

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre : 196/Mag/2008

Série : 004/GM/2008

MEMOIRE  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MAGISTER

EN GENIE MECANIQUE  
OPTION : Mécanique Appliquée en Engineering

THEME

**ANALYSE ET MODELISATION DU  
COMPORTEMENT MECANIQUE DES  
MATERIAUX ORTHOTROPES INTELLIGENTS  
SOUS DIVERSES SOLLICITATIONS**

Présenté par :

Monsieur LEBIED Abdelaziz

Soutenu le : 18 / 06 /2008 devant le jury :

Président : Mr. A.BOUCHOUCHA  
Rapporteur : Mr. B.NECIB  
Examineur : Mr. S.MEZIANI  
Mr. A.BELLAOUAR

Prof. Université Mentouri Constantine  
Prof. Université Mentouri Constantine  
Prof. Université Mentouri Constantine  
Prof. Université Mentouri Constantine

## REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à remercier Mr. Brahim NECIB, Professeur au département de génie mécanique, Université Mentouri Constantine, Directeur du laboratoire de mécanique et, encadreur de mon mémoire de magister, pour la confiance qu'il m'a accordé en me proposant ce mémoire. De plus, son enthousiasme et sa confiance qui m'ont donné les motivations nécessaires pour réaliser ce travail. Je n'oublierai pas la grande humanité dont il m'a fait preuve.*

*Je souhaite également remercier les membres du jury de mon mémoire composé de :*

*Mr. Ali BOUCHOUCHA, Professeur au département de génie mécanique, Université Mentouri Constantine, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être président du jury de soutenance de ce mémoire. Je remercie également Messieurs S.MEZIANI, et A.BELAOUAR, Professeurs au département de génie mécanique, Université Mentouri Constantine, pour l'importance qu'ils ont accordé à mon travail en acceptant d'être membre de ce jury.*

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

*Aussi je remercie tous les enseignants du département de Génie Mécanique qui sont contribués à ma formation de poste graduation.*

*Par ailleurs je n'oubli pas les conseils constructifs de mon ami, collègue et frère Mr.M.SAHLI, 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.*

## DEDICACES

*Je tiens à remercier plus particulièrement ma petite famille qui m'a toujours laissé la liberté dans le choix de mon cursus scolaire et qui a été toujours auprès de moi dans toutes les circonstances ainsi que son soutien moral qui m'ont permis d'arriver à ce stade et achever le travail de mon magister dans de bonnes conditions. Qu'elle trouve, dans ces travaux et ce manuscrit, le témoignage de toute la reconnaissance et de l'amour que je leur porte.*

*A ma femme*

*A ma petite belle fille bien aimée « Meissa »*

*A mon adorable fils « Louei »*

*A mes parents*

*A toute la grande famille et tous mes amis, plus particulièrement :*

*Soufiane, Abderezak, Salim*

*Je dédie ce travail*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I : Les matériaux intelligents: définition et application</b>	6
I.1 Introduction	7
I.2 Les matériaux intelligent	7
I.2.1 Définition	7
I.2.2 Description des éléments	9
I.2.2.1 Fonction capteur	9
I.2.2.2 Fonction mémoire et processeur	10
I.2.2.3 Fonction actionneur	10
I.3 Analogie de la structure intelligente et le corps humain	11
I.4 Matériaux intégré dans les systèmes intelligents	12
I.5 Description des divers matériaux intelligents	12
I.5.1 Les matériaux à effet de couplage électromécanique	12
I.5.1.1 Les céramiques piézoélectriques	12
I.5.1.2 Les polymères piézoélectriques	13
I.5.1.3 Les céramiques électrostrictives	14
I.5.1.4 Les polymères ioniques	15
I.5.1.5 Les fluides électro rhéologiques	17
I.5.2 Les matériaux thermoactifs	19
I.5.3 Les matériaux à effet de couplage magnéto- mécanique	22
I.5.3.1 Les matériaux magnétostrictifs	22
I.5.3.2 Les fluides magnéto rhéologiques	23
I.5.4 Les fibres optiques	24
I.6 Application des matériaux intelligents	26
I.6.1 Industrie de l'habitat et de loisirs	26
I.6.2 Domaines de l'agroalimentaire de la pharmacie ou des cosmétiques	27
I.6.3 Domaine de génie-civil	28
I.6.4 Domaine de la biotechnologie et de la médecine	28
I.6.5 D'autres industries	29
I.7 Conclusion	30

<b>Chapitre II : les matériaux intelligents piézoélectriques</b>	32
II.1 Introduction	33
II.2 Définition de la piézoélectricité	33
II.3 Matériaux piézoélectriques	35
II.4 Polarisation des matériaux ferroélectriques	36
II.5 Cycle d'hystérésis	37
II.6 Vieillessement	38
II.7 Principaux matériaux piézoélectriques	39
II.8 Choix du PZT	40
II.9 Les matériaux piézoélectriques : les zircono-titanates de plomb	41
II.9.1 Cristallographie du PZT: la maille perovskite	41
II.9.2 Procède de fabrication des matériaux PZT	44
II.10 Application des matériaux piézoélectriques	45
II.11 Conclusion	47
<b>Chapitre III : Mise en équation des matériaux piézoélectriques</b>	48
III.1 Introduction	49
III.2 Notions de mécanique des solides	50
III.2.1 Le tenseur des contraintes	50
III.2.2 Le tenseur des déformations	51
III.2.3 La relation contrainte – déformation	52
III.3 Matériau orthotrope	54
III.4 Matériau isotrope	55
III.5 Théorie linéaire de la Piézoélectricité	56
III.5.1 Considérations mécaniques	56
III.5.2 Considérations électriques	57
III.5.3 la piézoélectricité linéaire	57
III.6 Formalisme général et coefficients piézoélectriques	58
III.7 Modes de déformation	62
III.8 Conclusion	65
<b>Chapitre IV : Modélisation analytique et numérique des actionneurs piézoélectrique</b>	66
IV.1 Introduction	67
IV.2 Principe de l'actionneur piézoélectrique	68
IV.3 Modélisation des éléments piézoélectriques	70

IV.3.1 Actionneur axial	72
IV.3.2 Actionneur transversal	74
IV.3.3 Actionneur en cisaillement d'épaisseur	75
IV.3.4 Actionneur piézo-électrique bimorphe	75
IV.3.4.1 Calcul de la flèche d'un actionneur piézoélectrique soumis à l'accélération Gravitationnelle	77
IV.3.5 Actionneur piézo-laminé	79
IV.4 Simulations électromécaniques par méthode des éléments finies	83
IV.4.1 La théorie des poutres: une première approche	85
IV.5 Modélisation par éléments finis des structures adaptables	87
IV.5.1 Poutre piézoélectrique bimorphe	87
IV.5.1.1 Résultats et discussions	88
IV.5.2 Plaque adaptable Al/PZT	90
IV.5.2.1 Hypothèse et conditions aux limites	90
IV.5.2.2 Résultats et discussions	92
IV.5.2.2a Sensibilité sous différents actionneurs	92
IV.5.2.2b Sensibilité du coefficient transversal $d_{31}$	94
IV.5.2.2c Sensibilité du coefficient longitudinal $d_{33}$	95
IV.6 Conclusion	96
<b>Chapitre V : Exemples d'applications de microsystèmes à base de matériaux</b>	
<b>Piézoélectriques</b>	97
V.1 Introduction	98
V.2 Approches pour la conception de micromanipulateurs	98
V.2.1. Une micro pince	98
V.2.2 Modélisation électromécanique d'une micro pince	101
V.3 Approches pour la conception d'un micro commutateur	103
V.3.1 Les micro commutateurs MEMS	103
V.3.2 Modélisation électromécanique du micro commutateur	104
V.4 Conclusion	107
<b>Conclusion générale</b>	108
Annexe 1	112
Annexe 2	116
Bibliographie	120

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Les nouveaux matériaux orthotropes occupent actuellement une place importante dans l'histoire de la recherche scientifique et la technologie moderne spécialement dans les domaines du génie mécanique, l'aéronautique et du génie biomécanique. Ils influent non seulement à l'évolution sociale des pays mais également à leur culture et leur évolution. La maîtrise de ces matériaux « nouveaux » repose sur différentes périodes temporelles telles que : âge de pierre, âge de bronze, âge de fer et enfin âge des matériaux nouveaux. Si les métaux étaient les matériaux du XIX<sup>e</sup> siècle, les composites sont ceux de la fin du XX<sup>e</sup>. Les objectifs de recherche en matière de nouveau matériau son gain de performance baisse de coût de fabrication de produit, et sauvegarde ou même amélioration de la fiabilité. C'est donc dans une logique de développement que s'inscrit l'orientation des recherches.

L'homme a pris l'habitude de se glorifier de ses inventions. Il en publie même avec fierté des catalogues réguliers. Néanmoins, un regard plus attentif sur la nature devrait nous ramener à plus d'humilité. Les matériaux intelligents n'échappant pas à cette copie de la nature, ils sont aussi modelés sur la grande majorité des systèmes biologiques dont l'être humain fait partie. Recevoir, Analyser et réagir sont les trois fonctions-clés qui les composent.

Les premiers initiateurs de cette nouvelle technologie furent inévitablement les militaires, et plus particulièrement, les américains au début des années 80. En effet, le plus grand imitateur de la nature reste l'armée. Citons pour exemples, les chasseurs F111 et F14 de l'US Air Force qui présente des ailes à géométrie variable d'une portance optimum, comparable à celle des grands oiseaux. Egalement, le revêtement des sous-marins, inspiré de la structure de la peau du dauphin, a augmenté leur fluidité de 250%. Nous précisons par la suite l'analogie existante entre ces matériaux dit "intelligent" et le fonctionnement du corps humain [1].

Une définition très générale consiste à dire qu'il s'agit de matériaux auto-adaptables à un environnement quelconque. Par conséquent, ils seront capables de contrer des phénomènes inconnus pouvant même être nuisibles au bon fonctionnement d'une structure.

La plupart sont conçus de nos jours dans un but de multifonctionnalité. Cette multifonctionnalité est cherchée essentiellement au sein des matériaux hétérogènes, les composite ou l'on cherche des propriétés a priori contradictoires. Ainsi une haute résistance mécanique peut être associée à une basse densité, fait qui semblait difficile à atteindre il y a encore peu de temps. On conçoit alors le matériau comme un système complexe, élaboré sur mesure et répondant à des critères précis, définis par l'utilisateur.

## Introduction générale

Ce concept apparaît aujourd'hui insuffisant. En effet, il correspond à des conditions standards d'utilisation, même si, et de plus en plus, des conditions extrêmes sont prise en compte, comme un cure centenaire sur un barrage ou un choc sur une automobile. Ainsi est apparue la nécessité de s'attacher à des matériaux dits adaptatifs ou intelligents capables d'ajuster leur comportement aux conditions extérieures.

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'autoréparation ou l'autodestruction quand ils ne remplissent plus leurs fonctions.

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 ordinateur 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.

Ce travail consiste en l'étude et la modélisation d'une structure intelligente. Cette structure est réalisée à partir des matériaux multifonctionnelles généralement appelés PZT (zircono-titanate de plomb), apparus depuis les années 50. Ces céramiques piézoélectriques sont actuellement utilisées pour leurs propriétés diélectriques et piézoélectriques comme transducteurs, capteurs, moteurs à ultrasons [2].

Dans ce mémoire, nous présenterons dans le premier chapitre un état de l'art sur les matériaux intelligents, l'étude a porté sur une recherche bibliographique de l'ensemble des matériaux intelligents ainsi que les différents domaines d'applications (actionneur, capteur, etc....).

Le deuxième chapitre est constitué tout d'abord une introduction à la piézoélectricité et la ferroélectricité. Nous présentons ensuite les matériaux ferroélectriques, les principaux matériaux piézoélectriques de structure perovskite en détaillant plus particulièrement les solutions solides de zircono-titanate de plomb (PZT). Enfin, ce chapitre comprend également les différentes applications d'un matériau piézoélectrique.

## Introduction générale

Dans le chapitre trois, 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 mise en équation de la piézoélectricité.

Le chapitre quatre est consacré à la modélisation du comportement des céramiques piézoélectriques en champ électrique et en contrainte mécanique. Ces phénomènes n'étant pas modélisables analytiquement, nous aurons recours à la simulation par éléments finis menées à l'aide du logiciel ANSYS<sup>®</sup>. Cette modélisation permet donc de simuler les déformations dans une structure intelligente soumise à des champs électriques et des sollicitations mécaniques simples. De plus, cette dernière permet de prendre en compte le couplage électromécanique. Elle pourrait subir une extension permettant de prendre en compte les effets plus complexes.

Enfin, dans le chapitre cinq des exemples d'applications sur des matériaux piézoélectriques souvent utilisés dans la vie industrielle en utilisant logiciel ANSYS<sup>®</sup>. Des résultats numériques analytiques ont été trouvés et de bonnes concordances ont été observées.

## **Chapitre I**

# **MATERIAU INTELLIGENT DEFINITION ET APPLICATION**

## **I.1 Introduction**

Les matériaux classiques tels que l'acier, l'aluminium et le cuivre peuvent être qualifiés passifs [3]. Ils ont été élaborés afin de répondre à un seul type de sollicitation pour le quelle leur comportement est optimal. Si leur état ou les conditions extérieures évoluent, ils ne seront plus capables d'ajuster leur loi de comportement de façon à conserver une réponse optimale. En revanche les matériaux intelligents ou « Smart Materials » sont des matériaux multifonctionnels capables de s'adapter à leur environnement.

Ce matériau est capable de modifier spontanément ses propriétés physiques (sa forme, sa connectivité, sa viscosité ou sa couleur) en réponse à des excitations naturelles ou provoquées (par exemple : des variations de température, des contraintes mécaniques, de champs électriques ou magnétiques) de telle façon, un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Il possède des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux) un actionneur (effectue une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer et stocker des informations).

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 [4], [5], [6].

## **I.2 Les matériaux intelligents :**

### **I.2.1 Définition**

Aucune définition universelle n'est donnée pour les matériaux dits « intelligents ». Ils sont décrits également comme capables 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 intelligents » et « structures intelligentes » 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 ».

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

L'objectif d'une structure « intelligente » ou d'un matériau système n'est pas simplement de remplir des fonctions « programmées a priori » mais d'apprendre et de reprendre, de façon appropriée, à une large gamme de situation. Le résultat technologique est donc un assemblage, de plusieurs composants macroscopiquement distincts autour d'un composant de base originel, chaque élément remplissant une fonction particulière inspirée de celles que possèdent les êtres vivants. On a donc trois composantes principales :

- le capteur
- l'analyseur
- l'actionneur

Avant d'expliquer ce qu'est une structure intelligente, il me semble important de préciser les différents types de structures existantes. Elles sont définies sous quatre formes :

- la structure dite "sensible" : elle ne comprend que des capteurs susceptibles d'apporter au système des informations sur l'environnement ou elle-même et de les transmettre à son utilisateur.
- La structure dite "adaptable" : elle ne comprend que des actionneurs pouvant modifier ses caractéristiques c'est-à-dire que la structure s'adaptera à l'environnement dans lequel elle sera mais sans chercher à déterminer les causes d'un hypothétique changement.

Le but rechercher est de combiner les deux afin d'augmenter toutes les caractéristiques de la nouvelle structure. D'où les deux dernières :

- la structure dite "adaptative" : elle réagit à un seul type de sollicitations suivant une loi de comportement bien définie.

Enfin :

- la structure dite "intelligente" qui réagira à un ensemble de sollicitations en fonction de sensibilité qui lui seront propres. Elle aura également la possibilité de choisir la meilleure réponse à apporter.

Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certain cas, provoquer une action de correction. Il devient ainsi possible de détecter des faiblesses de structure dans le revêtement d'un avion, des fissures apparaissant dans un bâtiment ou un barrage en béton, réduire les vibrations des pales d'hélicoptère.

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

Un matériau intelligent n'existe pas car il serait alors capable d'intuition créative devant une situation inattendue. Le mot « intelligent » constitue donc un abus de langage, mauvaise traduction de l'anglais « smart ». Nous le conservons néanmoins pour désigner une structure adaptative « asymptotique ». L'analogie qui a été faite avec les êtres vivants, et le corps humain en particulier, peut être détaillée de la façon suivante :

- Le matériau originel : le squelette.
- Le réseau de senseurs : les nerfs.
- Le réseau d'actionneur : les muscles.
- Le microprocesseur : le cerveau.

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 intelligente.

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

### **I.2.2 Description des éléments :**

#### **I.2.2.1 Fonction capteur**

La fonction capteur c'est de percevoir les variations des caractéristiques de la structure en ce qui concerne les facteurs extérieurs ou intérieurs, comme par la variation de température, d'humidité, charge mécanique.... Dans ce dernier cas, cette fonction est fréquemment assurée par un dispositif piézoélectrique (pour la charge).

L'exemple classique consiste à insérer le capteur piézo dans un matériau composite. Le capteur peut détecter une perturbation d'origine mécanique en générant une tension électrique qui peut être quantifiée et analysée.

### I.2.2.2 Fonction mémoire et processeur

Ce mécanisme enregistre les signaux capté et transmis par les capteurs. Les caractéristiques des informations perçues sont ensuite comparées avec les informations dites de référence, données acquises lors de la réalisation de la structure. Après examen des différentes données. Ce mécanisme de données transmet alors aux actionneurs les meilleures actions à effectuer comme réponse.

Typiquement cette fonction est assimilée à une forme d'intelligence artificielle exécutable capable de produire une sortie logique par exemple un courant ou même une impulsion électrique qui peut être amplifié et utilisé pour activer l'actionneur.

### I.2.2.3 Fonction actionneur

D'après les éléments qui ont déjà été rapportés, cette fonction est le dernier maillon de l'ensemble de la structure. L'actionneur couplé avec le matériau produit une réponse correspondante à la décision envoyée par le processeur. Les actionneurs ont plusieurs réponses possibles suivant la nature des matériaux qui remplissent cette fonction. Ils peuvent par exemple soit délivrer une contrainte, une déformation (cas des AMF), soit modifier la température. Ainsi le but de ces actionneurs consiste à neutraliser les effets des changements du milieu environnement.

La figure 1.2 récapitule le principe de fonctionnement d'un matériau intelligent et traite le cas de détection de la présence d'une personne.

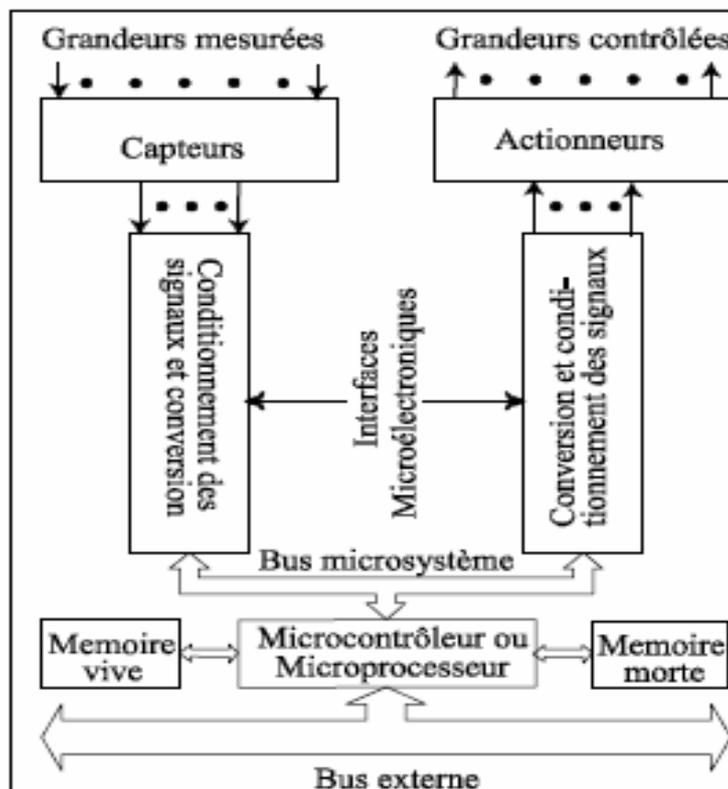


Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'une structure adaptative

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

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 réactivité 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.

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.3 Analogie structure intelligente – corps humain**

Le fonctionnement d'une structure intelligente sera comparable à la physiologie du corps humain, ainsi :

Les capteurs agirant comme le système nerveux pour surveiller et communiquer les stimuli externes.

- Ø Les analyseurs exerceront le rôle du cerveau chargé d'assurer la recherche des performances optimales de la structure en temps réel.
- Ø La matière structurale fournira le squelette.
- Ø Les actionneurs se comporteront comme les muscles, les ligaments pour faire réagir la structure.

Celle-ci pourra être amenée à s'opposer à un environnement hostile, par exemple, un fort champ de température la faisant fondre. Elle devra être en mesure de réagir immédiatement afin d'éviter sa destruction d'où l'analogie remarquable avec la douleur.

Ces quatre constituants principaux que sont les alliages à mémoire de forme, les matériaux piézoélectriques, les fluides électro-rhéologiques et les fibres optiques pourront jouer le rôle soit de capteur soit d'actionneur, ils sont détaillés au paragraphe suivant.

## **I.4 Matériaux intègre dans les systèmes intelligents**

Les matériaux les plus couramment intégrés et amenés à intervenir dans ces structures sont :

- Ø Les systèmes piézoélectriques (piézo céramique) pouvant à la fois tenir le rôle de capteur et d'actionneur,
- Ø Les fluides ou gels électrostrictifs,
- Ø Les fibres optiques utilisées essentiellement comme capteur,
- Ø Et les alliages à mémoire de forme (AMF) employés essentiellement comme actionneur.

## **1.5 Description des divers matériaux intelligents**

### **1.5.1 Les matériaux à effet de couplage électromécanique**

#### **1.5.1.1 Les céramiques piézoélectriques**

La piézoélectricité est le phénomène qui conduit certains matériaux cristallins à produire une charge électrique proportionnelle à la contrainte mécanique qui les déforme (effet direct). Ce phénomène est réversible (effet inverse). L'application d'un champ électrique entraîne alors une déformation mécanique.

Les matériaux ferroélectrique, tels que les céramiques formées de Plomb, Zirconium et Titane (PZT) obtenues par frittage, sont polycristallins et initialement isotropes (aucune direction particulière de la structure n'est privilégiée). Dans ces composés piézoélectriques, l'effet piézoélectrique apparaît après l'application d'un champ électrique intense qui amène l'anisotropie, orientant les dipôles dans une même direction et polarisant ainsi le matériaux.

Les céramiques sont des matériaux très durs (matériaux "fragiles"), dont le module d'Young atteint classiquement 70GPa.

Les céramiques piézoélectriques sont les matériaux les plus couramment utilisées dans la famille des matériaux électroactif en raison de la grande valeur de la constante de charge et du coefficient de couplage élevé qu'elles possèdent.

Elles se présentent sous la forme de céramiques massives (barreau parallélépipédique, cylindre creux, disque) ou sous forme de céramiques multicouches (mise en série mécaniquement de plusieurs céramiques élémentaires en parallèle électriquement) pour obtenir ainsi des déformations plus élevées sous des niveaux de tension réduits.

### **1.5.1.2 Les polymères piézoélectriques**

Le matériau polymère poly fluorure de vinidylène (PVDF ou PVF2 ) est un thermoplastique semi-cristallin. Il est souple, résistant et peut être fabriqué sous forme de film d'épaisseur comprise entre 6  $\mu\text{m}$  et 1 mm et de surface variant de 25  $\times$  25 mm jusqu'à 600  $\times$  600 mm. Le PVDF étant semi-cristallin, il présente une phase amorphe et une phase cristalline. La phase amorphe est formée de chaînes moléculaires désordonnées. La phase cristalline, formée de régions ordonnées plus compactes, présente des structures polaires (dont la phase  $\beta$ ) et une structure non polaire (phase  $\alpha$ ). Le PVDF est le plus souvent obtenu sous sa phase  $\alpha$  qui ne possède pas de propriété piézoélectrique. Afin d'obtenir ces propriétés, le film doit être étiré mécaniquement puis soumis à un fort champ électrique pour aligner tous les moments dipolaires élémentaires, initialement orientés de manière aléatoire. Il découle alors deux états piézoélectriques possibles :

- film étiré uniaxialement : les modes de couplages électromécaniques Favorisés sont les modes {33} et {31},
- film étiré biaxialement : le mode de couplage {33} est privilégié.

Ce matériau est plus rigide et résistant que la plupart des autres polymères et présente une bonne résistance chimique et à la température.

