces extrémités sont supposés encastrés et à l'autre extrémité on impose un chargement de 10N.

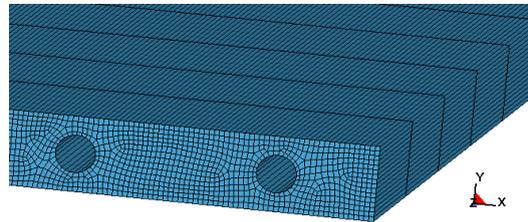


Figure VII.4 : maillage de la structure au niveau de l'encastrement

Les simulations ont été réalisées avec la loi de comportement mécanique disponible dans le logiciel Ansys® (cf.fig.VII.5). Le tableau VII.1 indique Les propriétés des fibres TiNi des deux états austénitique et martensitique.

Désignation	Etat austénitique	Etat martensitique
Densité	4,5	4,5
module d'Young E	58334MPa	25000MPa
Coefficient de poisson ν	0,3	0,3
σ_{AS}^f	350MPa	175MPa
σ_{AS}^s	475MPa	100MPa
σ_{SA}^f	250MPa	60MPa
σ_{SA}^s	175MPa	25MPa
ϵ_L	0,06	0,06
α	0	0

Tableau VII.1: Propriétés mécaniques d'un matériau AMF pour les deux phases austénitiques et martensitique

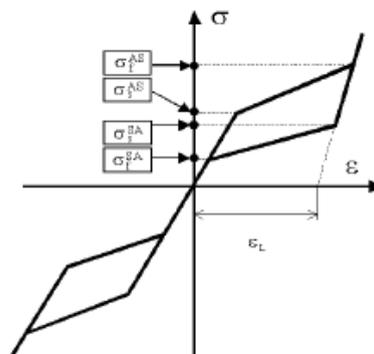


Figure VII.5 : Représentation schématique de la loi de comportement des AMF

VII.4 Analyse des résultats numériques

Le modèle supporte une charge de 10N fixe appliquée sur la face supérieure de l'éprouvette selon l'axe Z-Z tandis que la face inférieure est supposé encastree. La figure VII.6 montre le déplacement selon la direction de la force appliquée sur la plaque en TiNi/époxy calculé par le logiciel Ansys®. Maintenant pour l'étude de l'influence de l'état de phase des fibres AMF sur le comportement mécanique de la plaque TiNi/époxy, nous avons représenté quelques valeurs du champ des déplacements durant l'essai de traction de cette structure à fibres AMF à l'état martensitique.

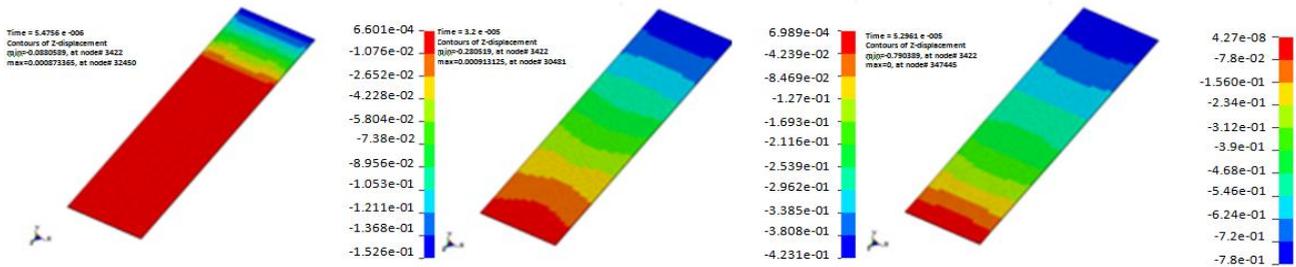


Figure VII.6 : Champ de déplacements suivant la direction Z-Z d'une plaque mince adaptable à fibres actives en TiNi initialement à l'état austénitique

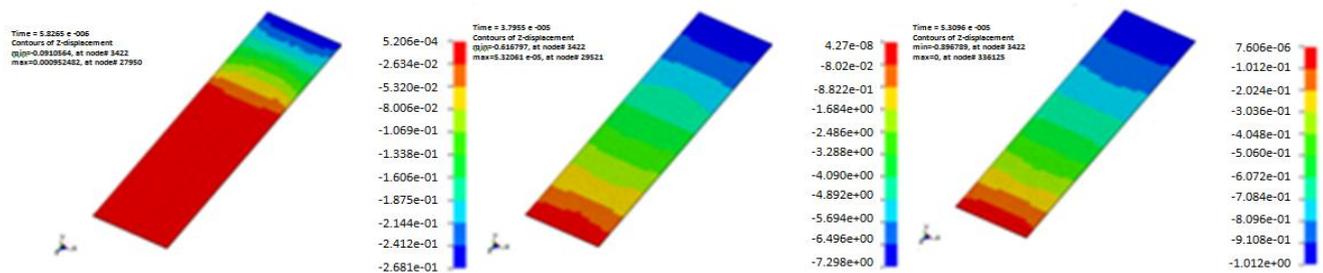


Figure VII.7 : Champ de déplacements suivant la direction Z-Z d'une plaque mince adaptable à fibres actives en TiNi initialement à l'état martensitique

D'après les valeurs représentées sur les figures VII.6 et 7, en considération de la phase martensitique des fibres, on a observé une différence sur les valeurs du champ des déplacements selon la direction de la charge appliquée. La différence des résultats est très importante se qui nous permet de confirmer que notre structure adaptable avec des fibres actives en phase austénitique demeure le premier choix pour évoluer le comportement de la structure TiNi/époxy.

VII.5 Analyses expérimentales

VII.5.1 Matériaux de l'étude

Dans cette partie l'étude expérimentale a été réalisée en étroite collaboration avec Monsieur SAHLI Mohamed à l'Université de Franche-Comté en France. Le matériau utilise dans cette expérience est un AMF poly-cristallin de type TiNi fabriqué par la société japonaise Furakawa Electric Company®, sous la forme d'un fil de diamètre de 0,2 mm. Dans l'expérimentale par analyse calorimétrique différentielle DSC on a déterminé les températures de transformation en phase martensitique.

Dans notre étude la matrice choisie est un polymère époxyde fabriqué par la société Bostik Findley, ce choix de ce matériau est effectué à cause de sa caractéristique mécanique de sa température de transition vitreuse qui nous permet d'utiliser notre matériau adaptable jusqu'à 120 °C. La propriété la plus éclairante de cette matrice c'est la transparence qui nous permet d'observer directement l'altération de la structure. La déperdition de résistance au cisaillement à la limite emportée par le débordement de T_g rend inutile l'ajout d'alliage à mémoire de forme. Le tableau VII.2 montre les propriétés mécaniques en traction de la matrice EPONAL 401 données par le fabricant Bostik.

Module d'Young E [MPa]	Contrainte à la rupture σ_R [MPa]	Déformation à la rupture ϵ_R [%]
2800±120	64±4	2,4±0,3

Tableau VII.2: module d'Young ainsi que les paramètres de rupture (σ_R) et (ϵ_R)

VII.5.2 Analyse DSC de la transformation martensitique

L'analyse calorimétrique différentielle (DSC) est la méthode absolue pour déterminer les températures de transformation martensitique. L'appareil appelé SETARAM (DSC92) contient un dewar qui permet un refroidissement sous azote liquide (cf.fig.VII.8a). Le principe de fonctionnement de cet appareil consiste à mesurer les deux quantités de chaleur dégagée ou absorbée dans les deux états de réaction exothermique ou endothermique par comparaison à une certaine référence. Beaucoup de données peuvent être déduites de l'analyse DSC comme par exemple l'enthalpie de transformation, les températures de transition de phase, l'hystérésis thermique et les températures des pics de transformation.