Les caractéristiques piézoélectriques du PVDF sont moins attractives que celles des PZT. En effet, les constantes de charge  $d_{31}$  et  $d_{33}$  variant de 10 à 30 pC/N sont largement plus faibles, la permittivité diélectrique relative se situe aux alentours de 10 et les pertes diélectriques sont élevées ( $\tan \delta = 0.2$ ). Les constantes de tension  $g_{31}$  et  $g_{33}$ , comprises entre 100 et 500 mV.m/N [7], sont plus grandes que pour le PZT (environ 20 mV.m/N ).Enfin, le champ électrique critique est nettement supérieur puisqu'il peut atteindre 100 M V /m.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les films PVDF sont légers (densité  $\sim$  1700 kg/m<sup>3</sup>) et ont des faibles modules d'Young (de 1 à 10 GP a) ce qui les rend très flexibles mais aussi très modulables.

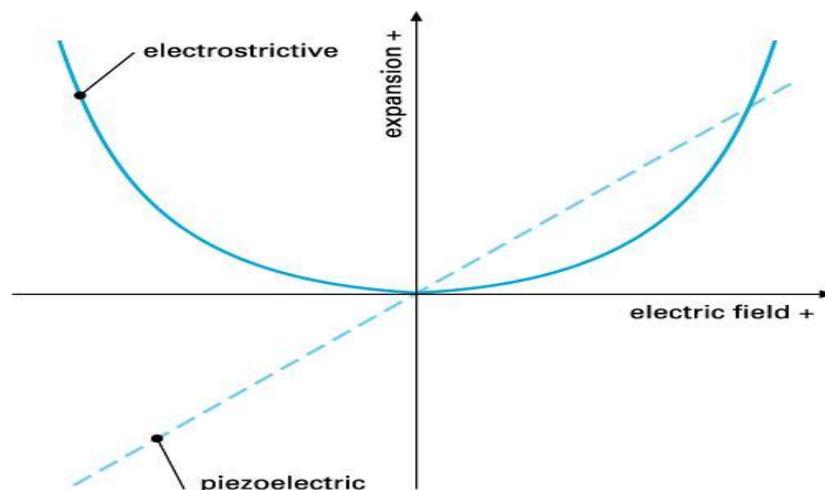
Ils possèdent un coefficient de couplage électromécanique relativement faible puisque compris entre 0,1 et 0,3. Ces quelques données justifient le fait que les polymères PVDF sont le plus souvent utilisés comme capteurs que comme actionneurs.

Il est à noter que des copolymères du PVDF tel que le polyvinylidène trifluoroéthylène (PVDF-TrFE) présentent des caractéristiques quasi identiques à celles du PVDF. Les constantes piézoélectriques sont légèrement supérieures mais des améliorations sont amenées en termes de coefficient de couplage électromécanique ( $k_{ef} > 0,3$ ) et une baisse des pertes diélectriques ( $\tan \delta < 0,1$ ). Pour ces raisons, le PVDF-TrFE devient plus attractif que le PVDF.

### 1.5.1.3 Les céramiques électrostrictives

L'électrostriction, présente dans la plupart des matériaux diélectriques, conduit à des effets généralement négligeables devant ceux que procure la piézoélectricité des corps ferroélectriques. En revanche, pour les matériaux à très grande permittivité diélectrique, la déformation électrostrictive devient non négligeable. Le phénomène d'électrostriction est caractérisé par une dépendance quadratique de la déformation mécanique par rapport au champ électrique, alors que pour l'effet piézoélectrique cette dépendance est linéaire si l'on ne tient pas compte de l'hystérésis (Figure 1.5) [8].

Les céramiques pérovskites aux plombs (PMN) font partie de cette famille. Elles se trouvent sous forme de céramiques massives de type PMN-PT et présentent des permittivités diélectriques relatives pouvant varier de 12000 à la température ambiante jusqu'à 40000 pour une température de 85 °C [9]. Le fait d'exploiter.

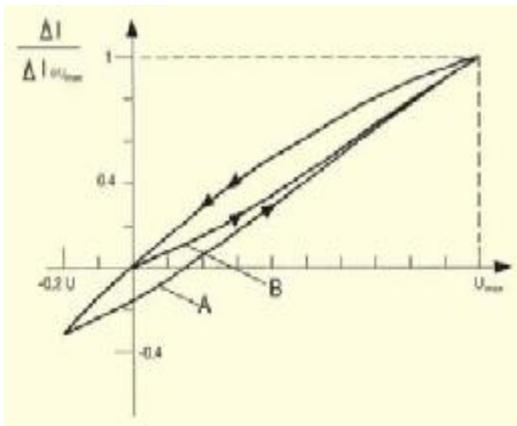


**Figure 1.5. Exemple de tracé allongement/champ électrique**

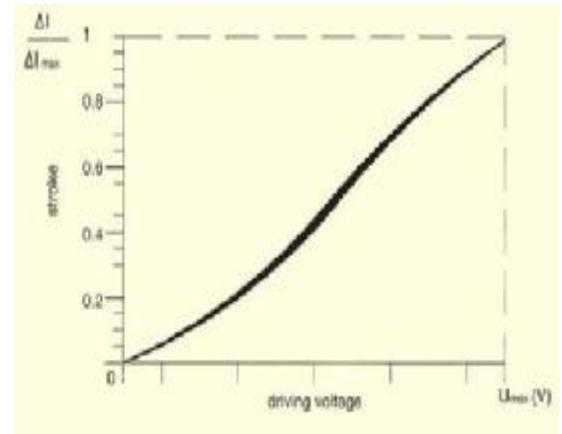
## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

Ces matériaux proches de la température ambiante rend majoritaire l'effet électrostrictif et minoritaire l'effet piézoélectrique donc diminue le phénomène d'hystérésis (Figure 1.6).

Les déformations mécaniques obtenues pour une céramique de type 0,9 PMN–0,1PT peuvent être supérieures à 1000 ppm pour un champ électrique supérieur ou égal à 2 MV/m.



(a) Céramique piézoélectrique PZT



(b) Céramique électrostrictive PMN

**Figure 1.6. Exemples de diagramme déformation normalisée/tension**

Ces matériaux ont fait l'objet de beaucoup de travaux au cours de ces dernières années tant sur l'aspect matériau en lui-même qu'en ce qui concerne leur mise en œuvre (céramiques multicouches) et leurs applications.

### 1.5.1.4 Les polymères ioniques

Les polymères ioniques rassemblent tous les polymères qui utilisent les déplacements diffusionnels d'ions, dans le polymère lui-même ou entre le polymère et son environnement, pour produire une déformation. Il existe différents types de polymère ionique qui peuvent être classés en gels, polymères conducteurs et composites polymères ioniques métal (IPMC). Dans cette partie est décrit le principe d'actionnement de ce dernier. Ces systèmes sont réalisés à partir de membranes organiques conductrices d'ions telles que le Nafion et Flemion sur lesquelles sont déposées des électrodes en platine (Pt) ou en or (Au). Le principe de fonctionnement est illustré sur la Figure 1.4 [10].

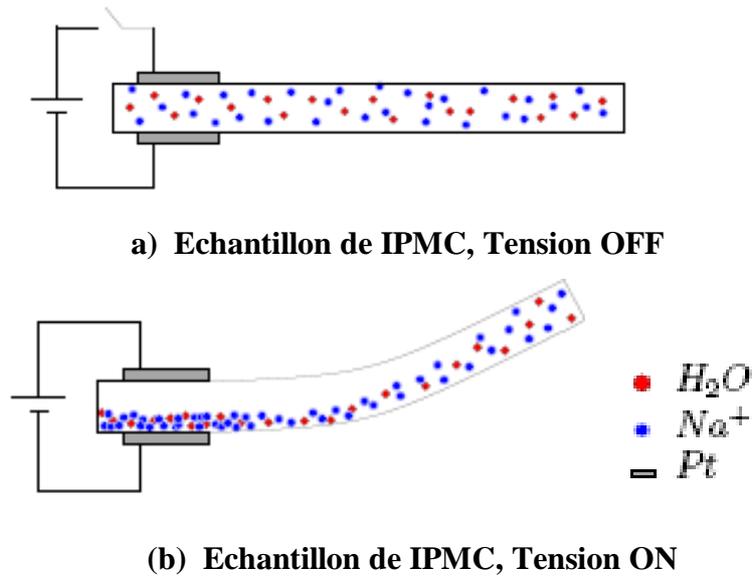


Figure 1.7. Principe de fonctionnement des polymères ioniques

L'application d'un champ électrique entre les électrodes entraîne un déplacement d'ions à l'intérieur du matériau qui, au final, change la répartition du solvant près de chaque électrode. Les cations (ions positifs tel que le  $Na^+$ ) migrent vers la cathode (électrode négative) alors que les anions (ions négatifs), qui sont immobiles dans le polymère, subissent une force attractive de l'anode (électrode positive). Au même instant, les molécules d'eau diffusent vers les régions de grande concentration d'ions positifs, soit près de l'anode, pour équilibrer la distribution de charge. En conséquence, la région proche de la cathode augmente de volume alors que celle proche de l'anode diminue de volume. L'ensemble de ces phénomènes entraîne alors une flexion de l'échantillon d'IPMC vers l'anode.

En termes de comportement mécanique, les IPMC sont limités à des fonctionnements de type flexion. Ils peuvent générer des angles de flexion potentiels importants ( $> 360^\circ$  : effet colimaçon) pour des tensions d'alimentation relativement faible ( $\sim 5$  V) profitant d'une rigidité assez bonne pour ce type de matériau (module d'Young de 0,1 à 0,2 GPa), ils peuvent fournir des pressions de l'ordre de 0,1 MPa. Un des inconvénients réside dans le fait que les IPMC nécessitent de l'eau pour un fonctionnement optimal. Un système fonctionnant dans l'air ambiant devrait être humidifié toutes les 3 – 5 minutes (pertes d'eau dans les électrodes et par évaporation). Enfin, le mouvement initial est très rapide ( $< 0,1$  s) mais pour atteindre des angles de déflexion élevés, le temps final est nettement plus long (il varie avec la tension). Pourtant, les IPMC font l'objet d'études nombreuses tant dans l'élaboration de nouveaux procédés, que dans les applications. Ce matériau est l'un des candidats pour une utilisation en tant que muscle artificiel [11].

### 1.5.1.5 Les fluides électro rhéologiques

Les fluides électro rhéologiques (ER) se réfèrent aux matériaux dont les propriétés rhéologiques (viscosité, taux de cisaillement, résistance élastique, etc...) peuvent varier de manière rapide et réversible lors de l'application d'un champ électrique externe. Lorsque les propriétés rhéologiques du fluide ER (viscosité) augmentent avec le champ électrique appliqué, le phénomène est appelé effet ER positif. Si les propriétés décroissent, il est appelé effet ER négatif. Le principe de l'effet ER positif repose sur la formation de chaînes fibrillaires des particules qui affectent de manière sensible les paramètres rhéologiques (Figure 1.8).

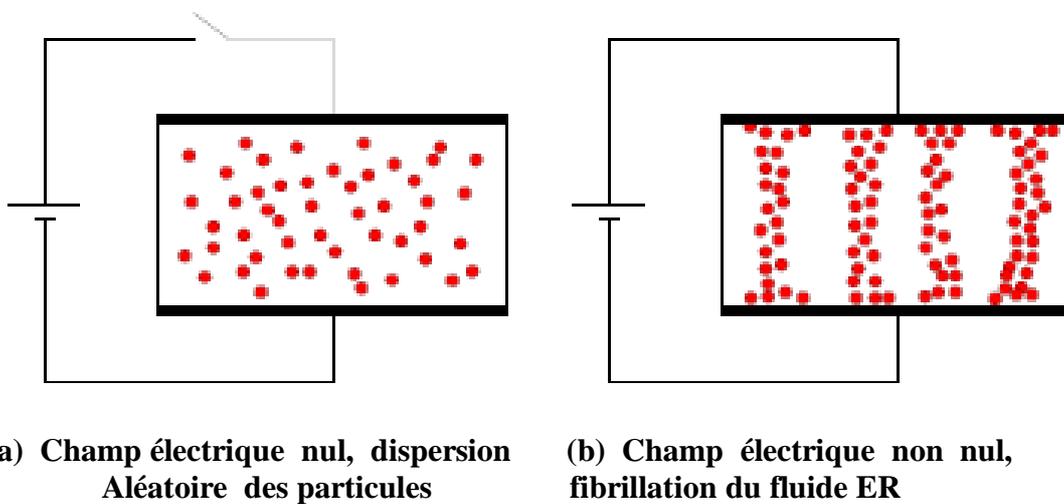


Figure 1.8. Schématisation du fonctionnement d'un fluide ER

En effet, le champ électrique provoque la polarisation des particules, les dipôles ainsi induits s'attirent mutuellement et forment ces chaînes parallèles au champ électrique. Les forces interparticulaires sont suffisamment intenses pour que dans certains cas le fluide passe de l'état liquide à l'état solide. La gamme de tension généralement appliquée se situe entre 0, 5 et 5 M V /m.

Il existe plusieurs familles de fluide ER. Ceux formes d'un seul fluide tel que de l'huile isolante sont appelés fluide ER homogène, par opposition au fluide ER hétérogène qui sont composés d'un liquide (polymère cristal liquide par exemple) disperse dans l'huile. Les fluides ER qui contiennent un peu d'eau adsorbée sont appelés aqueux, à l'opposé des fluides ER anhydres où aucun résidu d'eau n'est détecté [12].

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

De manière générale, les fluides ER sont formés de trois composants :

- la phase dispersée : matière liquide ou solide,
- la phase de dispersion ou continue : fluide support,
- l'additif : activateur polaire.

La phase dispersée est composée de fines particules solides ou liquides appelées matériaux ER. La clef pour réaliser un fluide ER efficace réside dans le choix ou la synthèse du matériau ER. Suivant leur capacité chimique, ils peuvent être classés comme des matériaux organiques, inorganiques ou composites. Selon le mécanisme de polarisation, ils peuvent être classés comme des matériaux polarisables intrinsèquement ou extrinsèquement. La fraction volumique des particules est généralement comprise entre 0,05 et 0,5. Une fraction élevée favorise la fibrillation mais augmente la viscosité en absence de champ électrique. La taille des particules varie de 0,04  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ . Celles qui ont une conductivité inférieure à  $10^{-6}$  S/m et une permittivité relative supérieure à 10 sont privilégiées.

Le fluide support est de l'huile isolante ou tout autre liquide non conducteur avec un faible tau de volatilité et une grande stabilité chimique. Un fluide support idéal a une faible viscosité inférieure à 10 P a.s, une grande tension de claquage (très nettement supérieure à 7 M V /m) et une densité relativement grande de l'ordre de 1200 kg/m<sup>3</sup>. L'activateur polaire le plus fréquemment utilisé est l'eau, puis viennent les acides (organiques ou inorganiques), les agents alcalins, salins et tensioactifs. D'un point de vue quantitatif, il doit représenter entre 5 et 10 % de la masse de la phase dispersée. L'utilisation d'eau pose cependant certains problèmes car à haute température l'eau s'évapore et modifie la composition du fluide, ce qui entraîne une modification des performances.

Viscosité en l'absence de champ	0,1 Pa.s
Résistance élastique (3.5 MV/m)	4 k Pa
Densité de courant (3.5 MV/m)	0,1 A/m <sup>2</sup>
Fraction de volume des particules	0,3
Taille des particules	10 $\mu\text{m}$
Temps de réponse	2 ms

**Tableau I.1. Propriétés d'un fluide ER**

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

Le Tableau I.1 présente des propriétés typiques d'un fluide ER. Les applications des fluides ER sont principalement des systèmes d'amortissements (amortisseurs, bloc support de moteur), d'embrayage et de valve (hydraulique, imprimante à jet d'encre). De nouvelles études sont réalisées pour utiliser les fluides ER comme capteur haptique dans le domaine du médical pour avoir des retours de sensation lors de palpation des tissus par exemple [13].

### **1.5.2 Les matériaux thermoactifs**

Les alliages à mémoire de forme (AMF) désignent la classe des matériaux qui, après une déformation permanente à basse température, peuvent retrouver leur forme initiale par chauffage. Ce phénomène est appelé effet de mémoire de forme. Cette propriété est due à la transformation entre une phase mère à haute température, nommée pour ces matériaux austénite, et une phase produite à basse température, nommée martensite. À l'origine, cette transformation est produite par une variation de température de l'alliage ou par l'application d'une contrainte mécanique (dans une gamme de température appropriée). Un cycle de transformation martensitique comporte plusieurs séquences qui peuvent être décrites de la manière suivante (Figure I.9) [14] :

1. état initial, l'AMF a été allongé, cette déformation est maintenue par le biais d'une masse suspendue à son extrémité par exemple,
2. l'AMF est chauffé, la température augmente et dépasse la valeur  $A_s$  (température de début d'austénite), l'AMF entre dans la transformation austénite et se contracte,
3. la température arrive à la valeur  $A_f$  (température de fin d'austénite), l'AMF est dans sa phase totale d'austénite, l'allongement est nul (retour à sa position neutre),
4. l'AMF refroidit, la température arrive à  $M_s$  (température de début de martensite), il commence sa transformation martensitique qui est favorisée par la contrainte amenée par la masse, l'AMF s'allonge,
5. à la température  $M_s$  (température de fin de martensite), l'AMF retrouve sa position initiale.

Les AMF exploitent dans certaines conditions l'effet super élastique. La Figure I.10 illustre ce comportement pseudo-élastique [15].

Deux cas sont envisagés pour expliquer la super élasticité :

- Premier cas (Figure I.10(a)), l'AMF possède une température inférieure à  $M_s$ . Il est en phase martensite (1) en position de repos sans allongement. Une contrainte est appliquée et a pour effet de réorienter les martensites provoquant un déplacement global (2) (déformation élastique).

La contrainte est supprimée mais la déformation est toujours présente du fait de la présence des martensites orientés (3) (la déformation initiale intervenant dans l'explication de la transformation martensitique a été créée ainsi). Le matériau se trouve donc un allongement initial, ce qui correspond au comportement de tous les matériaux en général.

– Deuxième cas (Figure I.10(b)), L'AMF est maintenant soumis à une température supérieure à  $A_f$ . Durant tout ce fonctionnement, il n'existe alors que les austénites (1). L'application d'une contrainte provoque une déformation élastique de l'austénite.

Lorsque la contrainte critique ( $T_{crit}$ ) est dépassée, il existe en plus une déformation de transformation de phase (austénitique vers martensitique) due à l'apparition de martensite orientée auto accommodante (2), c'est l'effet super élastique. Seul la martensite orientée est présente après la phase de transition. Lorsque la contrainte est enlevée, les martensites orientées disparaissent (3) car la température est supérieure à  $A_f$  et l'austénite réapparaît. L'AMF reprend alors sa forme initiale par le trajet de déformation élastique (4).

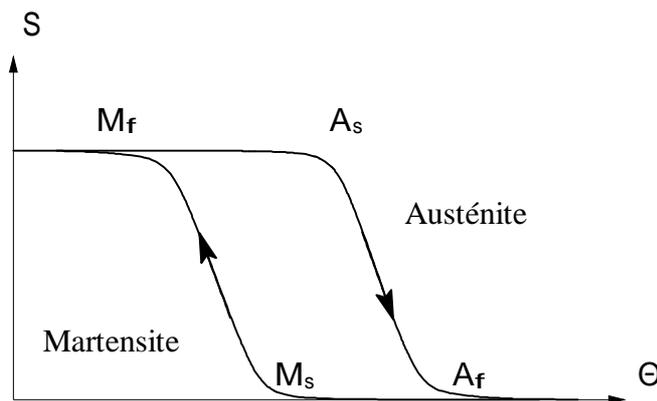


Figure 1.9. Evolution de la déformation  $S$  en fonction de la température  $\Theta$  d'un AMF

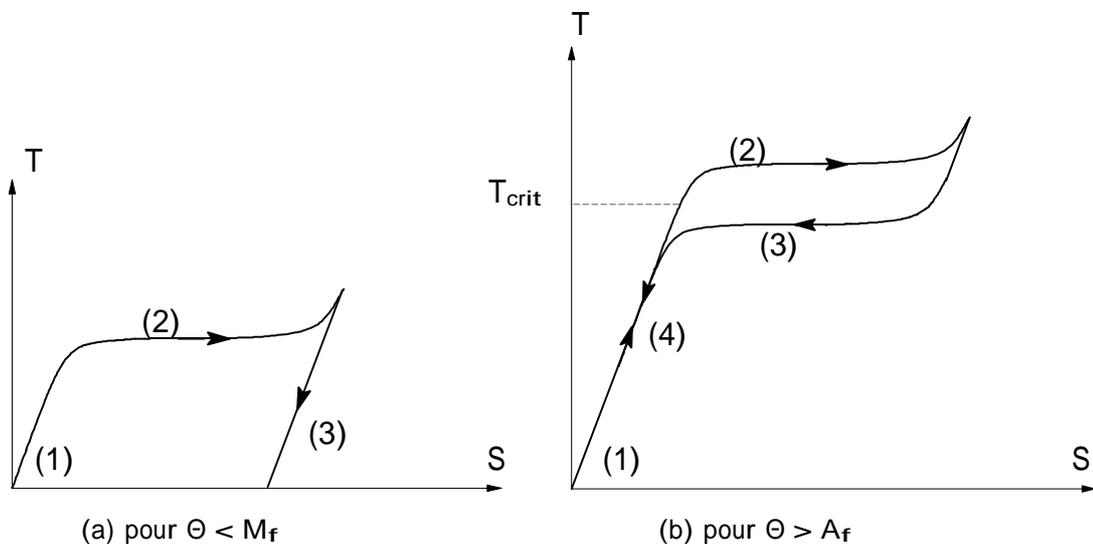


Figure 1.10. Courbe contrainte  $T$  / déformation  $S$

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

Il existe de nombreux alliages présentant l'effet de mémoire de forme. Les plus courants sont les alliages à base de nickel-titane (NiTi) qui sont utilisés avec des compositions de 50% – 50%. Il vient ensuite les alliages à base de cuivre (CuZnAl, CuAlNi, CuAlBe) et les alliages à base de fer (FeMnSi(NiCr)).

Le Tableau I.2 donne quelques éléments de comparaisons entre les alliages nickel- titane et cuivre

		NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>	6500	7500	7500
Résistance électrique	10 <sup>-8</sup> Ω.m	60	8	12
Module d'élasticité en traction de l'austénite	GPa	90	70	70
Module d'élasticité en cisaillement de l'austénite	GPa	35	25	25
Limite de rupture	MPa	800 à 100	300 à 600	400 à 700
Température maximale D'utilisation	°C	300	130	250
Température De Transformation Ms	°C	-200 à 100	-200 à 80	60 à 200
Déformation maximale En traction	%	8	4 à 6	4 à 6
Conductivité thermique	J/K.m.s	10	120	75

**Tableau. I.2. Propriétés des alliages à mémoire de forme classiques**

Les AMF sont disponibles sous différentes formes comme des fils (diamètres variant entre 0,025 et 5 mm), des fils plats ou des rubans (section variant de 0,025 × 0,05 mm à 2 × 10 mm), des tubes et plus récemment des feuilles (épaisseur > 0,02 mm, largeur 75 – 100 mm) [16]. Parmi leurs applications les plus innovantes, citons le contrôle actif de forme, sujet qui a fait l'objet d'une recherche spécifique au sein du groupe EM 3 (1) [17].

### 1.5.3 Les matériaux à effet de couplage magnéto- mécanique

#### 1.5.3.1 Les matériaux magnétostrictifs

La magnétostriction est le changement des dimensions physiques d'un matériau en réponse à une modification de son état magnétique. Ainsi, un matériau magnétostrictif change de forme quand il est soumis à un champ magnétique. La plupart des matériaux ferromagnétiques présentent cette propriété, bien que les déplacements observés soient généralement très faibles.

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

La plus grande magnétostriction mesurée pour un élément pur à température ambiante est celle du cobalt qui atteint 60 ppm. En alliant certains éléments, une magnétostriction "géante" peut être obtenue sous des champs magnétiques relativement faibles. La magnétostriction la plus élevée est celle des alliages de fer avec des éléments de la famille des terres rares tels que le dysprosium (Dy) et le terbium (Tb) formant ainsi les composés  $DyFe_2$  et  $TbFe_2$ .

Cependant ces matériaux possèdent une forte anisotropie magnétique qui nécessite un champ magnétique très élevé pour induire la magnétostriction, d'où l'apparition d'un nouvel alliage à base de Fe, Dy et Tb. Ces alliages sont généralement stoechiométriques, de la forme  $Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$  et sont nommés Terfenol-D.

Ils opèrent sous une polarisation mécanique, se déforment d'environ 2000 ppm dans un champ d'excitation de 160 kA/m à température ambiante et 7000 ppm à une température cryogénique ( $< 180 \text{ °K}$ ).