Des petits échantillons de TiNi de 30mg à 50mg sous forme des capsules dans une éprouvette en aluminium. L'ordinateur de contrôle est programmé pour un cycle thermique d'une vitesse de chauffage et de refroidissement égale à 10°C/min sur deux éprouvettes placées dans le calorimètre l'une de référence vide et l'autre qui contient l'échantillon. L'expérience faite pendant 2h à 750°C sur des échantillons identiques permet le traçage d'un diagramme de transformation de température (thermogramme) montré sur la figure VII.8b. Le point de transformation austénite/martensite (AM) pendant le refroidissement, le point de transformation martensite/austénite (MA) lors du chauffage.

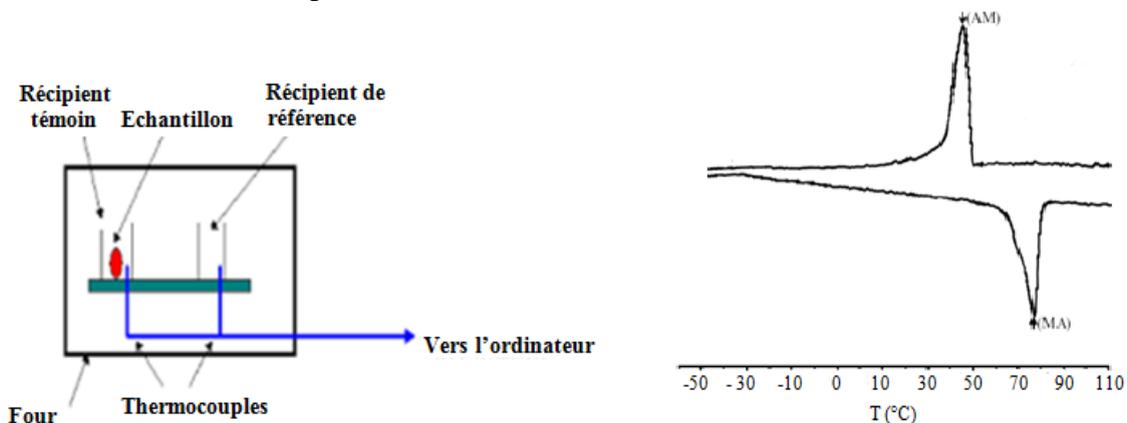


Figure VII.8 : (a) Schéma calorimétrie différentiel, (b) thermogramme du TiNi obtenu en DSC

VII.5.3 Conception des matériaux adaptables TiNi/epoxy

Nous allons élaborer un matériau adaptable qui contient des fibres TiNi pré-étirés de 5, 7 ou 10%, ces fibres d'AMF se trouvent en deux états, le premier état est stable à une température élevée (austénitique) et le deuxième état lors du refroidissement c'est la transformation de phase martensitique des fibres. Pour la conception de ce matériau, les fibres doivent être découpées et aligner de façon parallèle en appliquant une force faible de l'ordre de 1N. Dans la suite, sur le montage on fixe les fibres avec des peignes. L'un est fixe et l'autre allié à un bride mobile. L'espace entre les fibres est d'environ 1mm, elles sont placées sur une plaque de métal dur. Entourant le banc d'essai en mettant le système sous vide par un joint d'étanchéité, et réalisé une prise par une pompe à palettes.

En maintenant le vide pendant tout le cycle pour effectuer la polymérisation par cuisson à une température de 120°C de tout l'ensemble durant 2h. Les éléments utilisés sont : 1- plaque métallique du banc d'essai; 2- joint d'étanchéité; 3 et 5- papier en silicone; 4- matériau adaptable; 6- film de mise sous vide (polyamide); 7- prise de vide (cf.fig. VII.9).

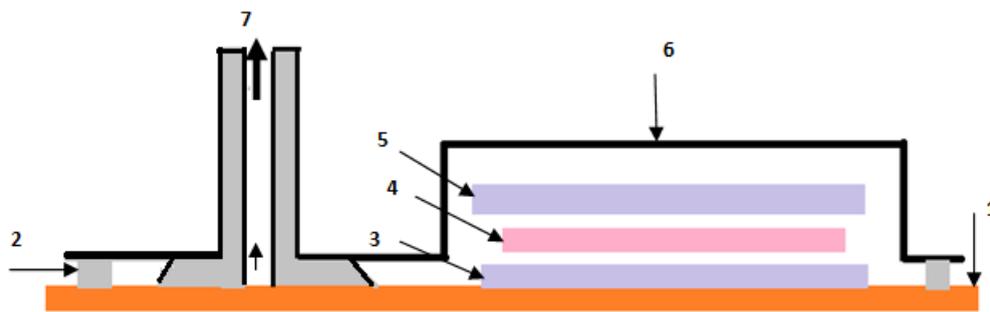


Figure VII.9 : le schéma du dispositif de mise en œuvre du matériau adaptable

VII.5.4 Analyse expérimentale du comportement mécanique par traction

Les essais de traction sont faite sur des échantillons découpés d'une plaque mince obtenue par moulage, les dimensions de ces échantillons sont : épaisseur=0,5mm, longueur=100, largeur=30mm. Sur l'appareil de traction, les échantillons sont fixés avec deux mors. Pour analyser le comportement mécanique par traction sur ces matériaux adaptable on a imposé une vitesse de déformation égale à 5mm/min, des essais en température ont été réalisés sur 20 échantillons dans les deux états (austénitique et martensitique). Nous avons utilisé extensomètre placé au milieu de l'éprouvette pour calculées les déformations pour des températures < 70°C, par contre pour les températures >70°C les déformations sont mesurées par le déplacement de la traverse.

Des courbes (effort/allongement) obtenus par le système de l'appareil de traction, ces dernières sont converties en courbes (contrainte/déformation), en se basant sur les dimensions initiales de l'éprouvette (section A_0 et longueur l_0) (cf.fig. VII.10). La forme de notre matériau adaptable UD contient 30 fibres TiNi (cf.fig.VII.11).

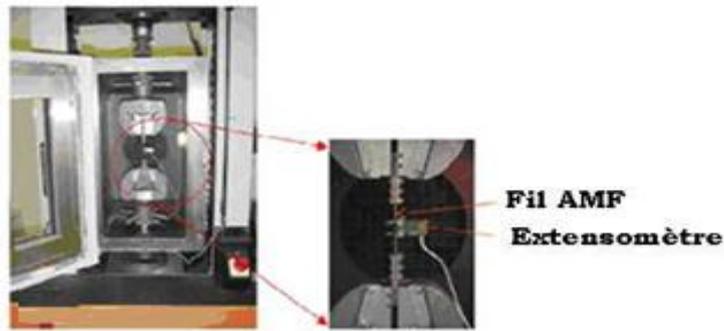


Figure VII.10 : Système expérimental pour les essais de traction en température



Figure VII.11 : Epreuve de traction en matériau adaptable à fibre active (AMF)

La figure VII.12 représente les résultats sous forme des graphes contrainte/ déformation d'un matériau adaptable à différentes températures. On observe que la valeur du module d'Young augmente faiblement avec l'augmentation de la température et aussi au déclenchement de la phase martensitique des fibres AMF. A partir de ces résultats on peut dire que le module d'Young varie légèrement avec la température.