Le Tableau I.3 présente une comparaison des principales caractéristiques d'un alliage magnétostrictif à déformation géante ( $Tb_{0.3} Dy_{0.7} Fe_2$ ) avec celles que présentent les céramiques PZT, en version massive (PZT-4) et multicouche, commercialisées par Cedrat Technologies [18]. Pour des applications de type actionneur et transducteur, le Terfenol-D est le matériau magnétostrictif le plus couramment considéré. Comme actionneur linéaire, il peut offrir des déplacements de l'ordre de 20 à 200  $\mu\text{m}$  avec des forces de 500 à 5000 N [19].

		<b>Terfenol-D</b>	<b>PZT-4</b>	<b>Multicouche</b>
Déformation max. statique	ppm	1800	600	1250
Déformation max. dynamique	ppm	4000	1600	2000
Coefficient de couplage électromécanique	%	70	67	65
Module d'Young	GPa	25	60	40
Précontrainte max	MPa	50	50	40

**Tableau. I.3. Propriétés de matériau magnétostrictif et 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 [20]. Ce type de géométrie est utilisée quand l'action mécanique impose une grande force. Le moulage d'époxy est une autre possibilité.

Cette technologie est réalisée en mixant des particules de Terfenol-D avec une résine d'époxy approprié puis en coulant le tout dans un moule pour produire la géométrie voulue. Le composite ainsi formé à une magnétostriction d'environ 10 % de celle obtenue avec le matériau massif. 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.

### 1.5.3.2 Les fluides magnéto rhéologiques

Tout comme les fluides ER, les fluides magnéto rhéologiques (MR) ont la possibilité de passer d'un état liquide à un état solide par l'application cette fois d'un champ magnétique. Ils sont composés de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques en suspension dans un liquide aqueux ou organique. Les particules utilisées sont des compositions de céramique, de métal et d'alliage qui possèdent des multi domaines magnétiques. La taille varie du micromètre à quelques dizaines de micromètres. Le matériel le plus utilisé dans la préparation de fluide MR est une poudre de fer obtenue par décomposition de pentacarbonyl de fer ( $Fe(CO)_5$ ).

Dans son état initial, les fluides MR possèdent des viscosités de 0.1 à 10 Pa.s pour de faibles taux de cisaillement [21]. Quand le champ magnétique est appliqué, les particules deviennent magnétisées par petits domaines et se comportent comme de minuscules aimants.

L'énergie magnétique d'interaction entre les particules est minimisée lorsqu'elles s'alignent dans la direction du champ magnétique. Le fluide MR subit alors une augmentation considérable de sa résistance élastique statique. Plus le champ augmente, plus la résistance augmente.

	<b>Fluide ER</b>	<b>Fluide MR</b>
Temps de réponse	millisecondes	millisecondes
Viscosité plastique	0,2 à 0,3 Pa.s	0,2 à 0,3 Pa.s
Alimentation	2 à 5 kV – 1 à 10 mA	2 à 25 V – 1 à 2 A
Résistance élastique max.	2 à 5 kPa (de 3 à 5 MV/m)	50 à 100 kPa (de 150 à 250 kA/m)
Densité	1000 à 2000 kg/m <sup>3</sup>	3000 à 4000 kg/m <sup>3</sup>

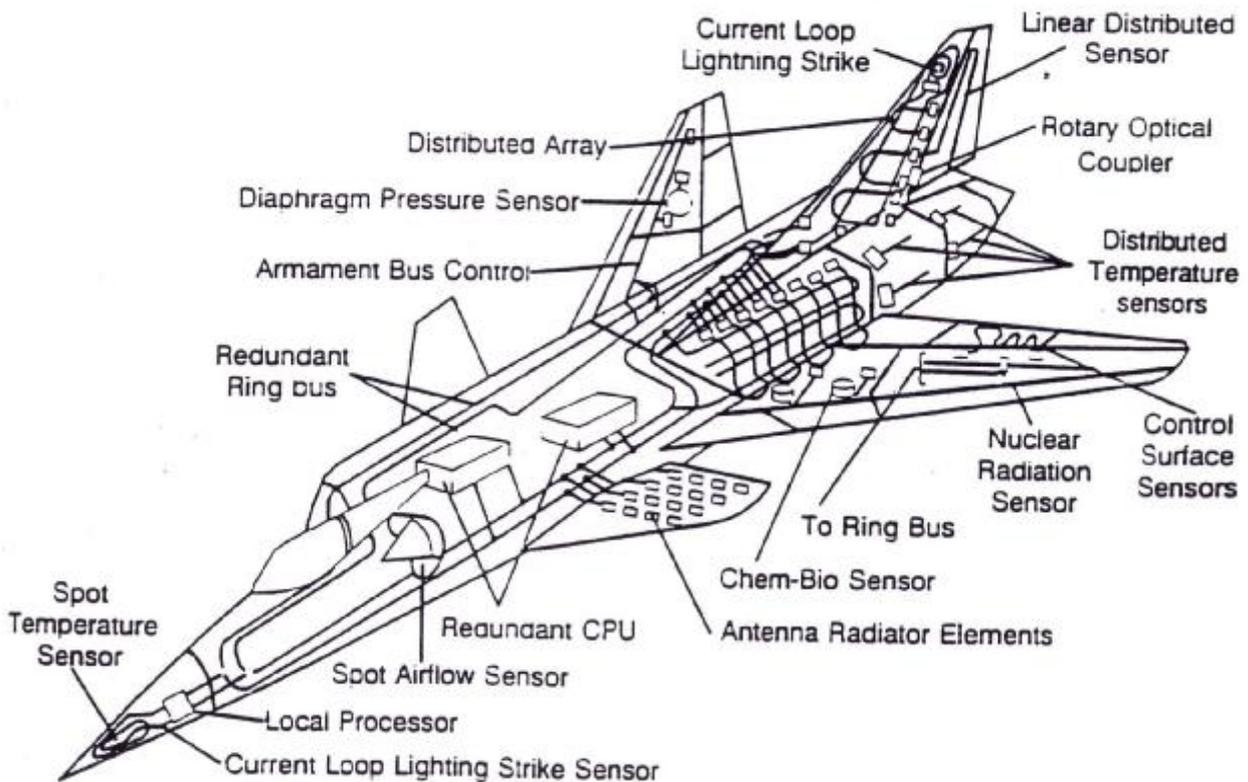
**Tableau. I.4. Comparaison fluide MR / fluide ER**

Le Tableau 1.4 [22] présente quelques caractéristiques de fluide MR mises en opposition à celles d'un fluide ER. On observe une différence de deux décades pour le fluide MR en terme de résistance élastique dynamique (limite apparente d'élasticité). Les fluides MR sont très utilisés dans les systèmes de suspension pour véhicule mais aussi, dans le domaine des dispositifs de prothèse du genou.

### 1.5.4 Les fibres optiques

Les fibres optiques sont apparus au début des années 70 dont les scientifique recherchaient un moyen simple de transporter de la lumière dans un premier temps et par la suite une énergie. Actuellement leur emploi est très important dans le domaine des télécommunications. Puis une nouvelle technologie de capteurs composés de fibres optique a été développé vers la fin des années 70. Ces capteurs recueillent les informations environnantes. Leur principe de fonctionnement est basé sur la transmission de données par l'intermédiaire d'un faisceau lumineux au travers de ces fibres. Ces fibres optiques peuvent jouer deux rôles distincts qu'il est nécessaire de préciser :

- soit elles sont utilisées en tant que simple transmetteur de lumière permettant à distance et à l'aide d'un capteur classique (mesureurs de pression, de proximité, analyseur de vibration, thermocouples,...) d'étudier un phénomène observé. Ces capteurs sont dits "extrinsèques".
- soit elles sont directement utilisé comme "capteur" : c'est à dire que des perturbations de leur environnement engendre des modifications sur les caractéristiques au faisceau lumineux donnant ainsi l'accès à certaines données. Ces capteurs sont "intrinsèques"



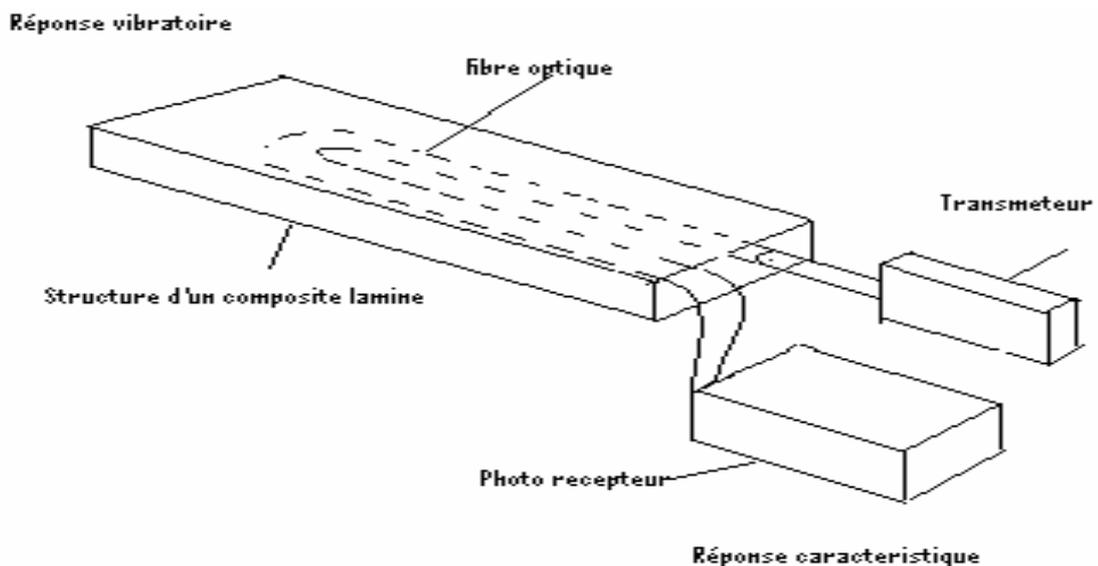
Structures intelligentes d'un avion contenant des capteurs à fibres optiques dans son fuselage

## Principe de fonctionnement

Il s'agit d'envoyer lumière possédante certaine caractéristique à l'intérieur d'une de ces fibres, puis d'étudier cette lumière à sa sortie. Le système de base est composé d'une diode laser, d'une fibre optique et d'une photo récepteur.

Un courant électrique est envoyé à cette diode qui émet un certain faisceau laser. Cette même diode laser est couplée à une fibre optique dans laquelle se propage ce faisceau. A la sortie de la fibre ou en différents points de celle-ci, est placé une photo réceptrice, qui analyse la lumière laser reçu par des techniques d'interférométrie ou réflectométrie optique dans le domaine de temps ou des fréquence.

En ce qui concerne les méthodes de réflectométrie, les impulsions étroites sont lancées à l'intérieur d'une fibre, et le signal atténué qui réfléchi tout au long de la fibre, est surveillé donc, si la fibre n'est soumise à aucune perturbation, les caractéristiques de la lumière émise seront les mêmes que celle reçues. En fait, la fibre optique joue le rôle de guide de lumière constitué d'un cœur d'un certain indice de réfraction dans lequel se propage l'onde lumineuse en se réfléchissant sur la gaine optique d'indice de réfraction plus faible.



**Figure 1.11. Structure composite contenant le système des capteurs à F O**

Une onde optique associée à un faisceau lumineux peut être caractérisée principalement par trois paramètres (son amplitude, sa phase, sa polarisation).

Lorsqu'on applique une contrainte, une déformation ou une certaine température à la fibre optique, on modifie sa forme. Par conséquent, cela revient à modifier les trois paramètres du faisceau lumineux. Puis par comparaison avec l'onde optique incidente, il est possible de remonter aux phénomènes physiques appliqués à la structure. Les contraintes locales sont révélées par des baisses de puissance discrètes [23].

### **1.6 Application des matériaux intelligents**

Les matériaux intelligents connaissent actuellement un développement intense dans pratiquement toutes les branches de l'industrie :

#### **1.6.1 Industrie de l'habitat et de loisirs**

Les maisons de futur ainsi que les bureaux seront peuplés des matériaux intelligents. La maison était d'abord un abri passif pour se protéger du froid ou des intempéries. Elle est devenue active avec l'arrivée des fluides, de l'énergie, de l'eau, du gaz et de l'électricité. Elle s'est dotée de muscles avec les robots ménagers. Elle devient réellement interactive avec le téléphone, la radio, les satellites et l'internet.

Mais les murs eux-mêmes et les cloisons faites de matériaux intelligents vont être capables de fonctions et de propriétés qui vont révolutionner le bâtiment dans les années à venir. Reliés à des capteurs, à des systèmes électroniques et à des robots domestiques, ces matériaux vont bouleverser notre façon de vivre dans la maison de demain.

Les matériaux passifs capable de lutter contre le bruit ou contre la perte de chaleur (comme le liège ou la laine de verre) différemment aux matériaux intelligents pourront s'adapter à leur environnement comme une "peau" sensible. Par exemple, absorber l'humidité ou au contraire vaporiser de l'eau, comme un humidificateur. Ou encore créer une ventilation dans un environnement chaud, détruire des odeurs gênantes, tuer des bactéries ou éliminer des acariens dans des tentures ou des moquettes susceptibles de provoquer des allergies humaines, assombrir d'un vitrage quand la lumière devienne trop forte et même dans certain cas être capable d'éliminer des vibrations, voire du bruit, par production d'un antibruit ou d'anti vibrations neutralisant la gêne incidente. Il existe déjà des tables ou de cloison expérimentales, sensible à la proximité de la main et capable d'afficher par transparence l'équivalent d'un écran d'ordinateur ou de projection multimédia.

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

Des capteurs biométrique sont susceptible de détecter la présence humaine et même de reconnaître précisément quelles personnes entrent dans une pièce en fonction de certains paramètres biologique spécifiques. Les bâtiments ressemblent à des organismes vivants dotés d'un squelette, des muscles, d'un système nerveux, ou d'un cerveau. Les personnes habitants dans ces espaces vivent ainsi et en symbiose avec environnement.

### **1.6.2 Domaines de l'agroalimentaire de la pharmacie ou des cosmétiques**

La nouvelle génération des emballages s'adapte a son environnement grâce aux capteurs biochimiques ou au absorbeurs d'oxygène. L'objectif des fabricants c'est la qualité des aliments emballés, des produits pharmaceutiques conservés, ainsi que la protection de l'environnement. Dans ces domaines, les emballages ne son plus passifs mais actifs. Capable de réagir au taux de l'humidité en la maintenant de manière équilibrée, au taux d'éclairement en changeant de couleur pour filtrer la lumière ou même comme barrière contre les microbes en stérilisant les produits emballés. Les chercheurs ont mis au point des absorbeurs d'oxygène capable de consommer chimiquement tout l'oxygène contenu dans un sac étanche sans qu'il soit nécessaire de la mettre sous vide.

Contrairement aux antioxydants qui sont ajoutés aux aliments, l'absorbeur d'oxygène est placé dans l'emballage à code du produit consommable. Les gâteaux, les confiseries, les fromages conservent ainsi leur qualité et leur fraîcheur sans conditionnements complique.

### **1.6.3 Domaine de génie-civil**

On distinct se qu'on appel "le ciment intelligent", qui est doté d'une sorte de "système nerveux" et lui permet de détecter des changements internes et de transmettre des informations à l'extérieur, avec ce type de ciment on peut construire des ponts ou des barrages capables d'avertir les ingénieurs des zones de fragilisation aux endroits même des fissures ou des fractures peuvent apparaître. Soumis à des stress divers, poids, vibration, gel, tremblement de terre, les constructions en ciment peuvent céder brutalement sans qu'aucun signe n'ait pu être détecté au cours des visites préventives. Ces pourquoi les chercheurs ont eu l'idée de créer dans le ciment un véritable système nerveux à base de fibres de carbone.

Ces fibres de 10 micron de diamètre et de quelques centimètres de long sont mélangées avec le ciment lors de sa préparation. Même si elles ne représentent que 0.05% de son volume, elles accroissent sa conductibilité électrique de 10%. Ces fibres dépassent à l'extérieur se qui assure un bon contact électrique.

On peut donc placer des électrodes en n'importe quel point de la surface d'une construction en "ciment intelligent" et détecter un changement de stress. Il suffit pour cela de mesurer la résistance électrique du ciment. Désormais une alarme pourra sonner bien avant qu'un mur ne se fissure ou qu'un pont ébranlé par un tremblement de terre ne menace de s'effondrer.

### **1.6.4 Domaine de la biotechnologie et de la médecine**

Une des brèches parmi les spectaculaires des matériaux intelligents a été réalisée dans le secteur de bio polymères. La soie, le collagène, la cellulose, l'élastine, sont des biomatériaux de synthèse pouvaient être utilisés pour traiter ou remplacer certains tissus, organes ou fonctions du corps. Par exemple certaines capsules en polymères intelligents implantées dans l'organisme laissent passer des molécules capables de traiter en permanence des affections du corps. D'autres biomatériaux peuvent servir de prothèses, de valves cardiaques ou de membranes sélectives. Plusieurs laboratoires utilisent du collagène, de la cellulose ou même de corail comme matrice à partir de laquelle les cellules naturelles, en se divisant, reconstituent une partie abîmée ou manquante d'un organe.

Par exemple des nez ont pu être reconstruits par croissance de cellules de la peau sur des matrices de ce type, constituant un échafaudage biodégradable des "matériaux de soutien intelligents" vont jouer un rôle de plus en plus important dans le domaine du génie tissulaire des biomatériaux modifiés ou des polymères de synthèse exercent une influence directe sur les cellules qui les recouvrent en raison de leurs propriétés de surface. Des signaux moléculaires biologiques sont en effet intégrés à ces matériaux afin de leur conférer des caractéristiques de surface qui imitent des sites de reconnaissance naturels. Les cellules reconnaissent de tels signaux et se comportent comme dans l'organisme vivant. On peut ainsi diriger les cellules pour qu'elles rassemblent ou s'organisent de manière programmée.

Actuellement, des équipes de chercheurs sont parvenues à faire croître des nerfs sectionnés en, réalisant un pontage entre les deux extrémités nerveuses avec de tels matériaux intelligents.

### **1.6.5 D'autres industries**

De nombreux laboratoires dans le monde travaillent sur "textiles intelligents", une autre catégorie d'application de matériaux intelligents dans notre vie quotidienne, ces laboratoires vont de la tenue de camouflage des militaires, à des vêtements de sport permettant aux entraîneurs de suivre les efforts des sportifs, jusqu'aux robes de la haute couture dotées de propriétés nouvelles et originales.

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

En effet, les vêtements que nous porterons dans l'avenir vont ressembler de plus en plus à une seconde peau. Après les fibres qui respirent, des fibres textiles intelligentes s'adaptent à l'environnement biologique du corps. Le secret de ces fibres repose sur des microcapsules réparties dans l'ensemble du matériau symétrique et qui contiennent des produits chimiques particuliers. Ces produits sont capables de réagir à la température, à la lumière ou au frottement, ils modifient alors la couleur du textile ou émettent des parfums.

On a vu apparaître au Japon, notamment, des pull-overs ou des serviettes de toilettes à parfum contrôlé et même des vêtements qui repoussent les insectes nuisibles. Des fabrications de vêtements ont mis sur le marché des tenues de sports capables de changer globalement de couleur en fonction de la température.

Mais d'autres textiles intelligents vont avoir des usages encore plus surprenants. Il s'agit des polymères capables de changer localement de couleur en fonction d'un certain nombre de paramètres physiques, tels que le passage d'un faible courant électrique, une augmentation de température ou des contraintes mécaniques. La coloration de tissu ou les inscriptions qu'il porte (par exemple sur un tee-shirt) ne sont pas imprimées avec des encres spéciales mais produites par des fibres de polymères capables de créer des images sur le corps.

Où en différents endroits spécifiques, on imagine les applications de ces polymères dans le secteur militaire, notamment pour le camouflage. Des tenues de combat fabriquées à partir de ces polymères, portent des minuscules caméras vidéo capables de détecter des changements dans l'environnement et d'adapter aussitôt la couleur de la tenue de combat aux conditions dans lesquelles elle se trouve.

D'autres industries mettent au point des tee-shirts qui modifient la couleur. L'inscription ou les dessins qu'ils affichent, en fonction de l'état émotionnel la personne qui les porte ! Ces paramètres biologiques sont analysés par des minuscules biocapteurs tissés au sein même du vêtement. Une robe pourra ainsi changer de couleur plusieurs fois dans la soirée ou porter des ornements se modifiant en fonction de l'ambiance dans laquelle on se trouve. Des survêtements ou des tenues de sports bourrés de capteurs peuvent transmettre à distance des paramètres du corps à l'intention de médecins qui souhaitent suivre leurs patients heure par heure ou à destination d'entraîneurs surveillant les performances de sportifs au cours de leurs efforts

## **1.7 Conclusion**

Au cours de ce chapitre, un bref état de l'art des matériaux actifs disponibles à ce jour, et une analyse non exhaustive de leurs applications, présentes ou à venir, Les différents matériaux ont pu être classés selon le type d'énergie utilisée pour contrôler leur transformation, introduisant ainsi trois principales classes de matériaux.

Une première famille de composés englobe tous les matériaux utilisant un champ électrique pour créer une déformation. Dans cette catégorie, il existe aussi plusieurs sous ensembles ou l'ont distinguera les matériaux piézoélectriques (céramiques PZT), les polymères et co-polymères piézoélectriques (PVDF, PVDF-TrFE) et les matériaux électrostrictifs (PMN-PT). Ces matériaux exploitent respectivement les phénomènes de piézoélectricité, de ferroélectricité et d'électrostriction. Dans un second groupe sont rassemblés les matériaux ioniques (polymères ioniques IPMC) qui utilisent les phénomènes de diffusion d'ions, puis dans un troisième groupe, les fluides électro rhéologiques, qui concernent tous les fluides dont les propriétés rhéologiques sont modifiées sous l'application d'un champ électrique.

Les matériaux thermoactifs principalement décrits sont les alliages à mémoire de forme (AMF de type Ni Ti), qui ont la capacité de se contracter, lorsque la température atteint la limite d'austénite finale, jusqu'à leur position neutre, puis de revenir à un état déformé (sous l'action d'une contrainte) lors du refroidissement, dès que la température franchit la limite caractérisant la martensite finale. Notons que la plupart des matériaux se déforment sous l'influence de la température mais ces déformations d'origine thermo élastique (dilatation thermique,...) sont nettement négligeables devant les effets de la transformation de phase opérant dans les alliages à mémoire de forme.

Les matériaux magnétostrictifs, dont les plus performants sont les alliages de type Terfenol-D, génèrent des déformations sous l'application d'un champ magnétique, tandis que les fluides magnéto-rhéologiques voient leurs propriétés rhéologiques modifiées sous l'action d'un même champ. Soulignons que, en dépit de leur intérêt potentiel, les matériaux excités par le champ magnétique souffrent de difficultés inhérentes aux contraintes imposées par la mise en jeu d'un champ à flux conservatif (nécessité de culasses de fermeture,...), contrairement au cas du champ électrique.

## Chapitre I : Matériau intelligent définition et application

Toutes ces applications laissent entrevoir les possibilités de nouveaux que peuvent amener l'utilisation des matériaux actifs. Le domaine de l'assistance circulatoire n'est pas encore vraiment atteint par ces nouvelles filières technologiques. Les dispositifs comme les coeurs artificiels ou les systèmes de circulation extracorporelle utilisent encore des techniques "classiques" (actionneur magnétique ou pneumatique par exemple). Des fonctions à réaliser telles que des pompes, micro pompes ou valves actives utilisant des matériaux actifs laissent pourtant entrevoir les enjeux d'une telle rupture technologique.

## **Chapitre II**

# **LES MATERIAUX INTELLIGENTS PIEZOELCTRIQUES**

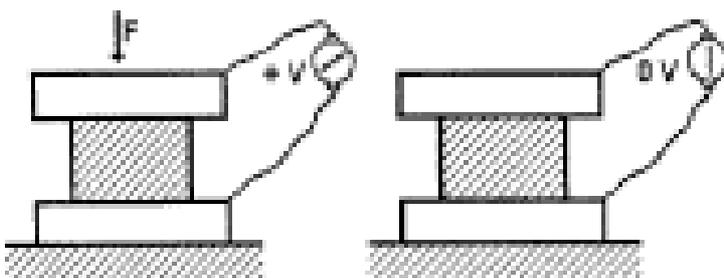
## II.1 Introduction

La piézoélectricité, la pyroélectricité et la ferroélectricité sont connues depuis de nombreuses années. Le phénomène électrique qui résulte de l'action d'une contrainte mécanique sur certains cristaux fut observé qualitativement pour la première fois en 1817 par l'Abbé René Just HAUY. L'étude théorique et expérimentale de ce phénomène fut entreprise par les frères Pierre et Jacques CURIE [24] en 1880, à qui l'on attribue la découverte de l'effet piézoélectrique direct. L'effet piézoélectrique inverse fut énoncé théoriquement par LIPMAN en 1881 et vérifié expérimentalement la même année par les frères CURIE. Cet effet inverse se manifeste par une déformation mécanique provoquée par l'application d'un champ électrique.