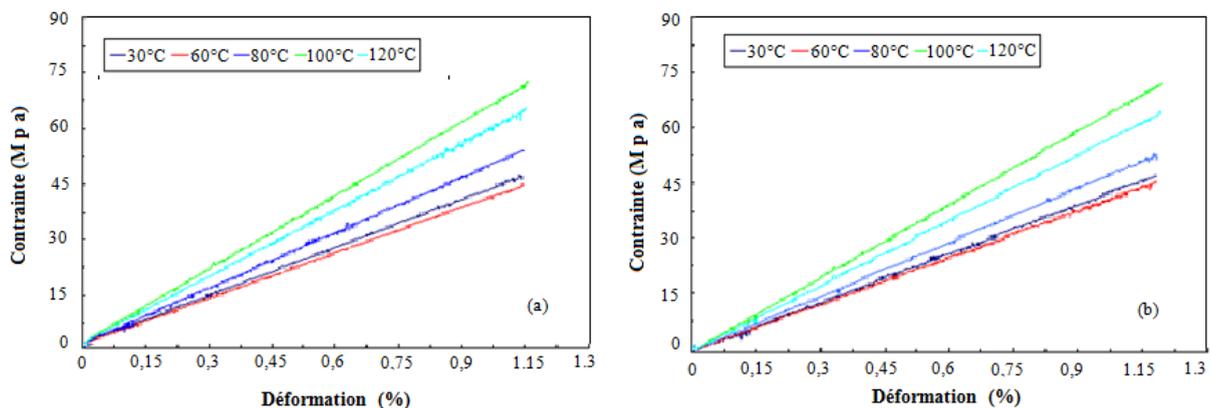


Figure VII.12 : Courbes de comparaison contrainte-déformation sur un matériau AMF avec des fibres pré-étirés a : (a) 5%, (b) 10% pour l'essai de traction à températures variable

VII.6 Validation expérimentale

Pour la validation du modèle numérique de la plaque mince adaptable avec l'expérimentale, la figure VII.13 représente la comparaison en traction entre deux matériaux adaptables en deux phases martensitique/ austénitique de la variation de la contrainte en fonction de la déformation. Pour les essais de traction réalisée sur des échantillons en matériaux adaptable TiNi/époxy, on observe une bonne concordance entre la simulation numérique et les résultats expérimentaux.

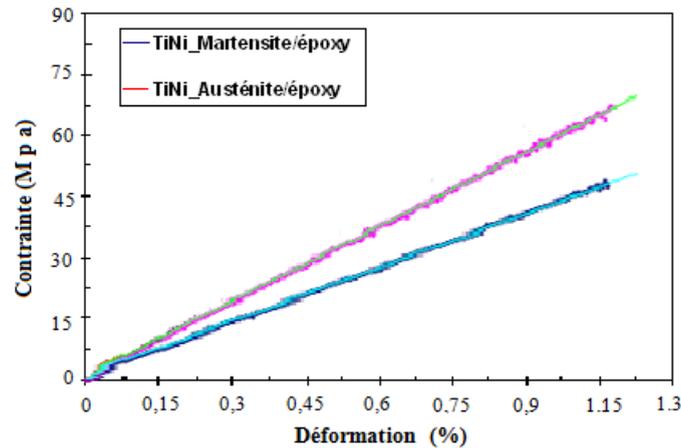


Figure VII.13 : Courbe de comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour l'essai de traction pour un matériau adaptable à fibres actives

VII.7 modélisation d'un système de micromanipulation immergée par changement de phase

La manipulation d'objets de très petites dimensions est amplement répandue depuis plusieurs années. Elle comprend les tâches de saisie, maintien, déplacement, positionnement et dépose d'un objet. Ainsi, pour que celle-ci ait lieu, un système doit générer des mouvements relatifs entre une pince de serrage et un micro-objet. La nouvelle pince hybride que nous avons proposée spécialement pour effectuer des tâches d'assemblage en milieu liquide est composée de deux bras en composite adaptable de type époxy/AMF. Une vue de côté est illustrée sur la figure VII.14. Du point de vue de la manipulation, l'objectif ici était de saisir dans l'air un micro-objet inférieur à la centaine de micromètres de côté pour l'immerger dans un liquide aqueux comprenant des cellules (cf.fig.VII.14). Ce principe permet de manipuler aussi une grande variété de micro-objets comme des sphères artificielles, des objets biologiques ou des nano-objets comme des nanotubes de carbone. La figure VII.14 représente un schéma descriptif du dispositif qui permet le positionnement de particules dans un milieu liquide.

Des travaux très poussés ont été menés dans ce sens avec l'Université de Franche-Comté (France) portant sur la manipulation de micro-objets en milieux liquide qui trouve principalement des applications dans le domaine de la biologie cellulaire pour l'étude de l'interaction entre des cellules biologiques et des objets artificiels. L'ensemble du dispositif sera prochainement piloté par un ordinateur de vision chargé de déterminer la position des objets et de commande chargé de générer les trajectoires optimaux. Pour parvenir à cet objectif, nous allons commencer à réaliser les premières simulations numériques visant à améliorer les performances des micro-pincettes AMF à positionner des micro-objets.

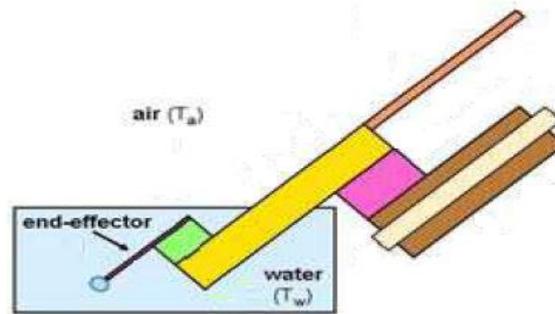


Figure VII.14 : Manipulation en milieu liquide d'un microcomposant avec une micro-pince à changement de phase

VII.7.1 Modélisation et simulation par éléments finis

A ce stade de l'étude, il nous semble utile d'estimer les performances attendues d'un tel microsystème intelligent dans le domaine de la micromanipulation. Pour cela nous reprenons les mêmes données utilisées pour la micro-pince PZT relatives aux chapitres précédents. Pour la nouvelle micro-pince AMF, nous avons procédé à des simulations par éléments finis avec le même logiciel de calcul. La micro-pince AMF étudiée se présente sous une forme standard équipée d'organes terminaux en polypropylène pour manipuler des micro-objets. La micro-pince possède deux doigts en matériau adaptable époxy/AMF de structure élastique déformable. La structure est modélisée par des maillages irréguliers avec 4743 éléments de type SOLID5, qui permet de prendre en compte l'effet mémoire de forme, et qui a donc permis de définir le matériau à mémoire de forme.

VII.7.2 Résultats de la simulation et discussions

Sur la Figure VII.15 sont représentées les premières tentatives de simulations numériques pour deux micro-pincettes en modes de déformations libres obtenus dans les conditions différentes pour une configuration de serrage. Dans les deux cas, le serrage se passe dans les bonnes conditions. Il a été observé que les deux doigts de serrage présentent une déformation symétrique avec plus de régularité et moins de distorsion pour le cas d'une micro-pince AMF. D'autres simulations réalisées dans cette étude nous ont permis d'estimer aussi les forces mises en jeu pour effectuer la tâche de serrage. Elles sont de l'ordre de quelques mNewtons pour des objets d'un diamètre de l'ordre du micromètre. Nous avons obtenu à titre d'exemple, une force de serrage de 25mN et de 40mN pour une micro-pince PZT et AMF, respectivement. Il en résulte le fait qu'il est possible d'ajuster cette force de serrage soit en multipliant tout simplement la valeur de la tension appliquée pour le cas d'une micro-pince PZT ou la température de travail pour le deuxième cas. Il est aussi intéressant de signaler que pour les modes de flexion, la micro-pince AMF permet d'assurer le serrage, le maintien et aussi le desserrage. Tandis que la micro-pince PZT peut assurer en plus le déplacement des micro-objets après serrage. En effet, la micro-pince AMF ne possède qu'un seul mode de déformation grâce à l'effet mémoire de forme contrairement à la micro-pince PZT.

Chapitre VII : Modélisation et simulation numérique d'un micromanipulateur à base d'actionneurs à mémoire de forme pour la manipulation de micro-objets en milieu liquide

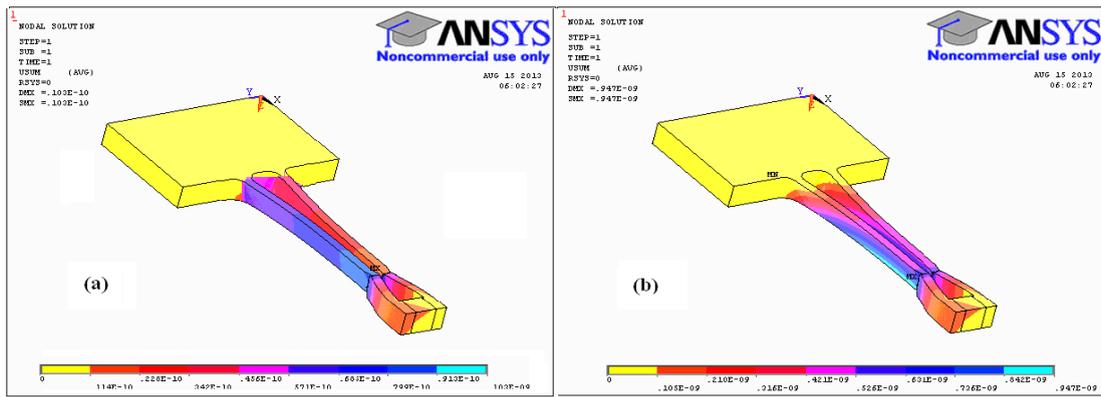


Figure VII.15 : Visualisation du déplacement global dans la micro-pince pendant le serrage d'un micro-cube modélisé sous Ansys® : (a) micro-pince AMF, (b) micro-pince PZT

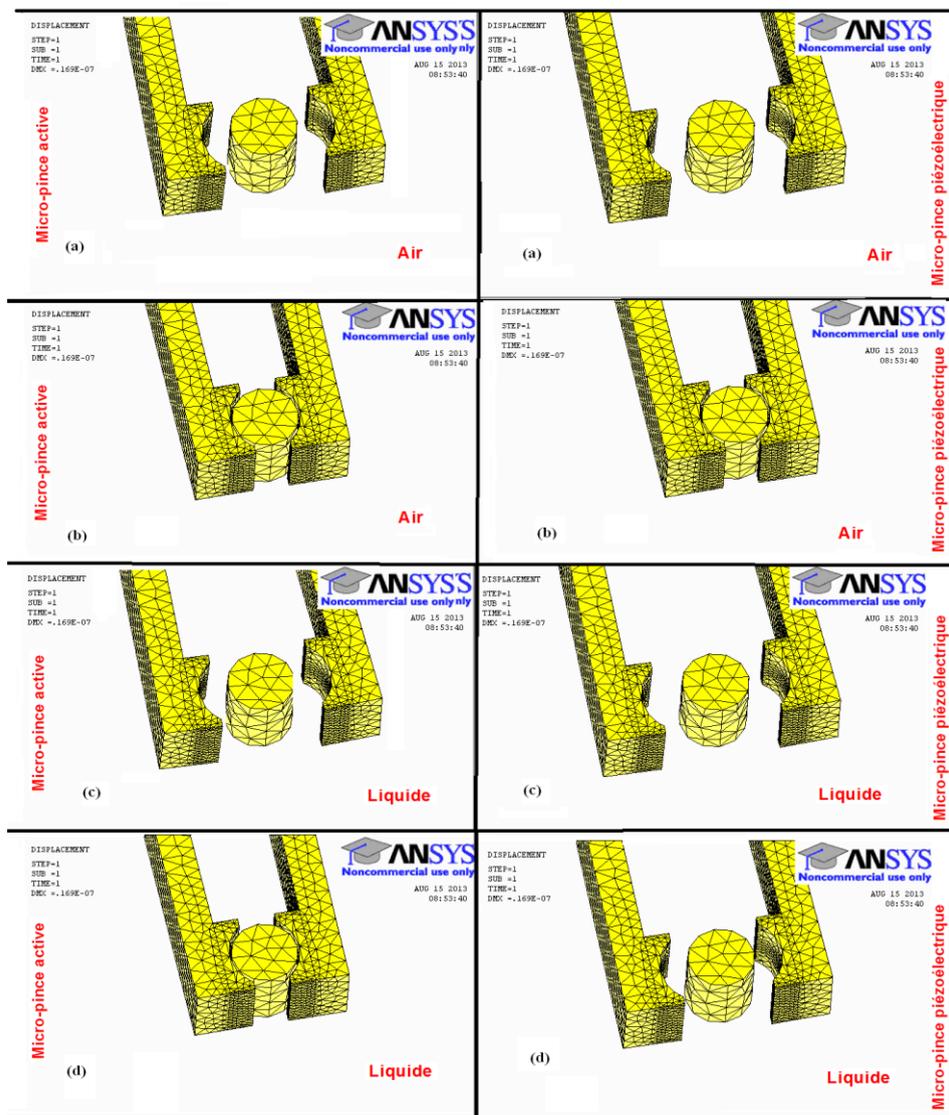


Figure VII.16 : Manipulation d'un micro-objet de forme cylindrique avec une micro-pince active ou une micro-pince PZT réalisée sous Ansys®

Afin de montrer la fiabilité de cette solution de préhension, des séquences de prise-dépose d'un objet de forme géométrique simple ont été simulées dans un environnement mixte air-liquide. L'objectif de la séquence est de saisir l'objet en air puis le lâcher dans un bac d'eau et enfin le saisir à nouveau (cf.fig.VII.16). Dans un milieu très humide la micro-pince AMF assure facilement la tâche d'assemblage. Alors que pour la micro-pince PZT, les micro-objets peuvent être saisis quand l'humidité est très faible, et relâchés subitement quand cette dernière est très élevée. Il devient donc très difficile de garantir la fiabilité de la prise et la dépose des objets dans ces conditions.

VII.8 Conclusion

Les travaux effectués dans ce chapitre porte sur l'étude de la modélisation numérique de la micromanipulation des micro-objets dans un milieu liquide en utilisant la méthode des éléments finis. La micromanipulation porte sur la manipulation d'objets possédant une taille caractéristique comprise entre 1 micromètre et 1 millimètre. De plus, le choix de manipuler en milieu liquide ouvre vers des voies nouvelles qui se distinguent de la micromanipulation dans l'air et présentent ainsi des marges sensibles en terme d'innovation. Dans ce contexte, la nouvelle pince hybride que nous avons proposée spécialement pour effectuer des tâches de saisie, de maintien, de déplacement et de positionnement en milieu liquide est composée de deux bras en composite adaptable de type époxy/AMF. Pour parvenir à cet objectif, nous avons réalisé des simulations numériques des structures adaptables visant à améliorer les performances des micro-pinces AMF à positionner des micro-objets. Dans un premier temps, une analyse calorimétrique différentielle a été utilisée pour déterminer les températures de transformation du matériau actif. Un grand nombre d'informations telles que les températures des pics de transformation, les températures de transition de phase, l'enthalpie de transformation et l'hystérésis thermique ont été finalement déterminés. Sur la base de ces données, un procédé d'élaboration des matériaux adaptables contenant des fibres TiNi pré-étirés de 5, 7 ou 10% a été établi. Puis, en compagnie des essais de traction ont été réalisées afin de choisir les propriétés adaptées à notre application. Sur la base des observations, il a été constaté que l'augmentation de la température pendant l'essai de traction au-delà de 60°C déclenche la transformation de phase des fibres TiNi. Dans un second temps, des essais expérimentaux pour valider notre modèle EF. Une confrontation des données de la simulation et les résultats expérimentaux des essais de traction monotone effectués sur des plaques minces en matériaux adaptables de type TiNi/époxy a été réalisée. Il a été remarqué qu'une bonne corrélation est obtenue. Sur la base de l'ensemble des résultats obtenus, des tentatives de simulations numériques pour modéliser le comportement de deux micro-pinces piézoélectrique et AMF pour une configuration de serrage ont été réalisées. Il a été observé que les deux doigts de serrage présentent une déformation symétrique avec plus de régularité et moins de distorsion pour le cas d'une micro-pince AMF. Il en résulte aussi le fait qu'il est possible d'ajuster cette force de serrage soit en multipliant tout simplement la valeur de la tension appliquée pour le cas d'une micro-pince PZT ou la température de travail pour le deuxième cas. Afin de montrer la fiabilité de cette solution de préhension, des séquences de prise-dépose d'un objet de forme géométrique simple ont été simulées dans un environnement mixte air-liquide. Dans un milieu liquide la micro-pince AMF assure facilement la tâche d'assemblage contrairement à la micro-pince PZT. Cette étude peut sans doute être élargie à d'autres principes de micromanipulation sans contact. Ces méthodes de micro-préhension constituent le cœur des systèmes de micro-assemblage présentés dans nos travaux.