Les premières applications industrielles apparaissent pendant la première guerre mondiale avec le générateur d'ondes ultrasonores pour la mesure et la détection sous-marine mis au point par Paul LANGEVIN. A partir de 1943 les progrès technologiques permettent l'élaboration des premiers matériaux piézoélectriques sous forme de céramiques de titanate de baryum. Quelques années plus tard, des céramiques formées de solutions solides de zircono-titanate de plomb (PZT) de formule de base  $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$  furent mises au point. Aujourd'hui les céramiques de types PZT sont utilisées dans de nombreuses applications telles que les générateurs d'impulsions, les capteurs et les actionneurs.

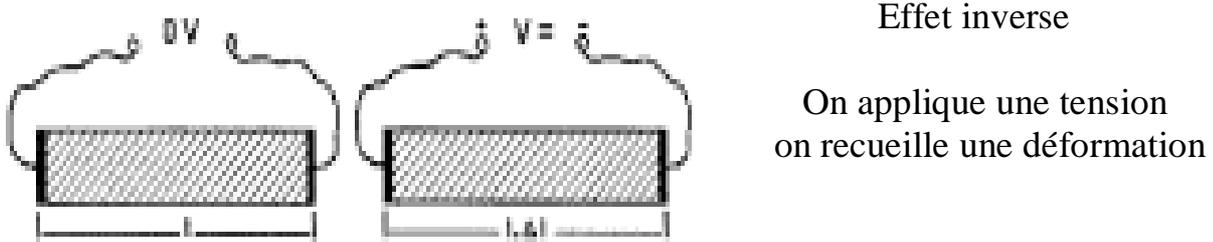
## II.2 Définition de la piézoélectricité

Etymologiquement, le préfixe '*piézo*' provient du grec et signifie presser ou serrer. Certains matériaux ont la propriété de se polariser sous l'influence d'une contrainte mécanique : c'est l'effet piézoélectrique direct. Cette polarisation est proportionnelle à la contrainte 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. Ces effets piézoélectriques ne peuvent être observés que sur des corps isolants et sont schématisés sur la Figure II.1.



Effet direct

On applique une force  
on recueille une tension



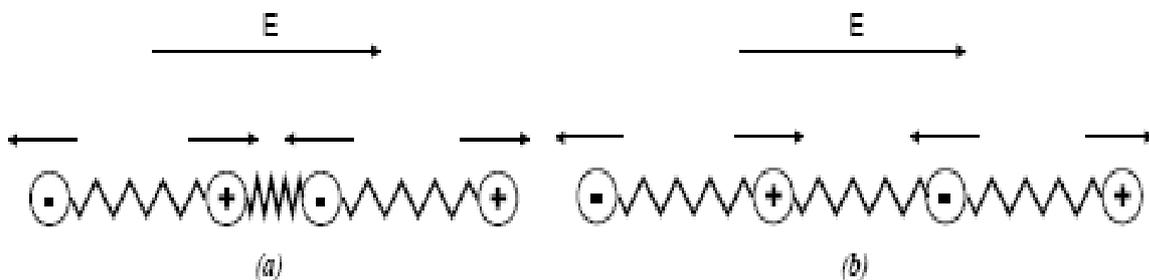
**Figure II.1 : Représentation de l'effet direct et inverse de la piézoélectricité**

L'origine microscopique de la piézoélectricité est illustrée aux figures II.2 (a) et (b) sur un modèle ionique du réseau cristallin supposé, pour la simplicité de l'exposé, unidimensionnel. Sur ces figures, les liaisons inter-ioniques représentent la résultante des forces électrostatiques de Coulomb et des forces de répulsions quantiques. On remarquera que la structure cristalline (a) présente des liaisons qui sont fonctions de la distance inter-ionique.

Si l'on applique un champ électrique  $E$  au cas (a), les cations se dirigeront dans la direction du champ électrique et les anions dans la direction opposée. Vu la différence de raideur des liaisons inter-ioniques, les liaisons souples se contracteront (ou se dilateront) plus vite que les liaisons dures, causant ainsi une déformation  $\epsilon$  proportionnelle au champ électrique. Ce phénomène est appelé l'effet piézoélectrique inverse et est exprimé par :

$$\epsilon = d E \quad (\text{II.1})$$

Où  $d$  est appelé la constante piézoélectrique



**Figure II.2 : Modèle simplifié d'une structure cristalline unidimensionnelle**

Dans le cas (b), les taux d'extension et de contraction étant identiques, la distance entre les deux cations demeure stable, sans aucune déformation globale.

### II.3 Matériaux piézoélectriques

Dans les solides cristallins, la piézoélectricité est directement liée à la symétrie des cristaux et se manifeste par une polarisation de la maille. Ce moment dipolaire est créé par la séparation du barycentre des charges positives de celui des charges négatives au niveau de chaque maille du réseau cristallin sous l'action d'une contrainte externe.

Le diagramme ci-dessous précise la place qu'occupent les matériaux piézoélectriques dans la hiérarchie des solides cristallins.

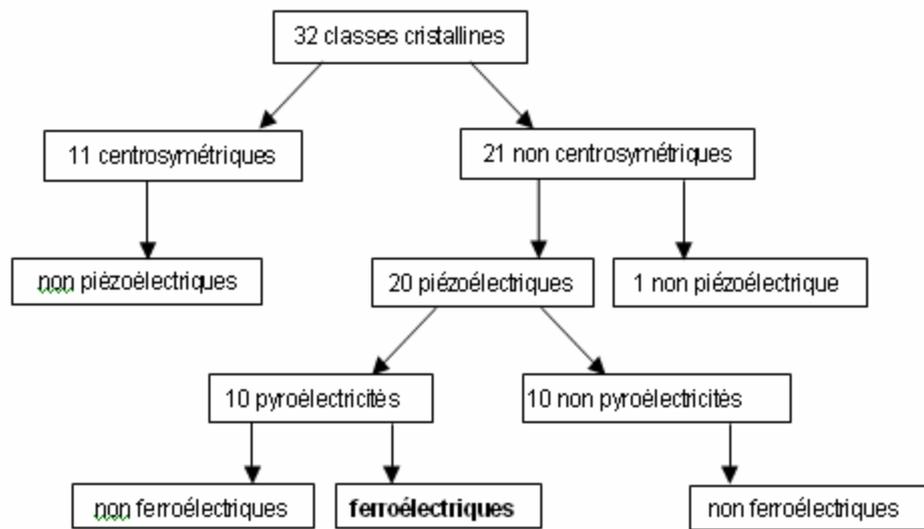


Figure II.3 Organigramme des classes cristallines

Pour être piézoélectrique, la structure cristalline doit être nécessairement non centrosymétrique (absence de centre de symétrie). Sur les 32 classes cristallines, 21 présentent cette caractéristique et 20 classes cristallines sont piézoélectriques. Parmi ces 20 classes 10 présentent une polarisation spontanée en l'absence d'un champ extérieur ;

Elles sont dites pyroélectriques et polaires en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température. Enfin les cristaux ferroélectriques (Figure II.3) correspondent à un sous-groupe des pyroélectriques pour lesquels l'axe polaire, support d'un dipôle permanent est mobile dans le réseau cristallin sous l'influence d'un champ électrique extérieur.

La structure atomique d'un cristal est déterminée, complètement, si l'on connaît son réseau et son motif.

Le réseau est reconstitué par l'empilement de parallélépipèdes identiques : la maille. Aux sommets de la maille se situent les nœuds du réseau, c'est à dire le groupement d'atome caractéristique d'un cristal donné : son motif. On dénombre sept formes de mailles parallélépipédiques, parmi cette dernière la forme hexagonale, identifiée par les paramètres :

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ \text{ et } a = b \neq c$$

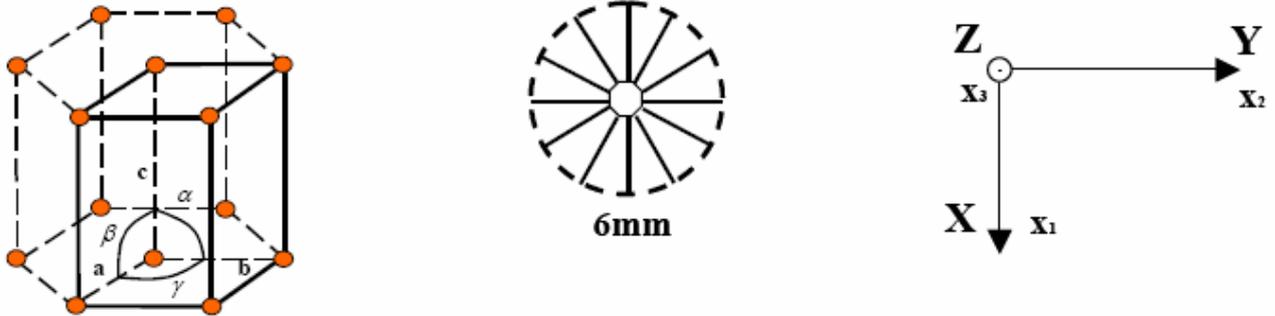


Figure II.4 Paramètres d'une maille de forme hexagonale

## II.4 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 polycristallines 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 [25].

Sous sollicitation électrique ou mécanique, les murs de domaines se déplacent et leur mouvement est responsable de certaines pertes dans la céramique [26]. 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 la polarisation des domaines.

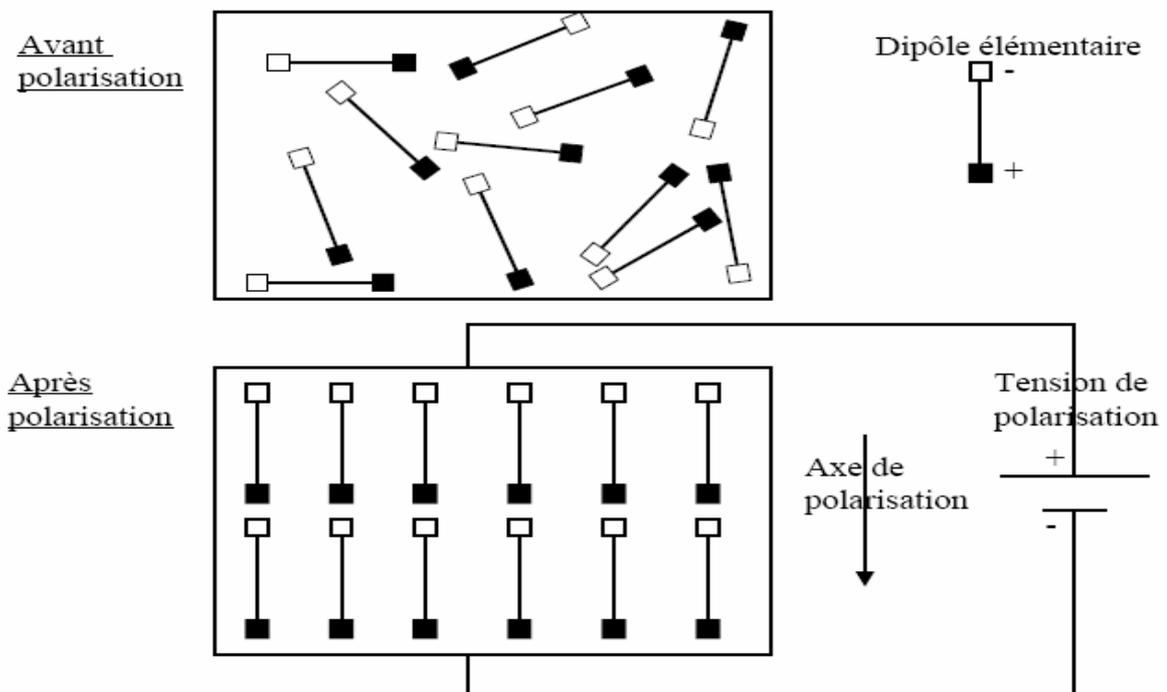
## Chapitre II : les matériaux intelligents piézoélectriques

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 perovskite, les domaines à  $180^\circ$  basculent complètement car le réseau ne subit pas de déformation structurale.

En revanche, les domaines à  $71^\circ$ ,  $109^\circ$  et  $90^\circ$  induisent des déformations importantes du 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 ( $\infty, mm$ ).

La Figure II.5 représente le phénomène de réorientation des domaines lors de la polarisation d'une céramique ferroélectrique.



**Figure II.5 : Etape de polarisation des dipôles électriques par l'application d'un champ électrique dans le cas des céramiques ferroélectrique poly cristallines comme le PZT**

### II.5 Cycle d'hystérésis

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 (Figure II.6). 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  $\pm P_s$ .

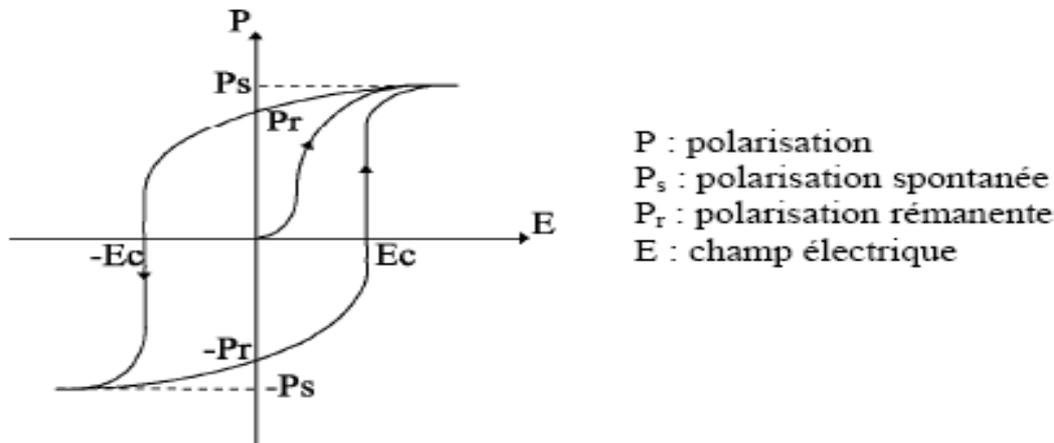


Figure II.6 : Cycle d'hystérésis  $P = f(E)$  d'un matériau ferroélectrique

## II.6 Vieillissement

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 :

$$X(t) = X(t_0) + A \ln(t/t_0) \quad (\text{II.2})$$

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,

## Chapitre II : les matériaux intelligents piézoélectriques

- 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 (d'après UCHINO [27])**

	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 $\sim$ $\mu$ sec	msec	$\mu$ sec
Actuation	chaleur	Champ magnétique	Champ électrique	Champ électrique

### II.7 Principaux matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques peuvent se regrouper en trois classes principales, les cristaux, les polymères et les céramiques :

Les cristaux, dont le plus connu est le quartz, ont des propriétés peu attrayantes pour des applications telles que les générateurs d'ultrasons. Leurs principaux défauts sont un  $\epsilon_r^a$  et des constantes piézoélectriques peu élevées, un coefficient de couplage électromécanique trop faible.

Les polymères ou les co-polymères comme respectivement le Poly-Vinyl-DiFluoridène ou PVDF et le P(VDF-TrFE) partiellement cristallisés peuvent permettre d'obtenir des matériaux plus compliants, mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à l'acoustique sous-marine en réception. Le PVDF en est le représentant le plus connu, les chaînes de polymère peuvent s'orienter lorsqu'on applique un champ électrique.

Les céramiques piézoélectriques se sont vite imposées par leurs forts coefficients piézoélectriques. La famille des céramiques comporte de nombreux éléments, citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, les titanates de

## Chapitre II : les matériaux intelligents piézoélectriques

plomb ou les méta-niobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution. La famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) compte à elle seule cinq à six compositions différentes sans compter les structures dopées type PLZT.

C'est cette famille des PZT qui offre le plus de possibilités au niveau industrialisation. Par ailleurs le  $\text{LiNbO}_3$  est couramment utilisé en imagerie haute fréquence.

Notons que les céramiques sont des matériaux fabriqués par frittage d'un mélange d'oxydes et que les procédés de fabrication sont ajustables afin de pouvoir adapter leurs propriétés diélectriques, mécaniques et piézoélectriques à la demande.

### **II.8 Choix du PZT**

Le choix du matériau repose avant tout sur ses performances physiques (électriques et mécaniques), mais aussi sur le procédé de dépôt utilisé. Nous allons dans ce qui suit définir les propriétés physiques importantes de ces matériaux et établir des comparaisons entre eux afin de déterminer quel est le meilleur candidat en fonction des applications visées.

- Le carré du coefficient de couplage électromécanique  $k_t^2$  : il détermine le degré d'échange d'énergie entre le domaine mécanique et le domaine électrique. Une couche Piézoélectrique avec un coefficient de couplage trop faible ne permettra pas de faire des filtres avec la bande passante requise pour les applications de téléphonie mobile. Le PZT présente le plus grand coefficient (de 40 à 70 %), suivi par le  $\text{BaTiO}_3$ , 45%, et l' PVDF 14 %.

- La constante diélectrique  $\epsilon_r$  : le niveau de l'impédance du résonateur est déterminé par la taille des électrodes, par l'épaisseur de la couche piézoélectrique et par la constante diélectrique. Plus cette dernière sera grande, et plus la taille des résonateurs sera réduite. Cette constante diélectrique est d'environ 12 pour le PVDF et de 400 pour le PZT.

- Une forte constante de charge  $d_{33}$  permet une bonne tenue en puissance du matériau piézoélectrique, tel que le PZT de 40 à 750 suivi par le PVDF, 20.

- Une forte conductivité thermique  $\sigma_t$  permet une bonne tenue en puissance du matériau piézoélectrique, condition nécessaire à l'intégration des filtres FBARs dans les duplexeurs. Le PZT s'avère être un bon conducteur thermique.

- La densité est aussi un paramètre déterminant. Elle est liée à la masse volumique du matériau ainsi que l'environnement fonctionnel.

Le choix final du matériau piézoélectrique dépend avant tout de l'environnement technologique dans lequel il va être intégré. Les matériaux piézoélectriques industriels seront

## Chapitre II : les matériaux intelligents piézoélectriques

fabriqués dans des centrales technologiques destinées aux matériaux semi-conducteurs. Il faut de ce fait écarter tout risque de contamination provenant de la couche piézoélectrique.

Le Zinc, le Zirconium et Plomb sont des matériaux à fort risque de contamination du fait de leur influence néfaste sur la diminution de la durée de vie des porteurs, et sont donc proscrits des salles d'intégration CMOS.

Le tableau II.1 donne quelques valeurs des caractéristiques pour certains matériaux piézoélectriques. Le PZT est apprécié pour ces excellentes propriétés piézoélectriques par rapport aux autres composés. Il constitue la majorité des matériaux utilisés pour l'élaboration des céramiques massives mais aussi des couches épaisses piézoélectriques.

**Tableau II.2: Caractéristiques piézoélectriques de quelques matériaux**

	Monocristaux			Céramique	Polymère
	Quartz SiO <sub>2</sub>	LiNbO <sub>3</sub>	BaTiO <sub>3</sub>	PZT	PVDF
Température de Curie T <sub>c</sub> (°C)	573	1210	655	< 350	180
Constante diélectrique $\epsilon_r$	4,5	29	45	200 - 4000	12
Constante de charge d <sub>33</sub> 10 <sup>-12</sup> (C/N)	2	6	8	40 - 750	20
Coefficient de couplage k <sub>33</sub> (%)	10	23	45	40 - 70	14
Constante de tension g <sub>33</sub> 10 <sup>-3</sup> (Vm/N)	50	20	17	15-40	190
Densité g/cm <sup>3</sup>	2,65	4,64	5,7	7,5	1,76

### II.9 Les matériaux piézoélectriques : les zircono-titanates de plomb

Les premiers matériaux piézoélectriques à base de zircono-titanate de plomb (PZT) ont été élaborés dès 1954. Les excellentes propriétés piézoélectriques de ces céramiques ont été mises en évidence par Jaffe, Roth et Mazullo [28]. Aujourd'hui les PZT entrent dans la fabrication de nombreux transducteurs ferroélectriques. En effet, parce que plus performants, ils ont remplacé, dans de nombreux cas, les céramiques de titanate de baryum

#### II.9.1 Cristallographie du PZT: la maille perovskite

La formule chimique du PZT est Pb(Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub>. Le nombre x est équivalent à [Zr]/[Zr]+[Ti]. Il fait partie des oxydes du type pérovskite, du nom de la pérovskite naturelle CaTiO<sub>3</sub>. Cette structure de la forme ABO<sub>3</sub>. A est un cation de grand rayon (Pb pour les PZT), bivalent et coordinence 12. B est cation de rayon plus faible (Zr et Ti pour le PZT), tétravalent et de

## Chapitre II : les matériaux intelligents piézoélectriques

coordination 6. Dans un arrangement cubique, A occupe les sommets, B le centre et l'oxygène le centre des 6 faces. L'ion B se trouve au centre d'un octaèdre d'oxygène. La Figure II.7 est une représentation de la maille pérovskite cubique avec le plomb à l'origine.

La maille pérovskite du PZT peut être sous trois formes différentes suivant la température et le rapport de Zr/Ti:

- Cubique (groupe ponctuel  $m\bar{3}m$ ) lorsque la température est supérieure à la température de Curie ( $T_c$ ), ce qui correspond à la phase para électrique qui ne présente pas de moment dipolaire.
- quadratique (groupe ponctuel  $4mm$ ) lorsque la température est en dessous de  $T_c$  et  $x < 0,45$  (domaine de titane). Cette phase présente un moment dipolaire permanent de par la déformation de maille cubique.
- rhomboédrique (groupe ponctuel  $3m$ ) lorsque la température est en dessous de  $T_c$  et  $x > 0,5$  (domaine de zirconium). Cette phase présente également un moment dipolaire permanent.

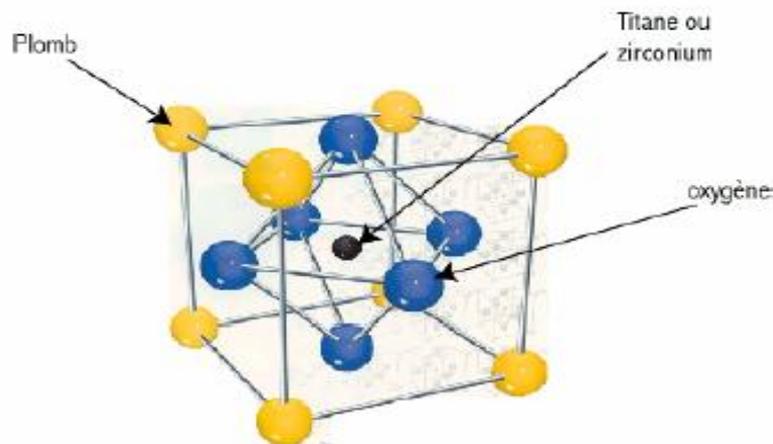


Figure II.7: Maille pérovskite cubique du PZT

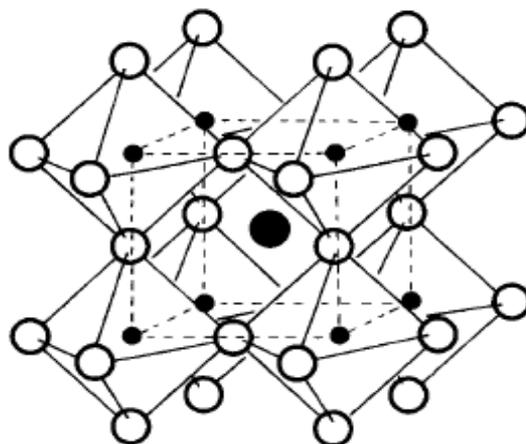


Figure II.8: Représentation du réseau tridimensionnel d'octaèdre

## Chapitre II : les matériaux intelligents piézoélectriques

On notera que lorsque  $x$  est compris entre 0,45 et 0,5 environ, la phase obtenue est un mélange de quadratique et rhomboédrique. Cette phase est dénommée morphotropique. Elle est importante car c'est dans cette zone que le PZT présente ces meilleures propriétés ferroélectriques et piézoélectriques [29]. La figure II.9 est une schématisation du diagramme de phase du PZT.

La zone notée AF sur la Figure II.9 est une phase anti-ferroélectrique caractéristique du zirconate de plomb ( $\text{PbZrO}_3$ ) et qui ne présente pas d'intérêt ici car non piézoélectrique.

Les deux phases ferroélectrique sont obtenues par déformation de la maille cubique paraélectrique, et présente alors un moment dipolaire permanent. Pour la phase quadratique, un coté du cube est allongé pour donner l'axe  $c$  alors que les deux autres cotés sont compressés pour donner les axes  $a$  quadratiques. Pour la phase rhomboédrique, le cube est étiré suivant une diagonale qui traverse entièrement la maille. Une représentation schématique de l'obtention de ces phases est donnée sur la Figure II.10.