Conclusion générale

Actuellement, les systèmes intelligents sont un domaine en plein développement et en pleine effervescence. Ils disposent d'un intérêt majeur : leur capacité d'adaptation au milieu ambiant, selon l'évolution des conditions environnantes. Dans ce cadre, on constate une envolée des publications dans ce domaine depuis le début des années 80. Depuis cette période, des efforts considérables en recherche fondamentale ont été consacrés au développement de nouvelles structures adaptables. L'intérêt de ces structures dites intelligentes se manifeste par le fait qu'elles apportent des réponses optimales à des problèmes extrêmes complexes, comme la micromanipulation de micro-objets dont la taille est comprise entre quelques μm et 1 mm, objets constituent le micro monde. L'objectif principal de ce travail a été de contribuer à l'étude d'un calcul numérique sur une structure intelligente par la méthode des éléments finis. Cette modélisation permet de simuler les déformations dans une poutre céramique piézoélectrique soumise à un champ électrique en tenant compte du couplage électromécanique et en prenant les potentiels électriques comme degrés de liberté supplémentaires. Dans un premier temps, sur un plan bibliographique, une revue concernant les matériaux intelligents, les principaux matériaux piézoélectriques utilisés et leurs domaines d'applications ont été présentées. Cette recherche bibliographique nous a permis de situer notre modélisation dans le cadre de l'évolution de ces nouveaux matériaux. Notamment l'effet piézoélectrique, la structure cristalline du matériau, cycle d'hystérésis ainsi que les propriétés électromécaniques des actionneurs piézoélectriques. Dans un second temps, on a présenté les lois de comportement des matériaux piézoélectriques ainsi que les différents modes de déformation, ces descriptions nous ont orientés à choisir l'actionneur à utiliser dans un système bien défini.

Après avoir rappelé les équations régissant la piézoélectricité, nous avons présenté en plus une identification de ces équations par une étude analytique d'une poutre bimorphe type cantilever encastrement d'un côté et libre à l'extrémité avec un seul degré de liberté dans laquelle on a étudié la déflexion suivant z , cette modélisation analytique a pour intérêt de voir l'influence des forces extérieures tel que un moment fléchissant, force concentrée et force répartie et le potentiel électrique sur la poutre piézoélectrique. Les caractéristiques physiques d'un matériau piézoélectrique sont sa permittivité, sa rigidité mécanique, sa densité et son coefficient piézoélectrique. Hormis pour la densité, toutes ces données sont des tenseurs de rang différents. Nous pouvons déjà annoncer qu'il est quasiment impossible de connaître tous les coefficients de ces tenseurs, la mesure de ces coefficients n'étant pas une chose aisée. Seuls des matériaux très étudiés comme le quartz bénéficient de table complète. Sa structure massive, contrairement aux nouveaux matériaux utilisés sous forme de film, a permis d'effectuer des mesures pour toutes ces orientations cristallines. C'est pour cette raison, nous utiliserons pour le PZT des valeurs issues de mesure des matériaux massifs.

Poursuivant notre identification de la loi de comportement par une simulation numérique, nous avons fait appel à un simulateur mécanique : Ansys[®]. L'objectif de cette simulation par éléments finis est de construire un modèle moins restrictif, du point de vue des hypothèses, que le modèle analytique. Le modèle consiste à représenter un actionneur de type poutre en prenant en considération : l'effet piézoélectrique, les excitations externes ainsi que la géométrie tridimensionnelle de l'actionneur. Avec le logiciel Ansys[®], sur une éprouvette de forme haltère, on a abordé des simulations numériques de l'essai de traction et/ou flexion. Dans le contexte d'avoir un bon coefficient de couplage électromécanique, bonne transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, une constante diélectrique faible et une tension importante pour un déplacement de charge donné. Nous avons choisi d'utiliser quatre matériaux piézoélectriques de différentes

structures cristallines : le niobat de lithium (LiNbO_3), le quartz (SiO_2) et deux matériaux piézoélectriques (PZT PIC 141 et PZT PIC 255), Les calculs sont effectués avec ou sans couplage électrique. Différentes simulations avec un déplacement imposé (l'effet piézoélectrique direct) ont été calculés pour des valeurs de potentiel électrique, déplacement en extension et les contraintes σ_{yy} cumulée ont été présentés et discutés avec des essais de traction et de flexion. En imposant un potentiel électrique (l'effet piézoélectrique inverse), se qui nous permis de vérifier l'influence des constantes piézoélectriques sur les quatre types de matériaux piézoélectrique ou on a persuadé que les céramiques piézoélectriques PZT PIC141 et PZT PIC255 qui ont une performance fonctionnelle bien déterminée à cause d'un facteur de couplage important et des coefficients piézoélectriques élevés et bien placés sur la matrice piézoélectrique avec une légère différence entre ces deux derniers matériaux notamment le PZT PIC141 est un matériau dur par comparaison avec le PZT PIC255 qui est un matériau doux.

Dans la dernière partie de ce mémoire, nous intéresserons sur l'étude par simulation numérique d'une micro-pince intelligente de type poutre piézoélectrique à deux doigts de serrage parallèle pour la micromanipulation des micro-objets. Dans ce cas on a proposé quelques suppositions sur les modèles utilisés et le prototype étudié ainsi que les nombreuses hypothèses, pour faciliter notre simulation sur l'élément de calcul Ansys[®]. On s'est servi de cette étude numérique pour extraire le mode qui nous intéressait, qui est le mode en flexion dans le plan, d'une part, l'effet de la polarisation, et d'autre part, les propriétés mécaniques et piézoélectriques sur le fonctionnement de la micro-pince adaptable pour assurer la prise et la dépose des micro-objets de toute forme. Des comparaisons ont été effectuées entre les résultats analytique, numériques et ceux des expérimentations dans le domaine élastique. Ces comparaisons se sont avérées satisfaisantes. L'ensemble des résultats ont été présenté ci-après, en comparant systématiquement les trois études (analytique, numérique et expérimentale) pour une validation. Enfin, nous exploitons cette étude dans le cadre de la micromanipulation de deux micro-objets de forme cubique ou cylindrique dont la taille maxi mesure $500\mu\text{m}$. L'intérêt d'une telle modélisation tient en partie à ce qu'elles permettent la conception et l'optimisation des éléments piézoélectriques qui sert à utiliser dans la micromanipulation des micro-objets. A partir des travaux présentés dans cette thèse, nous pouvons dégager quelques perspectives permettant l'amélioration du système de micromanipulation. Concernant la micro-pince, une des perspectives prioritaires de ce travail concerne son instrumentation et plus particulièrement la mesure de la force appliquée sur l'objet. Cette mesure est nécessaire notamment pour ne pas endommager, voire détruire, les objets à manipuler avec, en outre, une résolution élevée. En effet, à l'échelle du micro monde les surfaces en contact avec l'outil sont si ponctuelles que même des forces de faible amplitude peuvent conduire à des pressions, et donc des contraintes locales, très importantes. La micro-pince ne permet pas à elle seule de réaliser toutes les tâches complètes, Si les performances atteintes permettent déjà de réaliser des tâches de micromanipulation, diverses améliorations peuvent être apportées pour aboutir à un système encore plus compact et plus performant. Les méthodes de modélisation et de caractérisation proposées dans ce chapitre seront prochainement exploitées pour la conception, la réalisation et la commande de stratégies de micromanipulation dans un milieu mixte (à l'air libre et très humide). La plus importante, l'intégration de micro-capteurs de position sur les poutres piézoélectriques permettrait non seulement de contrôler automatiquement les efforts de serrage, mais également de transmettre cette information à l'opérateur qui, à partir d'une manette à retour d'effort, pourrait connaître en temps réel les efforts de serrage appliqués sur les objets.