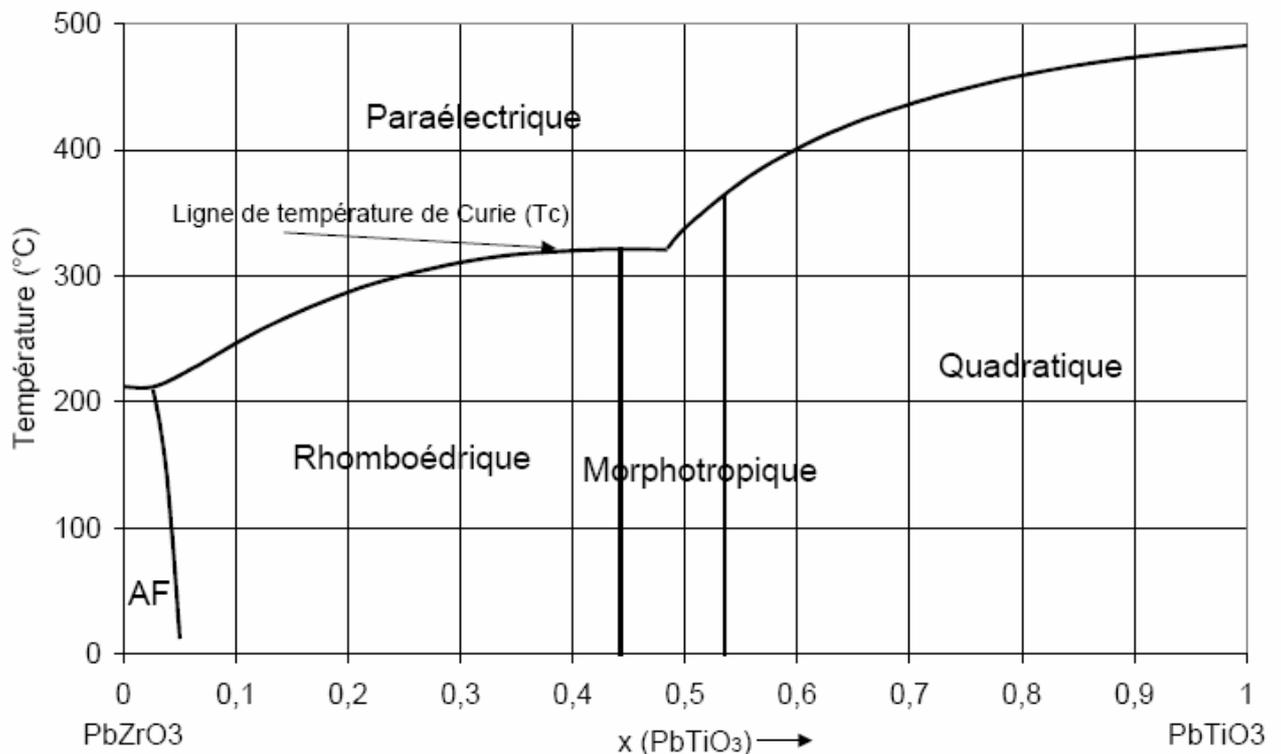
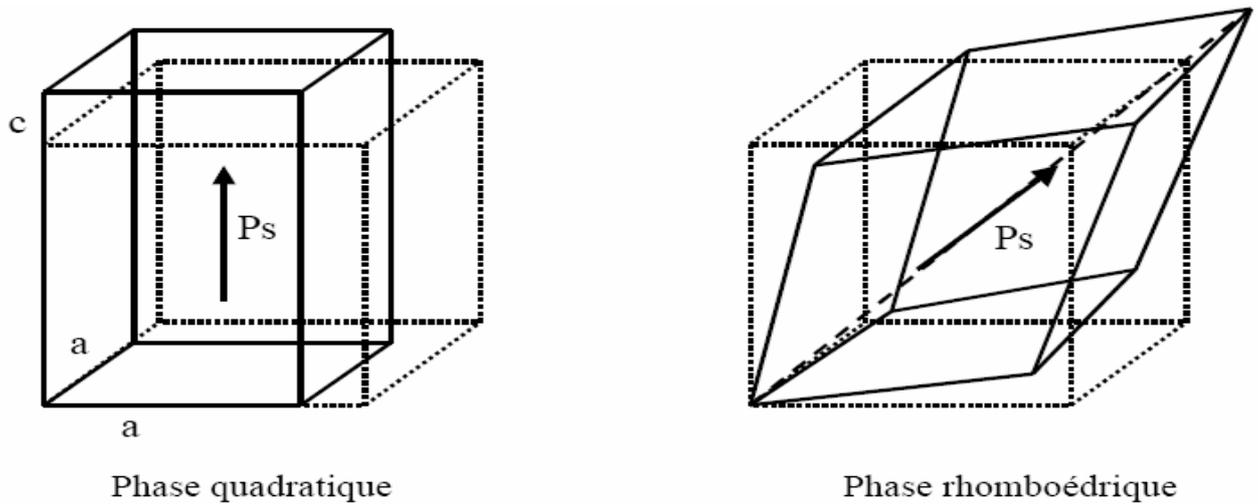


Figure II.9: Diagramme de phase du PZT

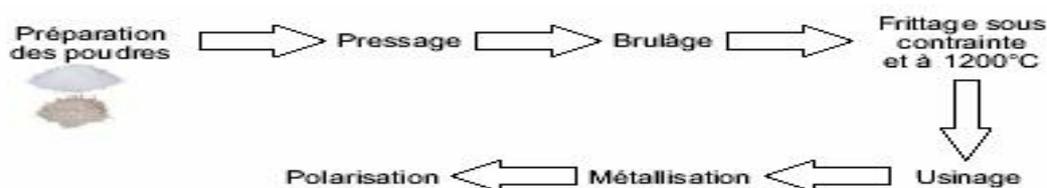


**Figure II.10 : Déformation de la maille pérovskite cubique du PZT donnant les phases quadratique et rhomboédrique suivant le rapport  $Zr/Zr+Ti$ . Les pointillés délimitent la phase cubique de base.**

Suivant les différentes phases de la maille pérovskite, la direction de la polarisation n'est pas la même. Ainsi, lorsque la symétrie est quadratique, l'axe polaire est suivant les directions  $\langle 100 \rangle$  de la maille cubique originale, c'est-à-dire suivant l'axe  $c$  de la phase quadratique. Comme il existe six axes  $\langle 100 \rangle$  équivalents dans la phase cubique, l'axe polaire peut être suivant six directions. Lorsque la symétrie est rhomboédrique, l'axe polaire est suivant les directions  $\langle 111 \rangle$  de la maille cubique originale. Ce qui représente huit directions possibles de polarisation spontanée dans cette phase. Un exemple sur la Figure II.10 [30].

### II.9.2 Procède de fabrication des matériaux PZT

Les zircono-titanates de plomb (PZT) sont élaborés à partir d'un mélange binaire de  $PbTiO_3$  et de  $PbZrO_3$ . En effet le mélange de  $PbTiO_3$  ferroélectriques et de  $PbZrO_3$  anti ferroélectrique, miscibles en toutes proportions, forme des solutions solides de PZT ( $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ ) dont les caractéristiques piézoélectriques et diélectriques sont nettement supérieures à celles des composés initiaux [31]. Les propriétés de ces PZT sont optimales au voisinage de  $PbZrO_3$  52% /  $PbTiO_3$  48% qui correspond à la transition de phase entre deux systèmes cristallographiques.

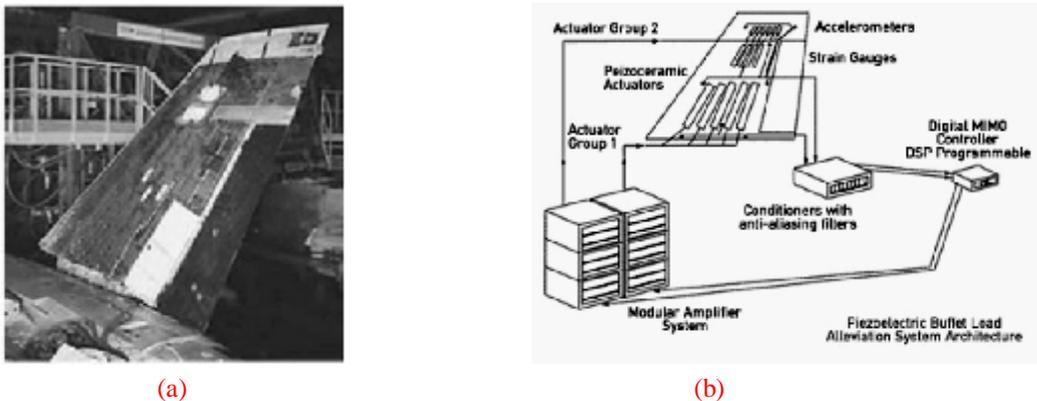


**Figure II.11: Fabrication des céramiques**

## II.10 Applications des matériaux piézoélectriques

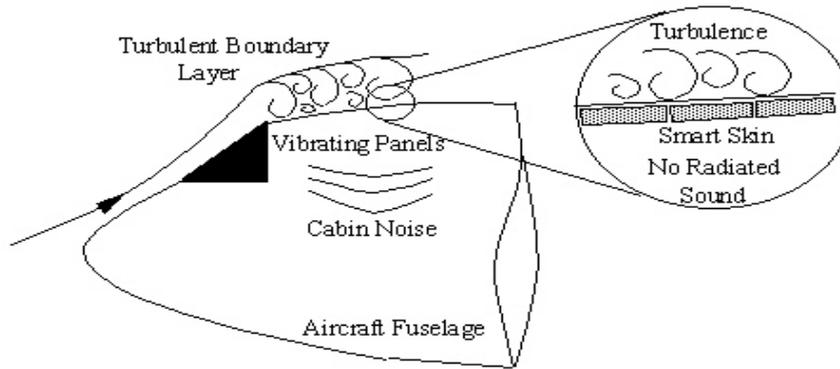
Depuis leur découverte, le nombre d'applications utilisant des matériaux piézoélectriques a été en continuelle augmentation. D'abord sous forme massif puis sous forme de couches de plus en plus minces, leurs propriétés n'ont eu de cesse d'intéresser les chercheurs.

Ces matériaux piézoélectriques sont récemment utilisés dans le domaine aéronautique. La présence de vibrations dans les ailes d'avion est un problème bien connu en aéroélasticité. Certains angles de vols induisent, à haute vitesse, des phénomènes vibratoires importants en bout d'aile qui diminuent la durée de vie de la structure par un phénomène de fatigue accélérée. Les figures II.12 (a) et (b) présentent les travaux qui sont menés sur le contrôle actif des premiers modes de flexion et de torsion d'un empennage de F18, en utilisant des transducteurs piézoélectriques comme capteurs et comme actionneurs.



**Figure II.12 : Dispositif de contrôle actif de vibrations d'un empennage d'avion  
(a) détails, (b) dispositif général (documents ACX NASA)**

Une autre application est la suppression du bruit à l'intérieur du fuselage d'un avion. Dans ce cas, les sources de bruit proviennent des turbulences engendrées par l'écoulement d'air autour de l'avion ainsi que de la transmission directe, par chemin mécanique, des vibrations induites par les moteurs. Certains modes du fuselage engendrent un bruit significatif en basses fréquences à l'intérieur de l'avion. Un dispositif à l'étude (voir figure II.13) utilise des microphones comme capteurs et des couches piézoélectriques couplées au fuselage comme actionneurs structuraux

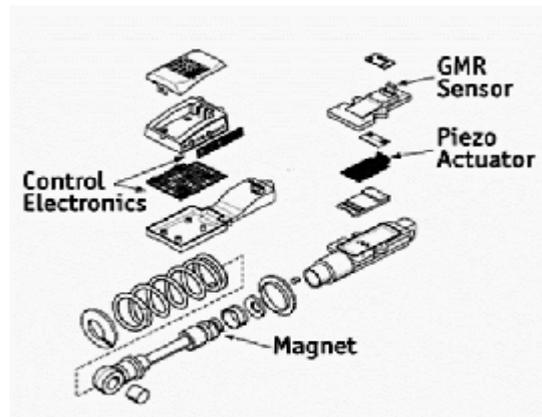


**Figure II.13 : Dispositif de contrôle actif du bruit à l'intérieur du fuselage. (Document Vibration & Acoustics Laboratories, Virginia Tech)**

Les vélos tous-terrains sont conçus pour supporter une multitude de chocs et de vibrations en traversant différents types de terrains accidentés. Avec les suspensions classiques, l'utilisateur doit lui-même ajuster la dureté de l'amortissement en fonction du type de terrain qu'il va principalement rencontrer : une suspension souple pour un terrain fort accidenté et pour une vitesse lente afin de dissiper un maximum d'énergie, une suspension ferme en montée ou à vitesse rapide afin d'éviter de dissiper trop d'énergie cinétique. L'usage d'une suspension semi- active permet de s'affranchir des limites imposées par le pré-réglage de la suspension. Les figures II.14 présentent une suspension active, commercialement disponible, qui, en fonction du type de terrain rencontré, règle automatiquement l'ouverture du passage de fluide dissipatif au moyen d'une valve commandée par un actuateur piézoélectrique.



(a)



(b)

**Figure II.14 : Suspension active d'un vélo tout-terrain (a) vue générale, (b) détails (documents ACX – K2).**

Les laminés piézoélectriques peuvent aussi être utilisés pour dissiper les vibrations des skis afin de garantir le plus possible le contact du ski avec la neige. La figure II.15 présente un modèle de ski équipé d'un dispositif semi-actif qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique au moyen de laminés piézoélectriques, ces derniers étant connectés à un circuit *shunt* (RC) dissipatif.



Figure II.15: Dispositif de contrôle semi-actif de vibrations sur un ski (document ACX, K2).

Ces quelques exemples ne représentent qu'un échantillon des possibilités d'utilisation des laminés piézoélectriques. On pourrait citer également d'autres applications dans le domaine de l'optique adaptative et du Structural Health Monitoring. Pour conclure cette introduction, le tableau II.3 résume les différents domaines de développements des actuateurs piézoélectriques aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Il est intéressant de noter que la taille des structures piézoélectriques tend à croître aux Etats-Unis et, inversement, à se miniaturiser au Japon

TABLE II.3 : Applications de la piézoélectricité (d'après UCHINO [27])

	Etats-Unis	Japon	Europe
Type d'application	Suppression des vibrations	Mini-moteur positionneurs	Mini moteur positionneurs Suppression des vibrations
Domaine d'application	Structures spatiales Vehicules militaires	Equipement de bureau Vidéo – Photo Outillage De précision automobile	Aéronautique Automobile
Taille des actuateurs	↑ (30 cm)	↓ (1 cm)	Intermédiaire (10 cm)

## **II.11 Conclusion**

Les nombreux exemples évoqués au cours de ce chapitre montrent l'intérêt que représente le PZT sous forme de céramique massive. De plus, il est possible d'adapter ce matériau selon la demande en fonction des différents substituant utilisés (une forte constante diélectrique ou un coefficient de couplage important ne s'obtiennent pas forcément avec la même céramique). Le PZT est actuellement l'un des meilleurs candidats pour toutes les applications nécessitant une céramique massive comme par exemple pour les applications médicales ou la maîtrise de petits déplacements en mécanique. La suite naturelle de ce genre de développement est une réduction des dimensions et des coûts de fabrication.

C'est pourquoi son intégration en films minces sur silicium ouvre au PZT le champ d'application des micros capteurs et micro actionneur. Dans cette optique, il est donc important de faire des gros efforts de recherche sur ce matériau en film mince et apporter de nouveaux outils de caractéristique et d'intégration de films de PZT sur silicium.

## **Chapitre III**

# **MISE EN EQUATION DES MATERIAUX**

# **PIEZOELECTRIQUES**

### III.1 Introduction

Les physiciens ont depuis des siècles tenté de mettre en équations le comportement de la matière. Plus ou moins générales, précises ou robustes, ces modélisations s'appuient sur la représentation du phénomène de déformation à l'aide de champs vectoriels et de tenseurs. Ceux-ci décrivent en particulier la déformation de l'objet ainsi que les contraintes internes qu'il subit.

Des lois de comportement viennent ensuite lier les contraintes et la déformation qui en résulte. Ce chapitre présente succinctement cette modélisation physique et les équations principales que nous utiliserons dans les chapitres suivants.

La loi de comportement va relier les deux tenseurs définis précédemment (déformations et contraintes). Comme cela se passe dans un ressort, on va généralement imposer que la contrainte soit linéairement liée à la déformation. On pourrait, mais c'est très rare, introduire des termes de plus haut degré. Pour simuler des comportements plus complexes et en particulier non linéaires, on préfère utiliser une fonction linéaire par morceaux pour approximer la courbe non linéaire qui relie contraintes et déformation.

On voit sur la Figure III.1 une illustration de ce qui se passe au delà du comportement élastique : entre les états A et B, le matériau est élastique ; il devient ensuite plastique si l'on augmente la déformation jusqu'en C. Relâcher la contrainte en C fera revenir le matériau dans une nouvelle position d'équilibre D, selon une pente égale à celle de son comportement élastique.

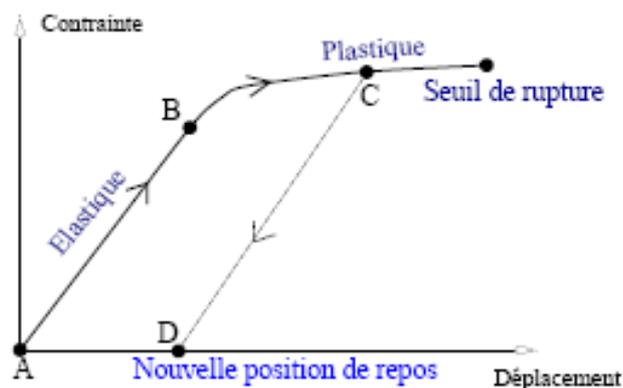


Figure III.1 : Type de comportement d'un matériau au delà des hypothèses de linéarité

### III.2 Notions de mécanique des solides

#### III.2.1 Le tenseur des contraintes

Un corps est soumis à des contraintes lorsqu'une partie de celui-ci exerce des forces sur des parties voisines (par exemple, un poids posé sur une table) [32]. Puisque ces forces doivent dépendre des dimensions du corps, on normalise la description des forces appliquées. On obtient une quantité, la contrainte qui se rapporte à un corps de dimension unité. Une contrainte est équivalente à une pression (rapport d'une force sur une surface) et est exprimée en Pascals ( 1 Pa = 1 newton/m<sup>2</sup>).

Considérons un petit cube de matériau (Figure III.2) situé à l'intérieur de l'objet soumis à des contraintes. Comme ce cube est lié à son environnement, le reste du corps matériel exerce sur ses faces des forces généralement obliques par rapport aux axes de références. Etudions plus particulièrement la force qui s'exerce sur la face perpendiculaire à l'axe X<sub>2</sub>. On décompose la force suivant les trois axes de référence X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> et X<sub>3</sub>. On peut alors définir les composantes de la contrainte s'exerçant sur la face considérée :

$$S_{12} = \frac{F_1}{S_{x_2}} \quad S_{22} = \frac{F_2}{S_{x_2}} \quad S_{32} = \frac{F_3}{S_{x_2}} \quad (III.1)$$

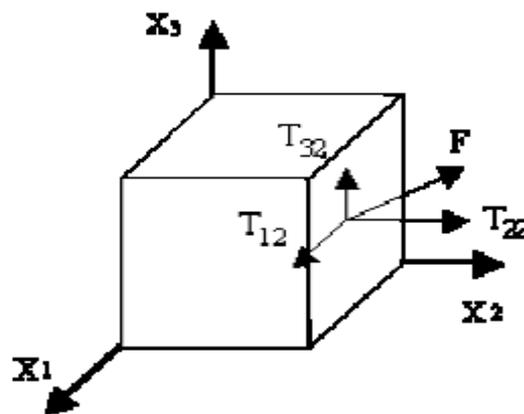


Figure III.2 : Cube sur lequel s'exerce une force **F**

Où F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> sont les composantes de la force  $\vec{F}$  et S<sub>X<sub>i</sub></sub>, la surface élémentaire sur laquelle agit la force F<sub>i</sub>. Par la suite, nous utiliserons la notation indicielle  $\sigma_{ij}$  avec i, j = 1 à 3, indice i : celui de l'axe parallèle à la composante de la force F, indice j : celui de l'axe perpendiculaire à la surface considérée sur laquelle la force  $\vec{F}$  agit.

Telles que nous l'avons défini, la contrainte comporte 18 composantes (trois composantes sur chacune des six faces du cube). En réalité, on montre à partir de considérations mécaniques, que seules 6 composantes sont indépendantes les unes des autres.

### III.2.2 Le tenseur des déformations

La déformation est le processus au cours duquel un corps change ses dimensions en répondant à des forces extérieures. On nomme déformation élastique toutes déformations produisant des effets réversibles. Le changement des dimensions d'un corps matériel déformable doit, comme la contrainte, être normalisé. Considérons deux points M et P proches et placés dans un corps homogène (Figure III.3). Après action d'une contrainte sur ce corps, les points M et P se déplacent en M' et P'.

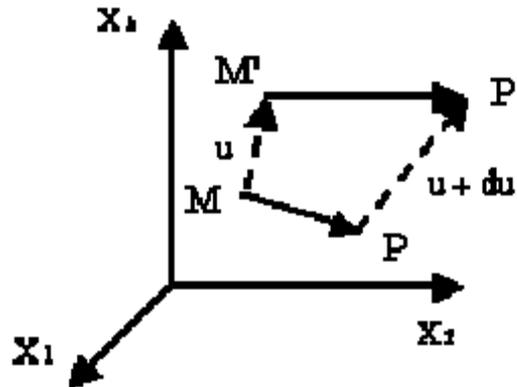


Figure III.3 : Représentation vectorielle d'une déformation au sein d'un solide

Les coordonnées du vecteur défini par ses deux points avant et après déformation sont données par :

$$MP = \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad M'P' = \begin{bmatrix} dx_1 + du_1 \\ dx_2 + du_2 \\ dx_3 + du_3 \end{bmatrix}$$

On peut écrire  $du_1$ ,  $du_2$  et  $du_3$  comme des fonctions des coordonnées  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ , soit :

$$\begin{aligned} du_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} dx_3 \\ du_2 &= \frac{\partial u_2}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} dx_3 \\ du_3 &= \frac{\partial u_3}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} dx_3 \end{aligned} \quad \text{(III.2)}$$

Par définition, il y a déformation si la distance  $dS$  entre M et P est différente de la distance  $ds$  entre M' et P'. Après calcul, on trouve et en négligeant les termes d'ordre deux :

$$dS^2 - ds^2 = 2e_{ij} dx_i dx_j \quad (\text{III.3})$$

Avec

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = e_{ji} \quad (\text{III.4})$$

Les grandeurs  $\epsilon_{ij}$ , appelées déformations, sont représentatives des changements de dimension du corps contraint, et donc de la déformation au point M. La déformation est une grandeur sans unité.

Pour mieux comprendre le sens physique de la déformation, plaçons-nous dans un cas unidimensionnel. Imaginons un barreau cylindrique que nous étirons de façon à augmenter sa longueur de  $L$  à  $L+\Delta L$  le long de l'axe  $X_1$ .

La déformation  $\epsilon_1$  s'écrit :

$$e_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{III.5})$$

La déformation dans le cas présent représente la variation de la taille de l'objet dans une direction donnée, rapportée à la dimension de cet objet dans cette direction.

### **III.2.3 La relation contrainte – déformation**

De nombreux matériaux, dont les métaux, vérifient la loi formulée au XVII<sup>e</sup> siècle par l'astronome et mathématicien anglais Robert Hooke, la loi de Hooke, qui stipule que l'allongement est proportionnel à la contrainte.

Cependant, lorsque la force exercée se révèle trop importante, la déformation n'est plus réversible et l'objet déformé ne reprend plus sa forme initiale. Le matériau ne se trouve plus alors dans son domaine élastique, mais dans son domaine plastique. Dans ce cas, la loi de Hooke ne s'applique pas. La contrainte maximale d'un matériau peut supporter tout en restant élastique constitue sa limite d'élasticité.

### Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

Comme on l'a vu précédemment, les contraintes et les déformations sont représentées par des tenseurs symétriques de rang 2 de composantes  $\sigma_{ij}$  et  $\epsilon_{kl}$  respectivement ( $i, j, k$  et  $l = 1$  à  $3$ ). Ainsi, tant que la relation entre contrainte et déformation reste linéaire, ces deux tenseurs sont reliés par un tenseur de rang 4, appelé tenseur des rigidités de composantes  $C_{ijkl}$ . C'est la loi de Hooke généralisée.