Annexe
Propriétés mécanique, électrique et piézoélectrique des matériaux utilisés

La définition des différentes propriétés des matériaux est nécessaire pour réaliser les simulations sous le logiciel ANSYS. Les caractéristiques mécaniques à définir sont la densité ρ (en kg/m^3), le module de Young E (en GPa) et le coefficient de Poisson ν . Le seul paramètre électrique à définir est la matrice des permittivités relatives $[\varepsilon]$ (en F/m). Enfin, les caractéristiques piézoélectriques traitées par ANSYS correspondent aux paramètres définis dans l'équation A.1 de l'Annexe A, soit la matrice de rigidité à déformation constante $[c^E]$ (en N/m^2) et la matrice des constantes piézoélectriques $[e]$ (en C/m^2).

Les matériaux piézoélectriques sont régis par les équations électromécaniques de comportement :

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C^E & e \\ e & -\varepsilon^e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ -E \end{Bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Avec σ : vecteur de contrainte, d : vecteur d'intensité électrique, ε : vecteur de déformation, C^E : matrice d'élasticité, e : matrice piézoélectrique et ε^e : matrice de permittivité.

Monocristal LiNbO_3

Matrice d'élasticité

$$\begin{bmatrix} 20,3 & 5,3 & 7,5 & 0,9 & 0 & 0 \\ 5,3 & 20,3 & 7,5 & -0,9 & 0 & 0 \\ 7,5 & 7,5 & 24,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0,9 & -0,9 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 7,5 \end{bmatrix} * 10^{10} \text{ N/m}^2$$

Matrice piézoélectrique

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 3,65 & -2,39 \\ -2,39 & 2,39 & 0 & 3,65 & 0 & 0 \\ 0,31 & 0,31 & 1,72 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ C/m}^2$$

Masse volumique : 4700 Kg/m^3

Monocristal SiO_2

Annexe

Matrice d'élasticité

$$\begin{bmatrix} 8,67 & 0,69 & 1,19 & 1,79 & 0 & 0 \\ 0,69 & 8,67 & 1,19 & -1,79 & 0 & 0 \\ 1,19 & 1,19 & 10,72 & 0 & 0 & 0 \\ 1,79 & -1,79 & 0 & 5,79 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5,79 & 1,79 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,79 & 3,98 \end{bmatrix} * 10^{10} N / m^2$$

Matrice piézoélectrique

$$\begin{pmatrix} 0,171 & -0,171 & 0 & 0,0403 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0403 & -0,0806 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} C / m^2$$

Masse volumique : 2650 Kg/m³

Céramique piézoélectrique PZT PIC255

Matrice d'élasticité

$$\begin{bmatrix} 10,52 & 5,83 & 5,54 & 0 & 0 & 0 \\ 5,83 & 10,52 & 5,54 & 0 & 0 & 0 \\ 5,54 & 5,54 & 8,59 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,1 \end{bmatrix} * 10^{10} N / m^2$$

Matrice piézoélectrique e_{ij}

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11,57 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 11,57 & 0 \\ -7,25 & -7,25 & 14,41 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} C / m^2$$

Masse volumique : 7800 Kg/m³

Céramique piézoélectrique PZT PIC141

Matrice d'élasticité

$$\begin{bmatrix} 12,4 & 7 & 7,4 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 12,4 & 7,4 & 0 & 0 & 0 \\ 7,4 & 7,4 & 13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,9 \end{bmatrix} * 10^{10} N / m^2$$

Matrice piézoélectrique

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 13,8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 13,8 & 0 \\ -4,2 & -4,2 & 19,6 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} C / m^2$$

Masse volumique : 4700 Kg/m³

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ABA 16] J. Abadie, N. Chaillet, and C. Lexcelent. An integrated shape memory alloy micro-actuator controlled by the thermoelectric effect. *Sensors and Actuators A*, 99 (2002) 297-303.
- [AGN 03] Agnus J., « Contribution a la micromanipulation : étude, réalisation, caractérisation et commande d'une micro-pince piézoélectrique », Thèse de doctorat, LAB -CNRS Université de Franche-Comte, 2003.
- [AKI 93] AKIYAMA T. et SHONO K. (1993). « Controlled stepwise motion in polysilicon microstructures », *Journal of Micromechanical Systems*, 2(3): 106110.
- [AMA 90] I. Amato, Smart as a brick, *Science News*, 137(10):152-153, 1990.
- [ASH 74] ASHKIN A. (1974). « Apparatuses for trapping and accelerating neutral particles », United States Patent, brevet n° US 3 808 550.
- [ASH 87] ASHKIN A. , DZIEDZIC J. M. et YAMANE T. (1987). « Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams », *Nature*, 330: 769771.
- [AST 08] <http://www.science-explorer.de/astronomie/astro.htm>. (25 avril 2008).
- [BAR 90] D. Bellet and J. Barrau, "Cours d'élasticité," Publié avec le concours du MRT, Paris, 1990. [IEEE 87] IEEE, "Ieee standard on piezoelectricity," ANSI/IEEE Std 176, 1987.
- [BAZ 92] A. BAZ, S. POH, M. MUTA and J. GILHEANY 'Active control of Nitinol-reinforced beam', *Intelligent structural systems*, pp169-212, 1992.
- [BEL 95] D. D. et D. Bellet, "Elasticité linéaire," Paris, 1995.
- [BEL 98] BELFORTE G. , SORLI M. et GASTALDI L. (1998). Properties and mechanical performances of PZT actuators », *ACTUATOR'98, 6th International Conference on New Actuators*, Bremen - Allemagne, pp. 313317.
- [BER 90] M.SANSONETTI, Bertin & Cie
- [BLO 04] Blondy P., Mercier D., Cros D., Guillon P., Rey P., Charvet P., Diem B., Zanchi C.,Lapierre L., Somb J., IEEE International MTT-S, Workshop, Seattle, USA, June 2002.
- [BOI 06]. O. Boissonneault, F. Wong, Rapport technique DRDC Valcartier, TR 2006-036, 2006.
- [BON 02] BONVILAIN A. (2002). Etude et réalisation d'un microrobot à pattes : structure mécanique et micro-actionnement, Thèse de l'Université de Franche-Comté.
- [BOU 02] BOURJAULT A. et CHAILLET N. (2002). La microrobotique, Hermes.
- [BRI 07] M. Brissaud, Matériaux piézoélectriques. cpresse polytechniques et universitaires romandes, 2007.
- [BUR 79] BURFOOT, J.C and TAYLOR, G.W. Polar diélectrics and their applications. London : Mac Millan press, 1979, 465 p.
- [CED 05] Cédric Clevy. Contribution à la micromanipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage. PhD thesis, Université de Franche-Comté, décembre 2005.
- [CHA 89] P. Champ, Modélisation et caractérisation sous haut niveau de sollicitation mécanique des céramiques piézoélectriques, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1989.
- [CHA 99] CHAILLET N., AGNUS J. , HADDAB Y. , ROUGOET P. et BOURJAULT A. (1999). « Components for the development of a station for macromaipulation tasks in the micro-world », *Proceeding of 37' c International Workshop on Mechatronics and Systems - IARP'99*, Moscou - Russie, pp. 109114

- [CUL 96] B. Culshaw, Smart Structures and Materials, Artech House, 1996.
- [DAI 99] Daihua Wang, Jianshen Liu, Degao Zhou and Shanglian Huang, Using PVDF piezoelectric film sensors for in situ measurement of stayed-cable tension of cablestayed bridges, Smart Mater. Struct. 8 (1999) 554-559.
- [DAF 06] M. Dafflon, B. Lorent, and R. Clavel. A micromanopulation setup for comparative tests of microgrippers. In Proc. of ISR, Germany, 2006.
- [DRO 01] S. Droz et al. New generation of grippers for the manipulation of miniaturized components. In Proc. of Mechatronics, Besancon, France, October (2001) 572-575.
- [DRI 06] W. Driesen, T. Varidel, S. Régnier, and J-M. Breguet. Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobiles micro robots. In Proc. of IWMMF, China, 2004.
- [DAV 92] J.R. Davis : Nondestructive evaluation and quality control, Vol.17, ASM, Metals Park, 1992.
- [DU 99] DU H. , SU C. , LIM M.K. et JIN W.L. (1999). « A micromachined thermally-driven gripper : a numerical and experimental study », Journal of Smart Materials and Structures, (8): 616622.
- [EYR 95] EYRAUD, L., la céramique piézoélectrique et ses applications électroacoustiques Lyon : Département génie électrique de l'INSA. 1995, 205 p
- [FUL 68] FULWYLER M.J. (1968). « Particle separator », United States Patent, United States Patent, Brevet n° US 3,380,584.
- [GAKh,00] G. Akhras, "Smart Materials and Smart Systems for the Future". Canadian Military Journal, autumn 2000, pp. 25-31.
- [GAS 97] GASCOYNE P. WANG X. , HUANG Y. et BECKER F. (1997). « Dielectrophoretic separation of cancer cells from blood », IEEE -Transactions on Industry Applications, 33(3): 670678.
- [GAU 02] GAUTHIER M. (2002). Conception et commande d'un dispositif magnétique de micromanipulation par poussée, Thèse de l'Université de Franche-Comté, France.
- [GEN 01] GENGENBACH U. , HOFMANN A. , ENGELHARDT F. , SCHARNOWELL R. et KÖHLER B.(2001). « The microgripper construction kit », Proceedings of SPIE Microrobotics and Microassembly III, Vol. 4568, Newton - Etats-Unis, pp. 2431.
- [GER 93] M. Géradin and D. Rixen. Théorie des vibrations. Masson, Paris, 1993. [COU 80] : J. Courbon. Plaques minces élastiques. Editions Eyrolles, Paris, 1980
- [GON 98] P. Gonnard : Mise en oeuvre et performances des matériaux piézoélectriques, MAGELEC 98, pp. 15-28, Avril 1998. [RIZ 99] N. Rizet : Contrôle actif de vibrations utilisant des matériaux piézo-actifs, PhD Thesis, INSA Lyon, 1999.
- [GUE 02] Guedra-Degeorges D., et al., « Emerging health monitoring technologies: A route towards a flexible maintenance of aerospace structures », Proceedings of Conference on Structural Health Monitoring, These de doctorat a l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [HAD 00] Haddab Y., « Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique », These de doctorat, LAB - CNRS Université de Franche-Comte, 2000.

- [**HAH 00**] HADDAB Y. , CHAILLET N. et BOURJAULT A. (2000b). « A microgripper using smart piezoelectric actuators », Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, Takamatsu - Japon.
- [**HAU 98**] P. Hauptmann, R. Lucklum, A. Puttmer, B. Henning : Sensors and Actuators, pp. 32-48, 67, 1998.
- [**HER 06**] D. Hériban, J. Agnus, and M. Gauthier. Micro-manipulation of silicate micro-sized particles for biological applications. In Proc. IEEE IWMP, France, 2006. [**HEI 86**] HEISERMAN D.L. (1986). « Piezoelectric polymer micromanipulator », United State Patent, brevet n° US 4,610,475.
- [**HEM 02**] T. Hemsel, T. Littmann, J. Wallaschek : 2002 IEEE Ultrasonic Symposium : Piezoelectric Transformers - State of the art and development trends, University of Paderborn, Germany.
- [**HUA 00**] Su-Huan Chen, Guo-Feng Yao and Cheng Huang, "A new intelligent thin-shell element", Smart Mater. Struct. 9 (2000) 10-18.
- [**HYU 00**] Ju Hyun Yoo, Jae II Hong, Wenwn Cao , "Piezoelectric ceramic bimorph coupled to thin metal plate as cooling fan for electronic devices", Sensors and Actuators 79 2000.8-12
- [**IKE 90**] T. IKEDA, Fundamentals of Piezoelectricity. Oxford Science, 1990.
- [**JEO 01**] JEONG Y. , KIM S. , CHO D.D. , CHANG J. et CHUN K. (2001). « A Cyclic Capillary Electrophoresis Separator on Silicon Substrate with Synchronized-Switching », Proc of the 1st Intelligent microsystem symposium - IMS2001, Seoul - Korea, pp. 640648.
- [**JUN 90**] Junkins J.L., « Mechanics and control of large flexible structures», DC: AIAA Press, Washington, pp. 705, 1990.
- [**Kob 08**] T. Kobayashi, M. Ichiki, T. Noguchi, R. Maeda, Deflection of wafers and cantilevers with Pt/LNO/PZT/LNO/Pt/Ti/SiO₂ multilayered structure, Thin Solid Films 516 (2008) 5272-5276.
- [**KRA 77**] J. Krautkramer, H. Krautkramer : Ultrasoning Testing of Materials, Springer-Verlang, Berlino, 1977.
- [**KUR 86**] K.KURI BAYASHI 'A new actuator of a joint mechanism using TINI alloy wire', the international journal of Robotics research, vol.4, 99 47-58, 1986.
- [**LAM 03**] LAMBERT P. , LETIER P. et DELCHAMBRE A. (2003). « Capillary and surface tension forces in manipulation of small parts », Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Besançon - France, pp. 5459.
- [**LAM 78**] LAMBECK, P.V and JONKER, G.M. Ferroelectric domain stabilization in BaTiO₃ by bulk ordering of defects. Ferroelectrics, 1978, Vol. 22, pp. 729-731.
- [**LER 96**] LERCH P. , SLIMANE C. K. , ROMANOWICZ B. et RENAUD P. (1996). « Modelization and characterization of asymmetrical thermal micro-actuators », Journal of Micromechanics and Microengineering, (6): 134137.
- [**LIU 04**] J. Liu, Y-X. Zhou, and T-H. Yu. Freeze tweezer to manipulate mini/micro objects. Journal of Micromechanics and Microengineering, 14 (2004) 269-276.
- [**LOP 08**] B-C Lopez Walle. Etude de la micro-préhension par gel pour la micromanipulation immergée. PhD thesis, Doctorat de l'université de Franche-comté en Automatique, Février 2008.
- [**LON 80**] L. LongTu : Piezoelectric ceramic transformer, Ferroelectrics, Vol.28, p.403, 1980.