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (\text{III.6})$$

$$\epsilon_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 S_{ijkl} \sigma_{kl}$$

Où  $C_{ijkl}$  est une matrice de rigidité 4<sup>ème</sup> ordres caractérisant le matériau donc on a ( $3^4 = 81$  coefficients) connus comme constantes élastiques.

$S_{ijkl}$  est une matrice de souplesse et  $\epsilon_{ij}$  tenseur de déformation.

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 nombre de constantes  $C_{ijkl}$  se réduit à 54. De plus, la symétrie du tenseur de déformation, donne une seconde réduction des constantes  $C_{ijkl}$  à 36. Et par raison de symétrie de ce tenseur ( $C_{ijkl} = C_{klij}$ ), qui ramène cette matrice à 21 constants indépendants. Ces constantes traduisent la réponse des forces appliquées sur un matériau anisotrope.

Dans un souci de simplification de l'écriture tensorielle, on utilise la notation abrégée suivante pour passer d'un système à 2 indices à un système à un seul indice pour  $\sigma$  et  $\epsilon$  et à un système à deux indices pour  $c$  ; chaque couple  $(ij)$  et remplacé selon la règle :

$$\begin{array}{ll} 11 & \longrightarrow 1 \\ 22 & \longrightarrow 2 \\ 33 & \longrightarrow 3 \\ 23 \text{ ou } 32 & \longrightarrow 4 \\ 31 \text{ ou } 13 & \longrightarrow 5 \\ 12 \text{ ou } 21 & \longrightarrow 6 \end{array}$$

On aura donc :  $\sigma_i = C_{ij} \epsilon_j$  avec  $i, j = 1, \dots, 6$  (III.7)

Sous forme matricielle, la loi se ramène à :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \\ \mathbf{s}_3 \\ \mathbf{t}_{23} \\ \mathbf{t}_{31} \\ \mathbf{t}_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \\ \mathbf{g}_{23} \\ \mathbf{g}_{31} \\ \mathbf{g}_{12} \end{Bmatrix}$$

*Symetrie*

Avec la notation indicielle simplifiée, nous retiendrons la définition suivante pour le coefficient de rigidité (ou raideur) :

$$C_{mn} = \frac{\text{contrainte dans la direction } m}{\text{déformation dans la direction } n} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_n}$$

### III.3 Matériau orthotrope

Il présente en tout points du matériau trois symétries du comportement mécanique dont chacune par rapport à un plan, les trois plans sont orthogonaux, le nombre de coefficients élastiques indépendants se réduit à 9. La loi de comportement exprimée dans les axes alignés avec les directions principales du matériau (axes d'orthotropie) en notation matricielle :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \\ \mathbf{s}_3 \\ \mathbf{t}_{23} \\ \mathbf{t}_{31} \\ \mathbf{t}_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \\ \mathbf{g}_{23} \\ \mathbf{g}_{31} \\ \mathbf{g}_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{(III.8)}$$

On a aussi :

$$\begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ g_{23} \\ g_{31} \\ g_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -n_{21}/E_{22} & -n_{31}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -n_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -n_{32}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -n_{13}/E_{11} & -n_{23}/E_{22} & 1/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{12} \end{Bmatrix}$$

A cause de la symétrie de la matrice de souplesse, on trouve

$$\frac{n_{21}}{E_{22}} = \frac{n_{12}}{E_{11}} \quad , \quad \frac{n_{13}}{E_{11}} = \frac{n_{31}}{E_{33}} \quad , \quad \frac{n_{23}}{E_{22}} = \frac{n_{32}}{E_{33}}$$

### III.4 Matériau isotrope

C'est un matériau invariant quel que soit le changement de repère, toutes les directions sont identiques. Chaque plan étant un plan d'isotropie ou de symétrie. Traditionnellement la matrice des rigidités {C} s'écrit sous la forme :

$$\{C\} = \begin{bmatrix} l + 2m & l & l & 0 & 0 & 0 \\ & l + 2m & l & 0 & 0 & 0 \\ & & l + 2m & 0 & 0 & 0 \\ & & & m & 0 & 0 \\ & & & & m & 0 \\ \text{Symetrie} & & & & & m \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Dans laquelle  $\lambda$  et  $\mu$  sont les modules de lamé ( $\mu$  est aussi le module de rigidité au cisaillement G). la matrice des souplesses a la structure suivante :

$$\{S\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{n}{E} & -\frac{n}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & -\frac{n}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{2(1+n)}{E} = \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{2(1+n)}{E} = \frac{1}{G} & 0 \\ \text{Symetrie} & & & & & \frac{2(1+n)}{E} = \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

## Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

Avec  $E$  module d'Young,  $\nu$  le coefficient de poisson et  $G$  le module de rigidité au cisaillement ou module de Coulomb ( $G = \mu$ ).

### III.5 Théorie linéaire de la Piézoélectricité

Dans la piézoélectricité linéaire les équations d'élasticité linéaire sont associées à l'équation de la charge électrostatique par les constantes piézoélectriques. Cependant, les variables électriques ne sont pas purement statiques, mais seulement quasi statique, à cause de l'association avec les équations mécaniques de la dynamique. Donc pour fournir une théorie appropriée pour le matériau, la mécanique appliquée et les variables du champ électrique sont brièvement définies ainsi que les équations électriques.

#### III.5.1 Considérations mécaniques

Désignons par  $u_i$  la composante cartésienne d'un déplacement mécanique infinitésimal en un point précis d'un matériau. Le tenseur des déformations est défini par :

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{Avec} \quad u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (\text{III.10})$$

On notera que la partie antisymétrique du gradient des déplacements mécaniques détermine la rotation locale, infinitésimale.

L'interaction mécanique entre deux portions d'un solide, séparées par une surface arbitraire  $S$ , est caractérisée par un vecteur de forces de tractions  $t$  appliquées sur cette surface. Le vecteur de traction  $t$  est relié au tenseur de contrainte  $\sigma$  par la relation :

$$t_j = n_i \sigma_{ij}$$

Où  $n_i$  dénote la composante normale extérieure à la surface en question.

Enfin, les équations d'équilibre dynamique sont données par l'expression suivante (formalisme de sommation d'Einstein):

$$\sigma_{ij,i} = \rho \ddot{u}_j \quad (\text{III.11})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique du matériau.

### III.5.2 Considérations électriques

Les vecteurs d'intensité du champ électrique  $E$  et du déplacement électrique  $D$  sont reliés par l'expression :

$$D_i = \epsilon_0 E_i + P_i \quad (\text{III.12})$$

Avec  $\mathbf{P}$  le vecteur de polarisation et  $\epsilon_0$  la permittivité du vide :

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Le vecteur du champ électrique  $E$  se dérive du potentiel électrique  $\phi$  par :

$$E_i = -j_{,i}$$

Enfin, le vecteur de déplacement électrique  $\mathbf{D}$  satisfait le théorème de Gauss (pas de charges électriques libres) dans un matériau isolant :

$$D_{i,i} = 0$$

### III.5.3 la piézoélectricité linéaire

La piézoélectricité est le résultat d'un couplage entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique d'un matériau. Lorsque l'effet pyroélectrique est négligeable, les équations piézoélectriques relient une variable mécanique (déformation  $\epsilon$  ou contrainte  $\sigma$ ) et une variable électrique (induction électrique  $D$  ou champ électrique  $E$ ).

$$S_{ij} = c_{ijkl}^E e_{kl} - e_{kij} E_k \quad (\text{III.13})$$

$$D_i = e_{ikl} e_{kl} + e_{ij}^e E_k$$

$S_{ij}$  et  $\epsilon_{kl}$  sont les termes des tenseurs des contraintes et des déformations

$D_i$  et  $E_i$  sont les composantes des vectrices inductions et champ électrique

Avec  $c_{ijkl}^E$ ,  $e_{kij}$  et  $e_{ij}^e$  sont respectivement appelées les constantes élastiques mesurées à champ électrique  $E$  constant, les constantes piézoélectriques et les constantes diélectriques mesurées à déformations constantes.

### Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

Une notation matricielle plus condensée peut être introduite en condensant les indices  $ij$  ou  $kl$  par  $p$  ou  $q$  suivant les conventions données à la table 1.3 :

**Tableau III.1 : Correspondance entre les notations tensorielle et matricielle.**

$ij$ ou $kl$	$p$ ou $q$
11	1
22	2
33	3
23 ou 32	4
31 ou 13	5
12 ou 21	6

Les équations constitutives peuvent alors être réécrites sous la forme :

$$\mathbf{S}_p = c_{pq}^E \mathbf{e}_q - e_{kp} \mathbf{E}_k \quad (\text{III.14})$$

$$D_i = e_{kq} \mathbf{e}_q + e_{ik}^e \mathbf{E}_k$$

Avec  $\mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E}_p$  quand  $i = j, p=1, 2, 3$

$2\mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E}_p$  quand  $i \neq j, p=4, 5, 6$

Ainsi que  $c_{ijkl}^E \equiv c_{pq}^E$   $e_{ikl} \equiv e_{ip}$   $\mathcal{S}_{ij} \equiv \mathcal{S}_p$

### III.6 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 matrices des constantes piézoélectriques (d, e, g et h) ont six colonnes et trois lignes, les matrices transposées sont repérées par un suffixe t en exposant, les autres grandeurs en exposant signifient que cette grandeur est constante ou nulle, par exemple  $S^E$  définit le coefficient de compliance à champ constant ou nul.

Soit V une tension appliquée entre deux électrodes déposées sur les faces perpendiculaires à la polarisation spontanée. Il en résulte une déformation de dilatation ou de contraction  $\frac{\Delta a}{a}$  dans la direction 3 et  $\frac{\Delta a'}{a'}$  dans les directions 1 et 2. Si la polarisation V est appliquée sur des électrodes

### Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

déposées sur les faces perpendiculaires à l'axe 1, donc perpendiculaire aussi à l'axe de polarisation spontanée, alors la déformation du matériau piézoélectrique sera en cisaillement.

Les matériaux piézoélectriques possèdent des performances différentes d'un matériau à un autre. Pour quantifier les performances des quartz ou des céramiques, plusieurs coefficients sont définis [33,34, 35], résumé dans le tableau suivant :

**Tableau III.2 : Glossaire des symboles dans la piézoélectricité**

Abréviation	définition	Type d'énergie	Taille des matrices
D	Déplacement électrique ou induction $C/m^2$	ELECTRIQUE	(3,1)
E	Champ électrique en $V/m$		(3,1)
$\epsilon$	Permittivité électrique en $F/m$		(3,3)
$\beta$	Constante d'imperméabilité diélectrique en $m/F$		(3,3)
$\mathcal{E}$	Déformation relative en $m/m$	MECANIQUE	(6,1)
$\sigma$	Contrainte mécanique en $N/m^2$		(6,1)
s	Compliance ou susceptibilité élastique en $m^2/N$		(6,6)
c	Raideur ou constante élastique en $N/m^2$		(6,6)
d	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte à champ constant ou nul en $C/N$ ou $m/V$	PIEZOELECTRIQUE	(3,6)
e	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation à champ constant ou nul en $C/m^2$ ou $N/V.m$		(3,6)
g	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la contrainte et le champ résultant à induction constante ou nulle en $V.m/N$ ou $m^2/C$		(3,6)
h	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ résultant à induction constante ou nulle en $V/m$ ou $N/C$		(3,6)

Les matériaux étant anisotropes pour la plupart, chaque symbole possède un indice, soit unique comme  $D_i$ , soit double ( $\epsilon_{ij}$ ) 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.3 est un glossaire des symboles utilisés dans les différentes équations et matrices.

De là nous pouvons écrire les quatre formes tensorielles des équations de la piézoélectricité [36].

**Tableau III.3 : Equations d'état piézoélectriques**

Variables indépendantes	Grandeurs électriques	Grandeurs mécaniques
$E, \sigma$	$D = d\sigma + \varepsilon^\sigma E$	$\varepsilon = s^E \sigma + d^t E$
$D, \sigma$	$E = \beta^\sigma D - g\sigma$	$\varepsilon = s^D \sigma + g^t D$
$E, \varepsilon$	$D = \varepsilon^E E + e\varepsilon$	$\sigma = c^E \varepsilon - e^t E$
$D, \varepsilon$	$E = \beta^E D - h\varepsilon$	$\sigma = c^D \varepsilon - h^t D$

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

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

L'ordre des tenseurs et leurs nombres impliquent qu'un grand nombre de constantes scalaires sont nécessaires pour décrire le phénomène piézoélectrique mais les symétries permettent de réduire beaucoup ce nombre. La mise sous forme matricielle des coefficients élastiques, piézoélectrique et diélectrique donne le système ci-dessous pour un matériau quadratique de classe 4mm (c'est-à-dire possédant un axe de symétrie et quatre plans de symétrie).

Matrice des coefficients élastiques (identique pour  $C^E, C^D, S^E$  et  $S^D$ )

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{bmatrix}$$

Matrice des coefficients piézoélectriques (identique pour d, e, g et h)

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice des coefficients piézoélectriques (identique pour  $\varepsilon^E, \varepsilon^\sigma, \beta^E$  et  $\beta^\sigma$ ).

$$\begin{bmatrix} e_{11} & 0 & 0 \\ 0 & e_{11} & 0 \\ 0 & 0 & e_{11} \end{bmatrix}$$

En raison de la dépendance directionnelle des propriétés du matériau (anisotropie), les paramètres des équations constitutives de la piézoélectricité doivent être représentés par des tenseurs. On dénombre quatre modules piézoélectriques différents formant une matrice de 3 lignes et de 6 colonnes (tenseur d'ordre 3) et traduisant le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. Des équations précédentes, nous pouvons déterminer les relations entre les coefficients piézoélectriques [37].

$$\begin{aligned} d_{mi} &= e_{nm}^s g_{ni} = e_{mj}^E S_{ji}^E \\ g_{mi} &= b_{nm}^s d_{ni} = h_{mj}^D S_{ji}^D \end{aligned} \quad \text{Avec } m, n = 1 \text{ à } 3 \text{ et } i, j = 1 \text{ à } 6 \quad \text{(III.15)}$$

$$\begin{aligned} e_{mi} &= e_{nm}^e h_{ni} = d_{mj}^E C_{ji}^E \\ h_{mi} &= b_{nm}^s e_{ni} = g_{mj}^D C_{ji}^D \end{aligned}$$

Comme l'indique la Figure III.4, les indices 1, 2, 3 correspondent respectivement aux directions normales aux plans YOZ, XOZ et XOY et les indices 4, 5, 6 aux directions tangentielles à ces mêmes plans.

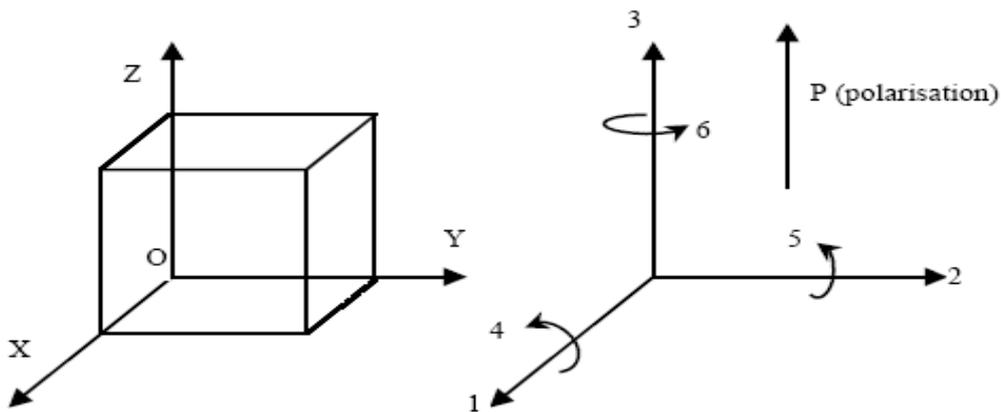


Figure III.4: Définition des directions dans un milieu piézoélectrique

Enfin, l'étude cristallographique des matériaux piézoélectriques permet de déterminer le nombre de termes indépendants présents dans les équations de la mécanique continue développées au III.5.3. Le terme cristal est appliqué pour des solides où les atomes sont arrangés suivant un schéma qui se répète périodiquement tout au long de ce solide. Dépendant de leur degré de symétrie, les cristaux sont habituellement classés en 7 systèmes : triclinique,

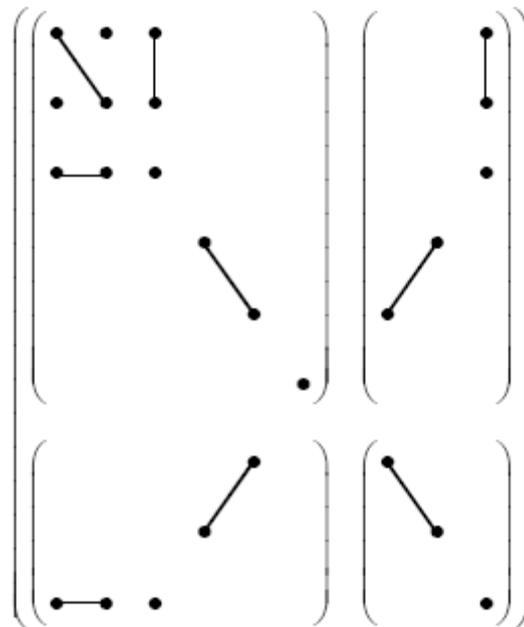
Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

monoclinique, orthorhombique, tétragonal, trigonal, hexagonal et cubique. Ces sept systèmes peuvent encore être divisés en 32 classes suivant certaines particularités de symétrie. De ces 32 classes, 20 présentent des caractéristiques piézoélectriques.

Chaque système cristallographique possède au moins une classe avec des propriétés piézoélectriques. Pour chacune de ces 20 classes, on peut trouver dans Ikeda [38] et [39] la visualisation des termes indépendants et non- nuls de la matrice élasto-piézo-diélectrique :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{c}^E & \mathbf{e}^t \\ \mathbf{e} & \epsilon^S \end{pmatrix}$$

Par exemple, pour le Zirconate-Titanate de Plomb lorsque la température est en dessous de  $T_c$  et on a une dominance du Titane. Cette phase présente une symétrie cristallographique du système tétragonale, classe dite 4mm. En fonction de ce type de symétrie cristalline, la topologie de la matrice élasto-piézo-diélectrique peut se simplifier sous la forme présentée à la figure III.5 :



**Figure III.5 : Structure de la matrice élasto-piézo-diélectrique.**

**III.7 Modes de déformation**

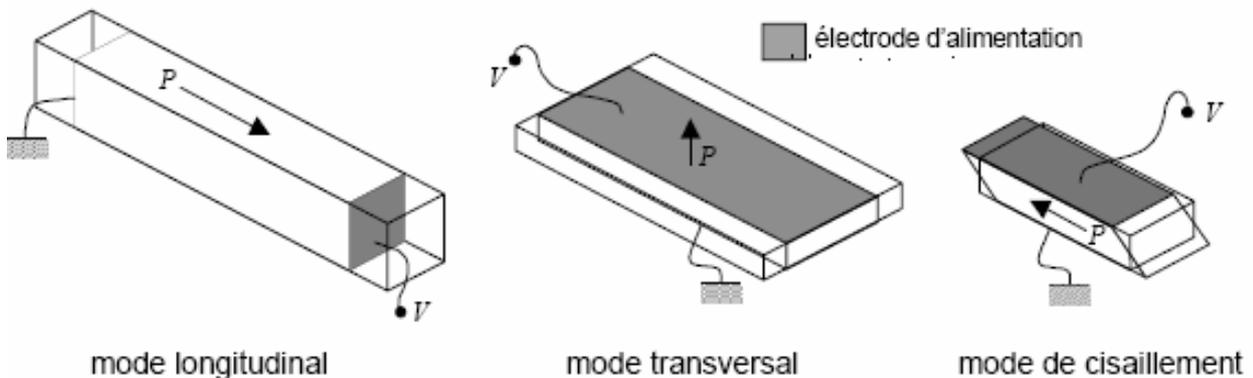
Du fait de l'anisotropie des matériaux piézoélectriques, leur déformation se fait selon une direction privilégiée sous l'action d'un champ électrique  $\vec{E}$ . Une étude des propriétés de ces

### Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

matériaux nécessite donc une identification des directions. Les propriétés piézoélectriques sont décrites par un système normalisé de symboles et de notations.

D'une manière générale, une céramique piézoélectrique est référencée par un trièdre  $(O, x_1, x_2, x_3)$ . Par convention, la direction et le sens de la polarisation sont confondus avec l'axe 3 ou  $(Oz)$ .

La déformation souhaitée est obtenue en appliquant une différence de potentiel sur les faces perpendiculaires à l'axe 3. Par l'application d'un champ électrique  $\vec{E}$  suivant l'axe  $Oz$ , trois modes de déformation distincts sont obtenus comme présenté sur la figure III.6. Les modes de couplage sont définis par deux chiffres, le premier correspond à la direction du champ électrique appliqué et le second à l'axe selon lequel a lieu la déformation.



**Figure III.6 : Modes de vibration fondamentaux d'une céramique piézoélectrique**

– Le mode longitudinal (mode d33) traduisant des déformations dans la même direction que l'axe du champ électrique. Ce mode possède un bon coefficient de couplage, cependant le placement des électrodes sur les surfaces vibrantes les fragilise.

– Le mode transversal (mode d31 ou d32) traduisant des déformations perpendiculaires à l'axe du champ électrique. Dans ce mode, les électrodes ne sont pas placées sur les surfaces subissant les déformations, donc offrant l'avantage de ne pas soumettre les électrodes à la contrainte.

En revanche, il possède un coefficient de couplage moindre que le mode longitudinal. Donc ce mode est utilisé dans le cas de matériaux de faibles épaisseurs suivant l'axe de polarisation comme dans les cas d'actionneurs de type bimorphe ou trimorphe.

– Le mode de cisaillement (mode d15) traduisant des déformations perpendiculaires à la direction de polarisation ou autour d'un axe. La céramique subit alors un phénomène de torsion

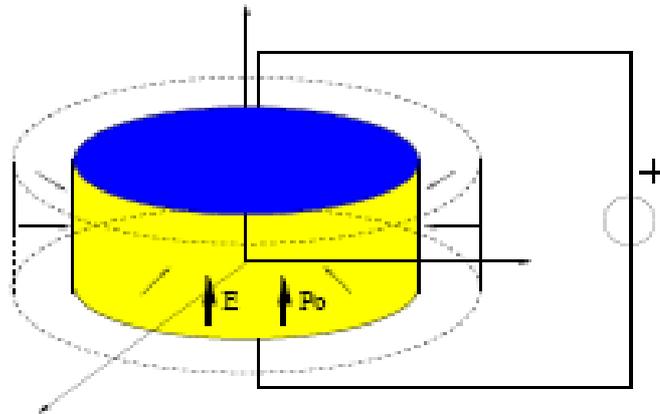
### Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

autour de l'axe choisi. Elle est obtenue lorsque le champ appliqué est perpendiculaire à la polarisation du matériau.

Par exemple, si le champ est appliqué sur l'axe 1, la déformation se fera autour de l'axe 2.

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 sur la figure III.7) ou d'origine électrique par déplacement dipolaire (modification des parois de blocs).



**Figure III.6: Déformation parasite par conservation du volume. Pour une déformation longitudinale, la conservation du volume introduit un mode transversal mécanique.**

En jouant sur la forme de l'échantillon (plaque, tube, ...) et sur sa polarisation (uniforme, radiale,...), une grande variété de déformations peuvent être exploitées.

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  $d_{33}$ .

En termes de propriétés électriques et mécaniques, Les PZT possèdent généralement des constantes de charges assez élevées, qui selon le mode de couplage peuvent être comprises entre 200 et 600 pC/N, ainsi que des permittivités diélectriques relatives fortes (1000 à 3000).

Le champ électrique maximum applicable est d'environ 1 MV/m et les pertes diélectriques sont représentées par un angle de perte (noté  $\delta$ ) dont la tangente se situe aux alentours de 0,002 à 0,02 [40]. Les déformations mécaniques obtenues à vide sont comprises entre 200 et 800 ppm (parties par million). Selon le mode de couplage sollicité, le coefficient de couplage électromécanique peut varier de 0,3 à 0,75.

### Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

Elles sont limitées à une température de fonctionnement inférieure à la température critique de Curie, variant avec le matériau, qui se situe aux alentours de 150 °C.

C'est donc la température qui joue aussi un rôle important dans le comportement des céramiques. Les céramiques se dépolarisent totalement si elles sont portées au delà de la température de Curie. Parmi les 21 classes cristallines qui offrent un effet piézoélectrique, 10 sont dites pyroélectriques i.e. l'amplitude du moment dipolaire global est fonction de la température.

La température influe donc sur la polarisation du matériau et inévitablement sur ses caractéristiques électriques et mécaniques. La température étant source de bruit blanc, son effet a pour incidence de faire chuter les constantes piézoélectriques et mécaniques à cause de l'agitation qui fait osciller les mailles cristallines et donc par conséquent fait vibrer les dipôles électriques.

La contribution moyenne de tous les dipôles diminue. Cette diminution est totale pour la température de Curie où la distribution des orientations dipolaires est aléatoire à moyenne nulle (entre 200°C et 400°C).

Le matériau piézoélectrique est dit dépolarisé. Un fonctionnement à haute température est à proscrire car le processus de vieillissement s'accélère, les pertes électriques augmentent, le rendement s'effondre et la contrainte maximale applicable diminue. En pratique, il ne faut pas dépasser une température de fonctionnement correspondant à la moitié de la température de Curie.

### **III.8 Conclusion**

La compréhension du phénomène de la piézoélectricité nécessite des connaissances dans des domaines très différents que sont la mécanique des milieux déformables, la cristallographie et l'électromagnétisme. Nous en avons rappelé l'essentiel pour pouvoir aborder la mise en équation de la piézoélectricité. Pour notre mémoire, nous avons retenu le couple d'équations ( $\epsilon, E$ ), déformation -champ électrique. Ce système d'équations nous servira pour établir un modèle unidimensionnel de la piézoélectricité.

Rappelons que les caractéristiques physiques d'un matériau piézoélectrique sont sa permittivité, sa rigidité mécanique, sa densité, 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 que dans la suite de notre mémoire, nous utiliserons pour le PZT des valeurs issues de

### Chapitre III : Mise en équation des matériaux orthotropes

mesure sur matériau massif. Il faudra donc garder à l'esprit que pour un film mince, ces valeurs diffèrent quelque peu.

**Chapitre V**  
**EXEMPLES D'APPLICATIONS DE**  
**MICROSYSTEMES A BASE DE MATERIAUX**  
**PIEZOELECTRIQUES**

## **V.1 Introduction**

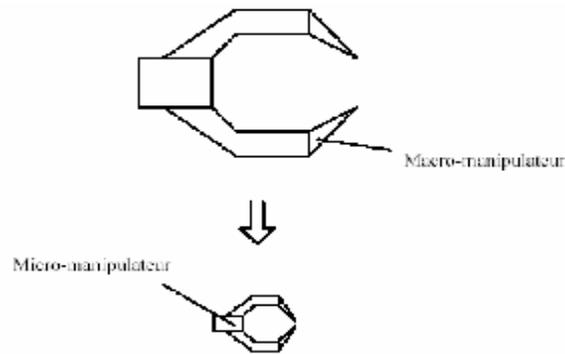
Ce chapitre est consacré à des applications bien spécifiques dédié aux micros systèmes conçus pour réaliser des tâches de micromanipulation de façon intelligentes et rapides. La première application proposée est une micro pince, qui nous permet d'effectuer des tâches de manipulation sur des objets dont la taille est typiquement inférieure au millimètre. Ces dispositifs très utile, parfois indispensable sont conçus pour réaliser des opérations de micro assemblage ou pour visualiser un micro objet à l'aide d'un microscope et de pouvoir positionner des objets ou des micros systèmes avec une très grande précision (inférieure à 1  $\mu\text{m}$ ). Ensuite, nous présenterons deux autres applications cette fois-ci orientées vers le domaine de la micro connections. Des micros commutateurs se présenteront sous la forme des micros poutres envisageables sous forme de structure de type cantilever encastrement-libre ou de structure de type pont bi-encastrement. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons donner quelques notions importantes sur leur principe de fonctionnement afin de mieux comprendre et mieux modéliser les phénomènes mis en jeu lors de la déflexion de nos structures, sous l'effet d'une sollicitation. Au cours de nos travaux, nous allons maintenant présenter comment opèrent ces composants et pour quelles applications ils semblent être les plus appropriés.

## **V.2 Approches pour la conception de micromanipulateurs**

### **V.2.1. Une micro pince**

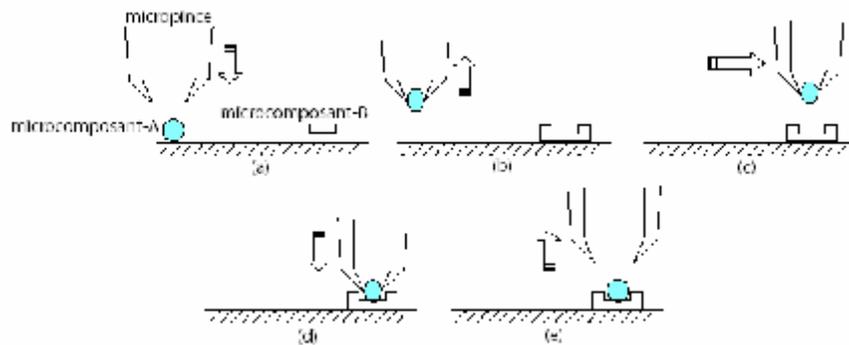
Notre objectif étant de manipuler des micros objets, nos recherches se sont orientées vers l'étude et la réalisation de pinces qui soient à la fois adaptés aux dimensions des objets à manipuler et de conception simple. Nous avons choisi d'utiliser comme actionneurs des matériaux piézoélectriques pour tous les avantages qu'ils présentent (voir chapitre III).

Dans ce contexte, la stratégie la plus simple adoptée pour concevoir un micromanipulateur consiste à utiliser les connaissances acquises des expériences de manipulation à l'échelle macroscopique. Un micromanipulateur peut alors être réalisé par miniaturisation des macros outils pour permettre la manipulation d'objets de faible taille (voir figure V.1). Ces organes développés spécialement pour le procédé de micro assemble.



**Figure V.1 : Miniaturisation de macro-manipulateurs**

Ce procédé est généralement un processus final lors de la production de micro systèmes. Il est fondé sur le principe de « prise-dépose » c'est à dire le (pick-and-place) (cf.fig.V.2). Il nécessite au moins un micromanipulateur permettant de saisir les micros composants (avec ou sans contact), de les transporter et de les déposer.



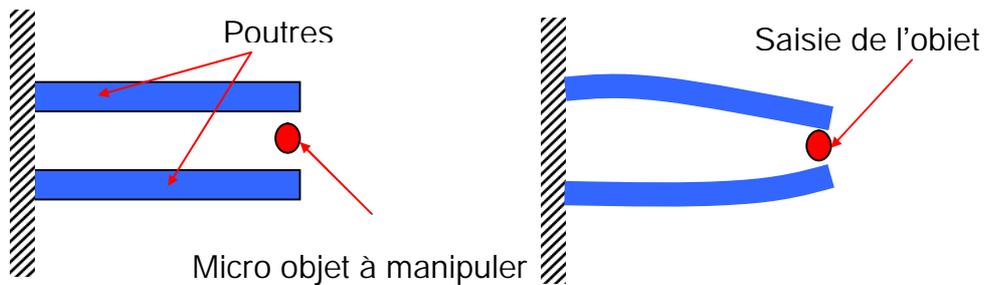
**Figure V.2 : Différentes phases de micro assemblage**

Malheureusement l'ensemble des techniques classiques utilisées actuellement sont très coûteuses et pose beaucoup de problèmes de point de vue précision pendant la prise, maintien et la dépose des objets sélectionnés. De plus, les efforts appliqués pendant le serrage des micros composants engendrent parfois des déformations d'objets à porter ou les faire tomber facilement pendant le déplacement d'un point à l'autre (cf.fig.2). Il est donc impératif de trouver de nouveaux systèmes de production associant productivité, précision et flexibilité. Il s'agit des micros systèmes de production composés de deux poutres piézoélectriques bimorphe. Les micros systèmes vont prendre en compte les caractéristiques du micro monde afin de réaliser efficacement les différentes opérations telles que la micromanipulation. Elles doivent également être organisées pour permettre une bonne productivité, principalement dans le contexte de petite et moyenne séries.

Cette approche consiste en la fabrication et la commande d'un doigt de pince (poutre, baguette...) pouvant se déplacer en flexion ou en mouvement latéral. Dès lors, un micromanipulateur peut être réalisé en utilisant deux doigts ou plus.

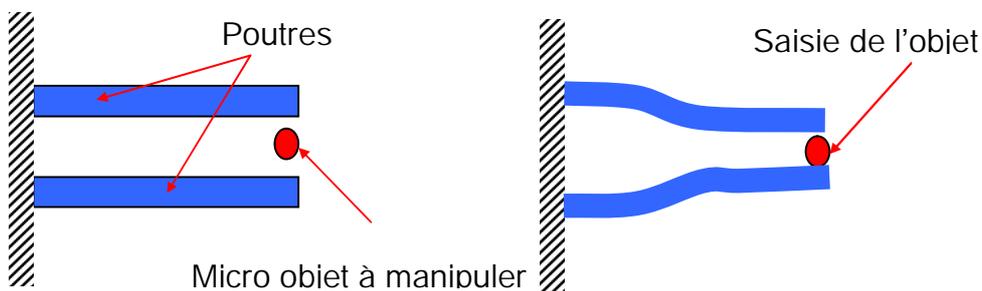
Cette méthode est particulièrement intéressante pour les applications de manipulation qui nécessitent de pouvoir actionner chaque doigt indépendamment des autres. Une manière relativement simple consiste à utiliser des poutres bimorphes piézoélectriques (voir chapitre IV).

Le moyen le plus simple pour manipuler des micros objets consiste à utiliser une pince à deux doigts de serrage. Celle-ci peut, dans sa version la plus dépouillée, être constituée de deux poutres encastrées capables de se déplacer en flexion (cf.fig.V.3).



**Figure V.3 : Structure simple d'une pince à deux doigts**

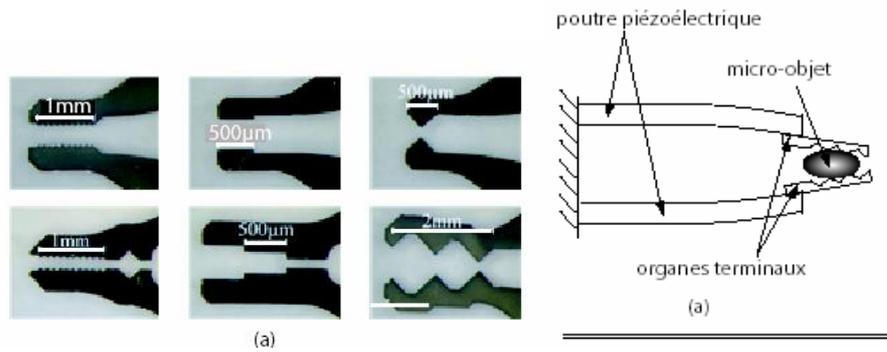
La saisie du micro objet est plus aisée si les extrémités des poutres restent parallèles entre elles. On évite ainsi les mouvements brusques de fuite du micro objet. On aboutit alors à la configuration représentée sur la figure V.4.



**Figure V.4 : Structure simple d'une pince à extrémités parallèles**

De plus, lors de la manipulation de micro objets, le changement de micromanipulateur est parfois nécessaire. Par exemple, selon la forme et la dimension des micros objets, on doit changer la micro pince. Cependant, cela paraît coûteux vu la difficulté de fabrication des micromanipulateurs. On utilise donc des organes terminaux qui sont placés sur ces micromanipulateurs. Ces organes terminaux change de forme selon les micros objets à manipuler. La Figure V.5a montre différentes formes d'organes terminaux utilisés pour différentes formes de micro objets.

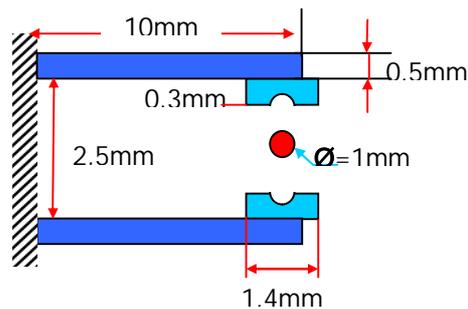
La Figure V.5b montre une micro pince équipée d'un organe terminal [72] permet d'assurer la prise, le transport d'un micro objet et d'éviter de le détruire.



**Figure V.5 : Mise en place d'organes terminaux sur une micro pince (a). (b) exemple d'organes terminaux [72]**

### V.2.2 Modélisation électromécanique d'une micro pince

La micro pince est constitué de deux micro poutres de matériau piézoélectrique PZT, de polarité opposée. Lorsqu'une tension électrique est appliquée transversalement à l'épaisseur, les déformations internes des deux couches piézoélectriques induisent des forces de contrôle qui fléchissent les poutres piézoélectriques. La géométrie du système est représentée par la figure V.6.



**Figure V.6 : Dimensions de la micro pince utilisée dans la simulation par Ansys.**

Le matériau sélectionné pour cette application est une céramique piézoélectrique de type PZT-5A. Ce matériau, dont les caractéristiques physiques principales sont reprises au tableau V.1, est couramment utilisé pour la fabrication des actuateurs piézoélectriques.

Module d'Young $E$ [ $N.m^{-2}$ ]	Densité $\rho$ [ $Kg.m^{-3}$ ]	Coefficient piézoélectrique $d_{31}$ [ $mV^{-1}$ ]
$6.9 \times 10^{10}$	7700	$-179 \times 10^{-12}$

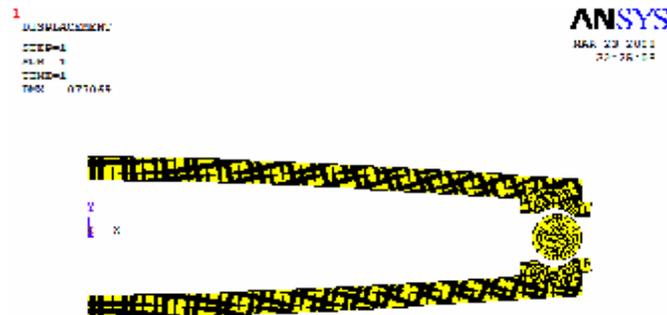
**Tableau V.1 : Caractéristiques du matériau piézoélectrique PZT-5A.**

La micro pince est soumise à une tension électrique  $V$  unitaire appliquée aux bornes des électrodes (voir chapitre IV). La déflexion statique aux différents nœuds est alors calculée à partir du modèle éléments finis présenté à la figure V.7.



**Figure V.7 : Modèle éléments finis de la micro pince.**

Pour déterminer la valeur du déplacement associé au champ électrique appliqué, nous avons réalisé des simulations numériques avec le logiciel Ansys®. L'objet à porter est une boule d'acier de 1mm de diamètre. Un champ électrique est appliquée sur les éléments piézoélectrique de la micro pince engendre une déformation bien illustré sur la figure V.8.



**Figure V.8 : Déformée d'une micro pince sous un champ électrique de 100V.**

Les résultats extraies de ces modélisations en terme des isovaleurs de déplacement  $U_y$  et de contrainte de von mises sont présentés sur la figure V.9. Ces simulations montrent que pour une valeur de champ électrique de 100V, la déformation obtenues sur la micro pince est d'environ 76 $\mu$ m. La zone de déformation maximale coïncide avec la position de l'objet à porter situé sur l'extrémité du barreau multicouche.

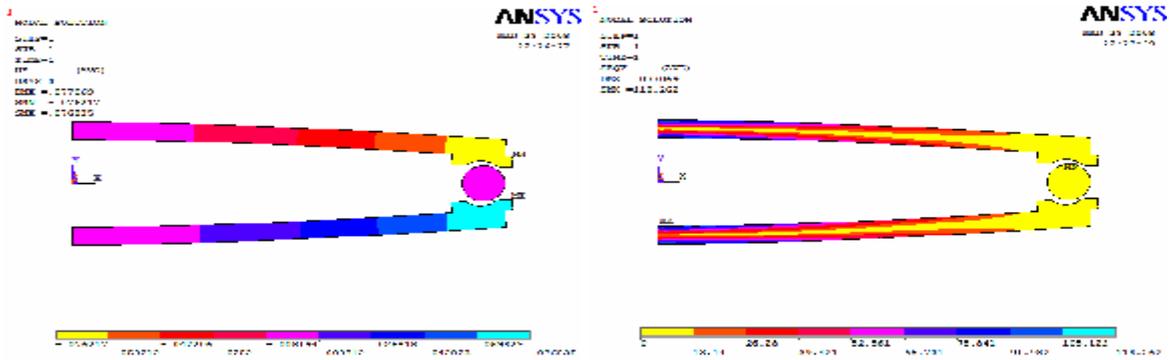


Figure V.9 : Isovaleurs de déplacements et de contraintes de von mises dans une micro pince.

### V.3 Approches pour la conception d'un micro commutateur

#### V.3.1 Les micro commutateurs MEMS

Un commutateur présente généralement deux états : un état passant assurant la transmission du signal et un état bloqué où le signal ne peut pas traverser le composant. Le commutateur idéal se présenterait alors comme un court-circuit (impédance nulle) à l'état passant et comme un circuit ouvert (impédance infinie) à l'état bloqué.

Tout comme les capacités variables, les micros commutateurs MEMS sont généralement constitués d'une structure mobile ou uniquement mécaniquement déformable. On distingue deux principales familles de micro commutateurs MEMS : des commutateurs de type micro poutre à contact latéral (cf.fig.V.10a) et des commutateurs de type micro poutre à contact central (cf.fig.V.10b).

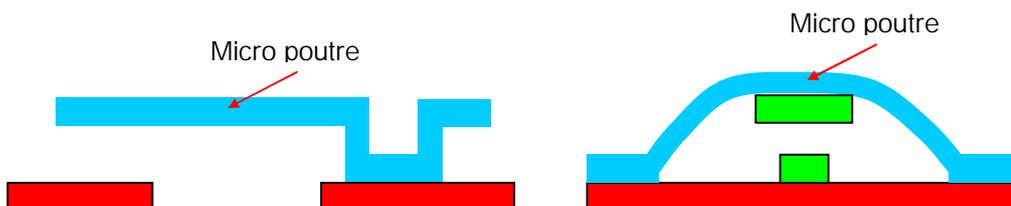
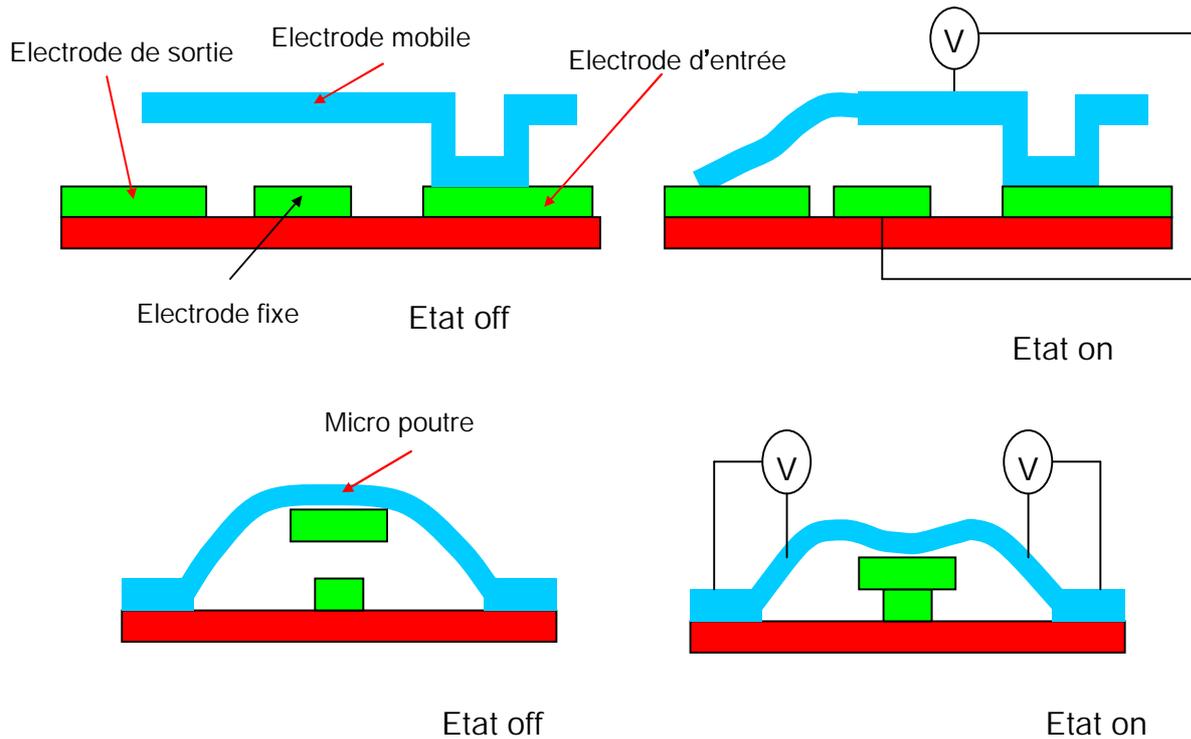


Figure V.10 : Configuration d'un micro commutateur MEMS à base de micro-poutre à (a) contact latéral (b) contact central.

Ces micros commutateurs MEMS sont constitués d'une fine poutre déformable. Lorsqu'elle est contrainte, cette micro poutre peut se défléchir jusqu'au contact d'une électrode généralement disposée sur la surface du substrat. Ainsi, la position de la micro poutre définit l'état passant ou bloqué du commutateur (cf.fig.11).



**Figure V.11 : Mise en œuvre d'un micro commutateur MEMS à base de micro poutre PZT.**

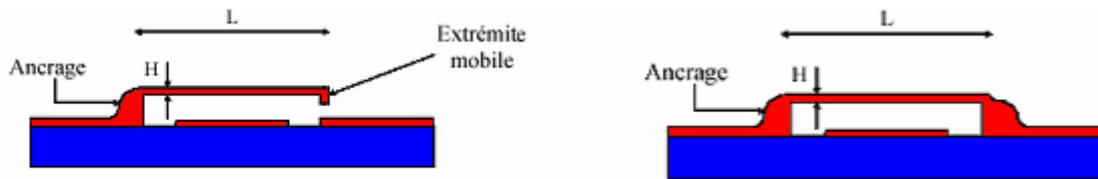
L'actionnement piézoélectrique est fortement utilisé à l'heure actuelle pour actionner des composants MEMS. En effet, une couche piézoélectrique se dilate ou se rétracte sous l'effet d'une différence de potentiel. Cette couche, disposée sur une structure déformable de type micro poutre, peut contraindre celle-ci à se fléchir (cf.fig.V.11). Les tensions de polarisation du piézoélectrique sont généralement de l'ordre de quelques volts et l'amplitude de la déflexion imposée à la structure dépend de l'épaisseur du matériau piézoélectrique utilisé et de ses propriétés.

La dilatation de la couche piézoélectrique étant progressive avec l'augmentation de la tension d'actionnement, la déflexion de la micro poutre peut être continue. En inversant la polarité de la tension appliquée à la couche, celle-ci se rétracte, contraignant ainsi la micro poutre à revenir dans sa position initiale.

### V.3.2 Modélisation électromécanique du micro commutateur

Considérons deux micros commutateurs sous la forme :

- soit d'une micro poutre type cantilever maintenue fixe à une de ses extrémités, tandis que l'autre extrémité sera libre de tout mouvement vertical (cf.fig.V12a) ;
- soit d'une micro poutre maintenue fixe sur les deux extrémités (cf.fig.V.12b). Le cantilever sera suspendu au-dessus d'une électrode d'actionnement fixée sur le substrat. Cette électrode permettra de déformer la micro poutre jusqu'à que son extrémité mobile vienne toucher l'électrode de contact.

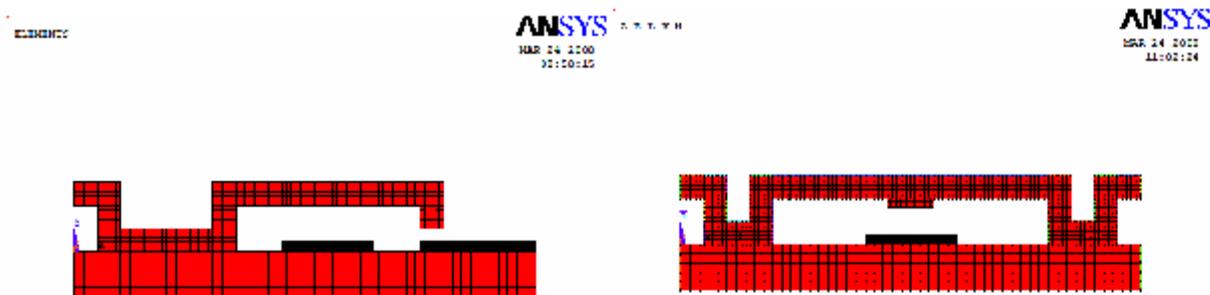


**Figure V.12 : Micro commutateur de longueur  $L$ , de largeur  $W$ , d'épaisseur  $H$  et surélevé de la distance  $h$  du substrat.**

Les micros commutateurs sont composées de différents matériaux, l'aluminium est retenu pour la structure de base et le céramique piézoélectrique de type PZT-5A pour les micros poutres. Les caractéristiques du PZT-5A sont répertoriées dans le Tableau V.1.