- [TSU 01] T. Tsuchiya, Y. Kagawa, N. Wakatsuki, H. Okamura : Finite Element Simulation of Piezoelectric Transformers, IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.48, No.4, July 2001.
- [MAL 02] Malhis M., « Controle actif modal flou des rotors flexibles par plan d'action piezoelectrique » , These de doctorat, INSA-Lyon, 2002.
- [MAN 02] Mannur J Sundaresan, Anindya Ghoshal and Mark J Schulz, "A continuous sensor for damage detection in bars", Smart Mater. Struct. 11 (2002) 475-488
- [MER 03] Mercier D., « Conception, modelisation, fabrication et caracterisation de composants MEMS RF » , These de doctorat, Universite de Limoges, N°70-2003.
- [NGU 06] C.H. Nguyen, S.J. Pietrzko, FE analysis of a PZT-actuated adaptive beam with vibration damping using a parallel R-L shunt circuit, Finite Elements in Analysis and Design, 42: 2006,1231-1239.
- [MOH 03] Mohsen Dadfamia, Nader Jalili, Zeyu Liu, Darren M. Dawson, An observer-based piezoelectric control of flexible Cartesian robot arms: theory and experiment, Control Engineering practice (2003)
- [MON 00] Monnier T., et al., « The piezoelectric implant method: implementation and practical applications » , Smart Materials and Structures, Vol. 9, pp. 267-272, 2000.
- [NDA 00] Ndambi J. M., et al., « Comparison of techniques for modal analysis of concrete structures » , Engineering Structures, Vol. 22, pp. 1159-1166, 2000.
- [NOG 96] B. NOGAREDE, "Moteurs piézoélectriques," Techniques de l'ingénieur, D3765, 1996.
- [NUR 84] Nurre G. S., Rayan R. S., Scofield H. N. and Sims J. L., « Dynamics and control of large space structures » , J. Guidance, Control and dynamics, Vol. 7, pp. 514-526, 1984.
- [PAI 95] J. S. N. PAINE, C. A. ROGERS and R. SMITH 'Adaptative composite materials with shape memory alloy actuators for cylinders and pressure vessels', Journal of intelligent material systems and structures, Vol.6; pp210-219,1995.
- [PAR 01] Park J. Y., Yee Y. J., Nam H. J., Bu J. U., « Micromachined RF MEMS tunable capacitors using piezoelectric actuators » , IEEE International MTT-S, Phoenix, AZ, USA, May 2001.
- [PAR 86] P.-A. Paratte et P. Robert, "SYSTEMES DE MESURES", Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1986.
- [PAT 94] Patoor E. et Berveiller M., Technologie des alliages à mémoire de forme, comportement mécanique et mise en oeuvre, Paris: Hermès, 1994.
- [PET 03] Petitjean B., Saniger J., and Dupuis J.-P., « Maintenance flexibility through structural health monitoring: Examples on EADS products » , Proceedings of Conference on Structural Health Monitoring, Stanford University, USA, 2003.
- [PHI 91] Philips, "PIEZOELECTRIC CERAMICS PROPERTIES AND APPLICATIONS", Mullard House, London, 1991.
- [PRA 01] Prabhakar S., Sekhar A. S., and Mohanty A. R., « Detection and monitoring of cracks using mechanical impedance of rotor-bearing system » , Journal of Acoustical Society of America, Vo. 110, pp. 2351-2359, 2001.
- [REG 10] S. Regnier M. Gauthier, P. Lambert. Microrobotics for micromanipulation, Chapter 1 - Physics of the microworld. Wiley Edition, Juin 2010.

- [REG 06] S. Régnier. La manipulation aux échelles microscopiques. Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, 2006.
- [RIT 10] Rith LY, Modélisation multi-physique d'actionneurs piézoélectriques et essais d'assistance au forgeage, 2010
- [ROS 86] M. Rossi, "ELECTROACOUSTIQUE", Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1986.
- [RUA 01] Ruan M., Shen J., Wheeler C.B., IEEE J. Microelectromechanical Systems, Vol. 10, pp. 511, 2001.
- [SMI 89] SMITS J.G. et DALKE Si. (1989). « The constituent equations of piezoelectric bimorphs », IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 781784.
- [SMI 91] SMITS J.G. et CHOI W.S. (1991). « The constituent equations of piezoelectric heterogeneous bimorphs », IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 38, pp. 256270.
- [SRI 96] A.V. Srinivasan, Smart biological systems as models for engineered structures, Materials Sciences & Engineering, C(4):19-26, 1996.
- [TSU 01] T. Tsuchiya, Y. Kagawa, N. Wakatsuki, H. Okamura : Finite Element Simulation of Piezoelectric Transformers, IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.48, No.4, July 2001.
- [TUR 94] R.C. Turner, P.A. Fuierer, R.E. Newnham, T.R. Shrout : Applied Acoustic, pp. 299-324, 41, 1994.
- [UCH 00] K. Uchino, Ferroelectric Devices. Copyright by Marcel Dekker, Inc., 2000.
- [VAN 00] VAN DEN ENGH G.J. (2000). « High speed flow cytometer droplet formation and method », brevet n° US 6 133 044.
- [WAN 09] <http://perso.wanadoo.net.ma/orthobest/ortho.htm>. (25 avril 2009).
- [WAT 04] T. Watanabe, N. Fujino, and Z. Jiang. Micromanipulation using squeeze effect. In Proc. of IEEE IROS, 4 (2004) 3357-3362.
- [WEV 97] Wevers M., « Listening to the sound of materials: acoustic emission for the analysis of material behaviour », NDT & E International, Vol. 30, pp. 99-106, 1997.
- [WIL 00] Williams R.B., Inman D. J., « An overview of composite actuators with piezoceramic fiber », www.smart-material.com.
- [WIL 01] Wilcox P. D., Lowe M., and Cawley P., « The effect of dispersion on longrangeinspection using ultrasonic guided waves », NDT & E international, Vol. 34, pp. 1-9, 2001.
- [WUT 00] WUTHRICH (2000). « Préhenseurs », Actes de l'Association Suisse de Microtechnique, Lausanne - Suisse, pp. 8588.
- [YAN 16] Z.Y. Yang, X.H. Zheng, Y. Wu, W. Cai, Martensitic transformation and shape memory behavior of Ti-V-Al-Fe lightweight shape memory alloys, Journal of Alloys and Compounds, 680 (2016) 462-466.
- [YAN 16] S. Yang, C. Wang, Z. Shi, J. Wang, J. Zhang, Y. Huang, X. Liu, Microstructure, martensitic transformation, mechanical and shape memory properties of Ni-Co-Mn In high-temperature shape memory alloys under different heat treatments, Materials Science and Engineering: A, 655 (2016) 204-211.
- [YAO 99] YAO K. , ZHU W. , UCHINO K. , ZHANG Z. et LIM L.C. (1999). « Design and fabrication of a high performance multilayer piezoelectric actuator with bending déformation »,

IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 46, pp. 10201027.

[ZHO 01] ZHOU Q. , AURELIAN A. , CORRAL C. , ESTEBAN P.J. , KALLIO P. , CHANG B. et KOI~O H.N. (2001). « A microassembly station with controlled environment », Proceedings of SPIE Microrobotics and Microassembly III, Vol. 4568, Newton - Etats-Unis, pp. 252260.

[ZHO 98] ZHOU Y. et NELSON B. J. (1998). « Adhesion force modeling and measurement for micromanipulation », Proceedings of the SPIE International Society for Optical Engineering, Vol. 3539, pp. 169180.