Les structures de base étudiées sont : la poutre encastée-libre, appelée aussi cantilever et la poutre bi-encastée, appelée aussi pont (cf.fig.V.12a et b). La section des poutres est rectangulaire, la longueur est  $l$ , la largeur  $w$  et l'épaisseur  $H$ .

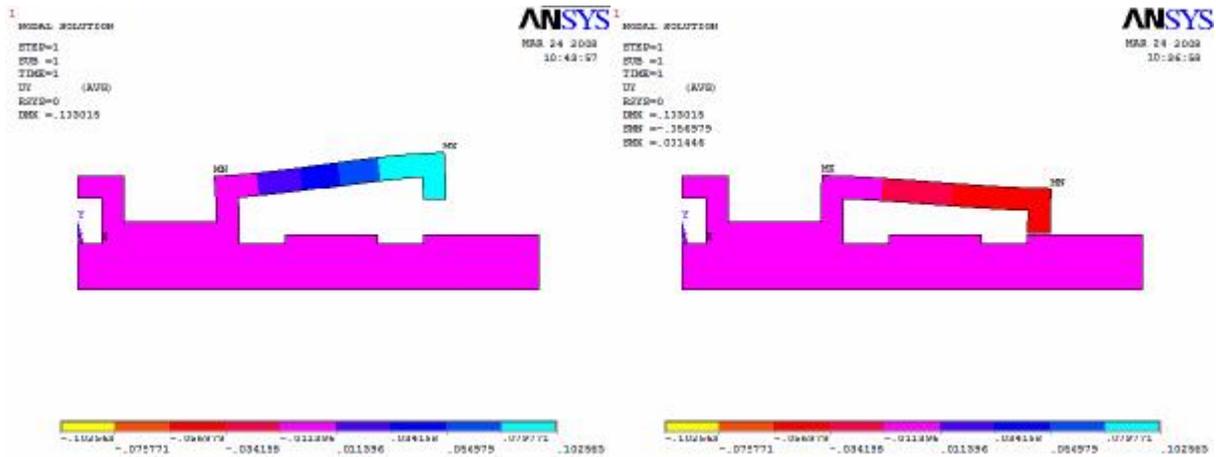
Dans les cas traités dans cette section, nous allons considérer en première approximation que la force électrostatique peut s'assimiler à une force localisée, appliquée soit près de l'extrémité libre du cantilever (cas 1) ou bien assimiler à une force appliquée au centre du pont pour le deuxième cas. Le maillage des deux micros commutateurs est présenté sur la figure V.13.



**Figure V.13 : Modèles éléments finis des micros poutres (a) et micro ponts (b). Détail du maillage par éléments**

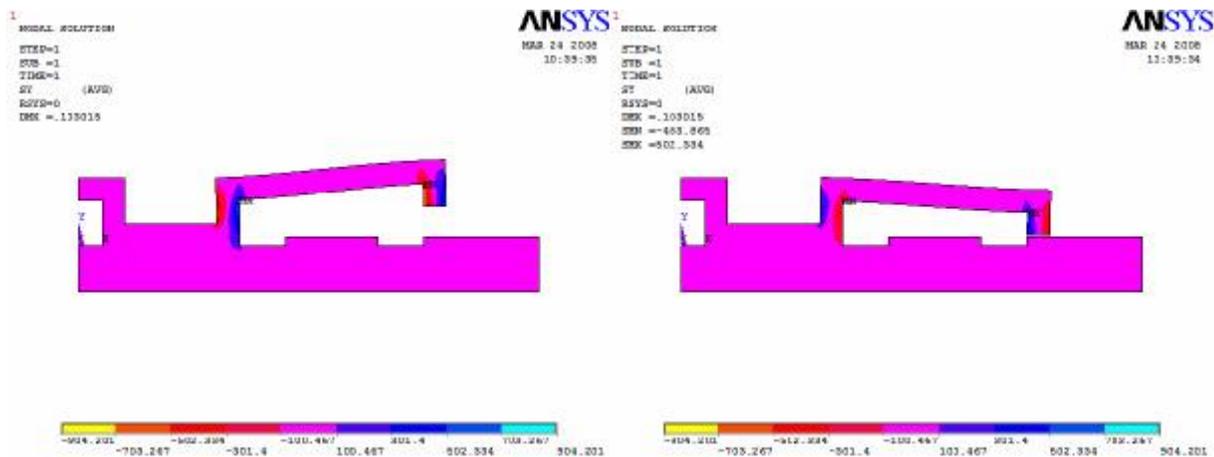
Sur la Figure V.14, on représente des déformées obtenues avec le modèle éléments finis à deux instants différents lors d'une analyse statique du premier micro commutateur (cf.fig.12a).

Ces résultats en termes d'isovaleurs de déplacement ont été obtenus pour une tension appliquée de 100V. Les déformées sont obtenues pour une longueur d'encastement de  $l = 10\text{mm}$  et une épaisseur de  $H=0.5\text{mm}$ . On observe que, effectivement, la flèche maxi est bien localisée à l'extrémité libre de la structure et vaut  $100\mu\text{m}$ . De plus, on peut constater que la déformée de la structure est très correcte avec un bon fonctionnement du micro commutateur.



**Figure V.14 : Simulation par éléments finis de la déflexion d'une poutre cantilever sous une tension de 100V.**

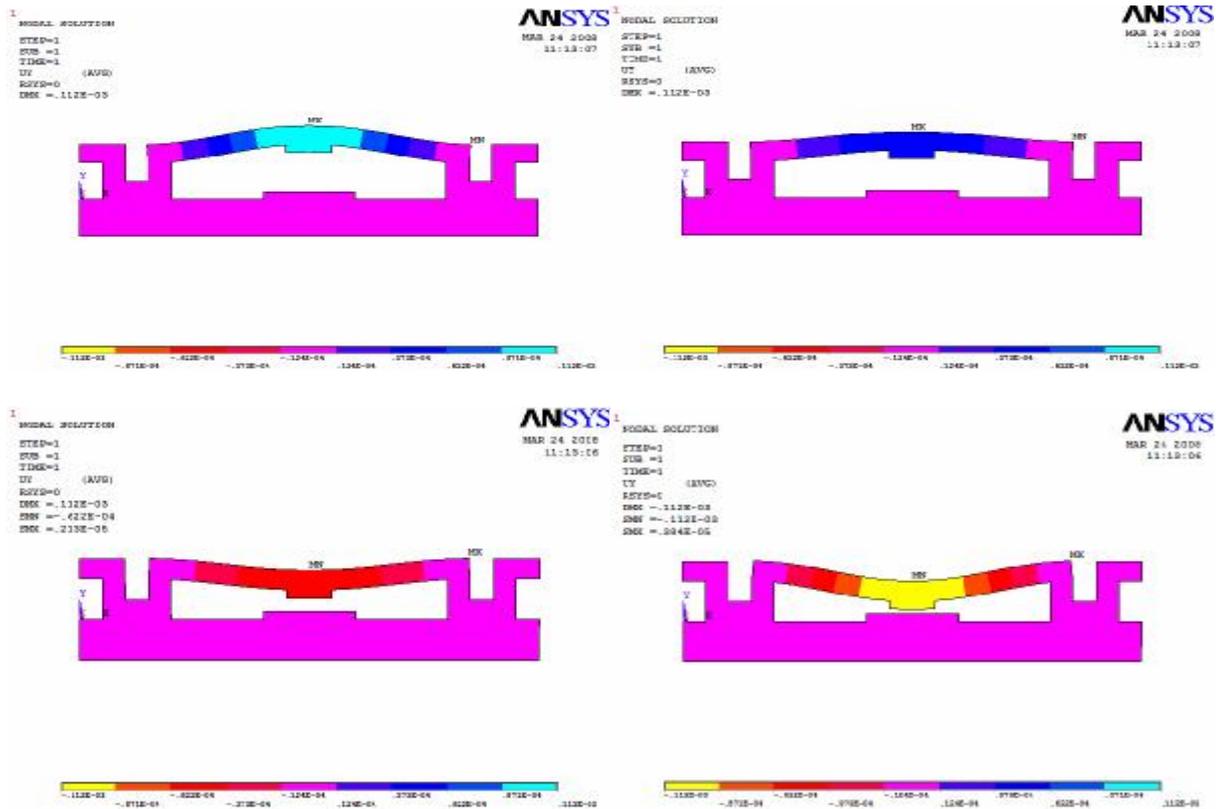
La Figure V.15 montre les valeurs de contrainte de von mises en tout point de la poutre de type cantilever.



**Figure V.15 : Isovaleurs de contraintes de von mises d'une poutre cantilever sous une tension de 100V.**

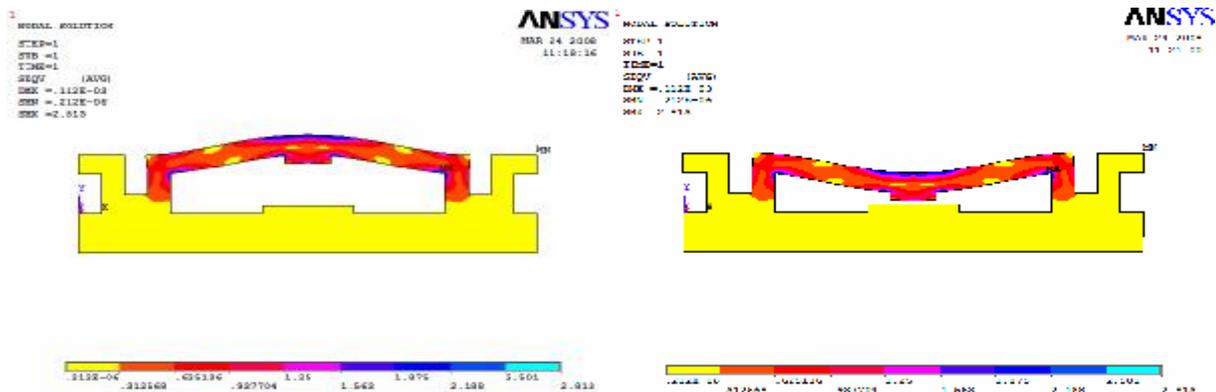
La démarche est similaire à celle présentée précédemment. On considère donc le cas d'une poutre bi-encastree (cf.fig.V12b), où la flèche maxi est calculée au milieu de la poutre. Les paramètres physiques de la poutre restent les mêmes avec  $l=20\text{mm}$ .

Les résultats des simulations sont visibles sur la Figure V.16. A la vue de ces résultats, nous pouvons dire que les simulations donnent des valeurs d'ordre de grandeur différente puisque le déplacement au milieu de la structure est de l'ordre de  $0.1\mu\text{m}$ .



**Figure V.16 : Simulation par éléments finis de la déflexion d'un pont sous l'action d'une tension de 100V.**

La Figure V.17 montre les valeurs de contrainte de von mises en tout point de la deuxième structure de type pont encastré-encastré.

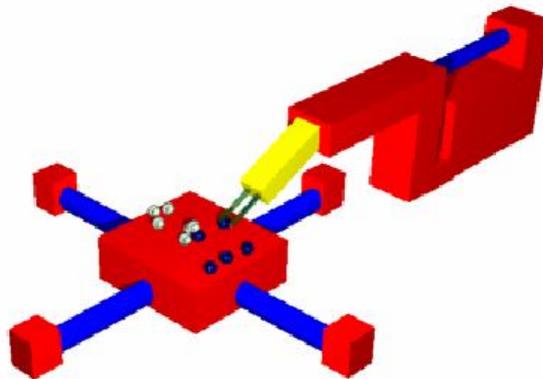


**Figure V.17 : Isovaleurs de contraintes de von mises d'un pont sous l'action d'une tension de 100V.**

## V.4 Conclusion

Le travail mené dans le cadre de ce chapitre propose la conception et la modélisation des systèmes de micromanipulation. Ils sont tous actionnés par effet piézoélectrique. Le premier type utilise des poutres bimorphes piézoélectriques présentés dans le chapitre précédent.

Les poutres PZT permettent d'obtenir des déplacements relativement importants. Ils présentent des caractéristiques très intéressantes pour réaliser des tâches de micromanipulation. Les résultats numériques obtenus montrent que les simulations permettent une bonne estimation de la force appliquée sur les micros objets manipulés et que les résolutions obtenues sont largement compatibles avec les applications de micromanipulation. En effet elle permet d'atteindre des résolutions de positionnement de l'ordre de  $80\mu\text{m}$  et même de quelques nm en fonction du champ électrique appliqué. Cette résolution ouvre des perspectives très intéressantes pour la manipulation de micro objets dans une large gamme de dimensions. A titre d'exemple, la figure V.18 représente une micro pince utilisée pour trier des micros objets.



**Figure V.18 :** Micro cellule de tri.

Le second type exploite le même concept pour réaliser des micros commutateurs. Nous avons étudié deux types d'applications : des commutateurs de type micro poutre à contact latéral et des commutateurs de type micro poutre à contact central. Diverses simulations ont été réalisées. Les modèles décrit de manière suffisamment précise le comportement des structures piézoélectriques et peut être utilisé pour d'autres conceptions.

En ce qui concerne les deux micros commutateurs, les investigations ont montré que même si les micros ponts présentent une plus grande robustesse, leur réponse électromécanique est nettement inférieure à celle des micros poutres pour une même tension appliquée. Nous nous sommes aperçus que les micros poutres présentaient une relative souplesse leur permettant de subir de larges déflexions avant de se briser. Compte tenu de cette constatation, nous proposons d'utiliser ces micros poutres de type cantilever dans des applications de micro connexion.

Les résultats obtenus au cours de ce chapitre sont intéressants pour la suite et ouvrent de nombreuses perspectives. Il reste donc encore du travail à faire sur ces dispositifs, notamment sur leur conceptions, choix des matériaux multifonctionnelles à utiliser, les lois de comportements les plus adaptés et leur réalisations. Enfin, il serait intéressant de généraliser cette modélisation en passant du 2D au 3D.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Les matériaux intelligents piézoélectriques sont devenus incontournables dans de nombreuses applications technologiques modernes dans le domaine de la mécanique, l'aéronautique et la biomécanique. Ces matériaux qui possèdent un effet piézoélectrique inverse, sont couramment utilisés dans le contrôle de forme, du bruit, des vibrations et d'ondes de chocs même à travers le corps humain.

Dans cette étude on s'est intéressé plus particulièrement à la simulation numérique d'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 et à des sollicitations mécaniques simples en tenant compte du couplage électromécanique et en prenant les potentiels électriques comme degrés de liberté supplémentaires. 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 la mesure et le contrôle des vibrations de certaines structures dites adaptatives. Pour valider cette modélisation on a comparé la solution obtenue par la méthode des éléments finis à celle obtenues analytiquement. Il a été observé une très bonne adéquation entre les valeurs obtenues numériquement et la solution analytique.

Vu sa légèreté et son faible encombrement, l'actuateur piézo-laminé est bien adapté pour l'identification ou le contrôle de structures de type plaque. Malgré le caractère distribué de ce type de transducteur, l'ensemble des algorithmes d'identification modale existants reste tout à fait applicable pour l'extraction des paramètres modaux. La configuration actuateur/senseur pseudo col localisé permet également l'identification des masses modales associées à chaque mode propre, ce qui est particulièrement intéressant pour le cas d'une identification d'une structure *'in flight'*. Les paramètres identifiés peuvent ainsi être utilisés pour la construction d'un modèle structural destiné, par exemple, à une application du type contrôle actif.

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 bénéficie 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.

## Conclusion générale

La modélisation électromécanique de ces structures intelligentes par la méthode des éléments finis nous a permis de simuler les déformations dans une plaque carrée en Aluminium soumise à un champ électrique. Ce dernier est obtenu par l'utilisation des transducteurs piézoélectriques PZT qui présentent par exemple la particularité de se déformer sous l'effet d'un champ électrique. L'étude de la déformée des plaques en Al munie d'une pastille PZT est couramment utilisés en aéronautique, contexte dans lequel s'inscrit notre étude. Nous montrons clairement l'effet des propriétés électromécaniques des différents matériaux piézoélectriques, le coefficient piézoélectrique transversal  $d_{31}$  et le coefficient piézoélectrique longitudinal  $d_{33}$  des pastilles PZT sur la réponse finale de la structure intelligente. En restant dans le cadre de la piézoélectricité linéaire, cette recherche a eu pour objectifs de mettre en évidence et d'exploiter l'effet du couplage électromécanique des transducteurs piézo-laminés de la détection d'endommagement structural et du contrôle actif de structure.

Cette modélisation est en général applicable à des structures de forme quelconque tout en intégrant des composants piézoélectriques afin de contrôler leur forme ou leur vibration. Ce qui nous permet dans nos prochains travaux de concevoir une micro pince par l'intermédiaire de deux poutres bimorphes soumises à des champs électriques dans deux sens différents. Les résultats numériques ainsi obtenus montrent que cette simulation permet une bonne estimation de la force appliquée sur les micros objets manipulés et que les valeurs obtenues sont largement compatibles avec les applications aux micromanipulateurs. Par contre, concernant les deux micros commutateurs, les investigations ont montré que même si les micros ponts présentent une plus grande robustesse, leur réponse électromécanique est nettement inférieure à celle des micros poutres pour une même tension appliquée.

En fait, cette étude nous a permis de mettre clairement en évidence le bénéfice d'une recherche pluridisciplinaire dans le domaine des matériaux électro actifs. Cependant, il est important de souligner qu'il reste encore du travail à faire sur ces dispositifs et structures intelligentes, notamment sur leur conception, leur choix des matériaux multifonctionnel à utiliser, leur loi de comportement les plus adaptés et leur réalisation, tout en se reposant sur une approche relativement simplifiée de la physique des phénomènes mis en jeu.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] : **CHRISTOPHE VIGUIER**, Contribution au développement d'actionneurs électroactifs pour l'assistance circulatoire - Application à la mise au point d'une fonction antithrombotique, Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de TOULOUSE, 2005.
- [2] : **A. ENDO, N. SASAKI**, Investigation of frictional material for ultrasonic motors, Jpn. J of Appl. Phys., Vol. 26, pp 197-199, 1987.
- [3] : **GOBIN P. F., ODORICO J.** Matériaux Intelligent ; Lettre des programme interdisciplinaires de recherche du CNRS, PIRMA Novembre 1991.
- [4] : **A. BAZ, S. POH, M. MUTA and J. GILHEANY** 'Active control of Nitinol-reinforced beam', Intelligent structural systems, pp169-212, 1992.
- [5] : **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.
- [6] : **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.
- [7] : Airmar Technology Corporation, [www.airmar.com](http://www.airmar.com), Piezoflex polymer, 2004.
- [8] : Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, [www.physikinstrumente.com](http://www.physikinstrumente.com), Tutprils : electrostrictive actuators, 2005.
- [9] : TRS Ceramics, Inc., [www.trsceramics.com](http://www.trsceramics.com), Electrostrictive ceramics, 1999.
- [10] : **M. Shahinpoor et K. J. Kim**, « Ionic polymer-metal composites : I. fundamentals », Smart Materials and Structures, vol. 10, pp. 819–833, 2001.
- [11] : **M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J. O. Simpson et J. Smith**, « Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review », Smart Materials and Structures, vol. 7, pp. R15–R30, 1998.
- [12] : T. Hao, « Electrorheological fluids », Advanced Materials, vol. 13, no 24, pp. 1847–1857, 2001.
- [13] : W. Khaled, S. Reicling, O. T. Bruhns, M. Baumann, H. Böse, G. J. Monkman, S. gersdorfer, H. Freimuth, A. Tunayar et H. Emert, « Palpation imaging using a haptic sensor actuator system for medical applications », dans Proc. Conf. ACTUATOR 2004, , pp. 379–382, 2004.
- [14] : J. Abadie, Etude et réalisation de micro-actionneurs intégrés à base d'Alliage à Mémoire de Forme - Application à la microrobotique et aux microsystèmes, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2000.
- [15] : G. Guénin, « Alliages à mémoire de forme », Techniques de l'Ingénieur, , no M530, 1996.
- [16] : C. Lebreton, « Alliages à mémoire de forme de type nickel titane », Techniques de l'Ingénieur, no M532, 2004.

- [17] : J. Duval, Conception et mise en oeuvre d'un système d'actionneurs AMF répartis pour le contrôle de forme électroactif de voilures aéronautiques, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [18] : Cedrat Technologies S.A, [www.cedrat.com](http://www.cedrat.com), Magnetostrictive actuators compared to piezoelectric actuators, 2002.
- [19] : F. Claeysen, N. Lhermet, R. Le Letty et P. Bouchilloux, « Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials », J. of Alloys and Compounds, vol. 258, pp. 61–73, 1997.
- [20] : N. Grabham, S. Beeby et N. White, « The formulation and proceeding of a thick-film magnetostrictive material », Measurement Science and Technology, vol. 13, pp. 59–64, 2002.
- [21] : S. Genç et P. P. Phulé, « Rheological properties of magnetorheological fluid », Smart Materials and Structures, vol. 11, pp. 140–146, 2002.
- [22] : T. Butz et O. von Stryk, « Modelling and simulation of electro- and magnetorheological fluid dampers », J. of Applied Mathematics and Mechanics (ZAMM), vol. 82, no 1, pp. 3–20, 2002.
- [23] : M.SANSONETTI, Bertin & Cie
- [24] : CURIE, P., CURIE, J. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémédres à faces inclinées. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences Paris, 1880, Tome 91, 295 p.
- [25] : BURFOOT, J.C and TAYLOR, G.W. Polar diélectrics and their applications. London : Mac Millan press, 1979, 465 p.
- [26] : LAMBECK, P.V and JONKER, G.M. Ferroelectric domain stabilization in BaTiO<sub>3</sub> by bulk ordering of defects. *Ferroelectrics*, 1978, Vol. 22, pp. 729-731.
- [27] : UCHINO, K. (1997) Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors. Kluwer Academic Publishers
- [28] : JAFFE, B., ROTH, R.S., MAZULLO, S. Piezoelectric properties of lead zirconate lead titanate solid solution ceramics. *J. Appl. Phys.*, 1954, vol.25, pp. 809-810.
- [29] : MITSUI, T. Landolt – bornstein : Numerical data and functional relationships in science and technology. Berlin . Spinger Verlag, 1969. Vol. 3, ferro and antiferroelectric substance; p.308
- [30] : JONA, F. SHIRANE, G. ferroelectric crystals. New York : Pergamon press, 1962. Chapter IV, Barium titanate, p. 108-110
- [31] : JAFFE, B. Piezoelectric ceramics. London : Academic Press, 1971. 317 p.
- [32] : C. BACON ET J. POUYET Mécanique des solides déformables Paris : Hermès Science 2000
- [33] : T. Ikeda, Fundamentals of Piezoelectricity, Oxford Science Publications, 1990.

- [34] : **P. Gonnard**, « Moteurs piézoélectriques ultrasonores et actionneurs », Rapport technique, INSA de Lyon, 1991-1992, note de cours.
- [35] : **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.
- [36] : **JAFFE, B., COOK, W., JAFFE, H.** Piezoelectric ceramics. London : Academic Press, 1971. 317 p.
- [37] : **IRE** Standards on Piezoelectric crystals – Measurements of piezoelectric Ceramics, 61 IRE 14. S1. Proceeding of IRE, 1961, vol. 49, n°7, pp. 1161-1169
- [38] : **Ikeda, T.** (1996). Fundamentals of Piezoelectricity. Oxford University Press.
- [39] : **ANSI/IEEE** (1987). IEEE standard on piezoelectricity. An American Standard ANSI/IEEE Std 176-1987.
- [40] : **Saint-Gobain Quartz SAS**, [www.quartz.saint-gobain.com](http://www.quartz.saint-gobain.com), Céramiques piézoélectriques, 2004.
- [41] : **H.S. Lee**, Etude et réalisation de sources acoustiques de puissance en composite piézoélectrique 1-3 pour applications thérapeutiques, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [42] : **R.C. Turner, P.A. Fuierer, R.E. Newnham, T.R. Shroud.** Applied Acoustic, Vol.41, pp. 299-324, 1994
- [43] : **P. Hauptmann, R. Lucklum, A. Puttmer, B. Henning.** Sensors and Actuators, pp. 32-48, 67, 1998.
- [44] : **J. Krautkramer, H. Krautkramer.** Ultrasoning Testing of Materials, Springer-Verlang, Berlino, 1977.
- [45] : **J.R. Davis.** Non destructive evaluation and quality control, Vol.17, ASM, Metals Park, 1992
- [46] : **B. Nogarede**, Moteurs piézoélectriques. Techniques de l'Ingénieur, D 3765, 1996.
- [47] : **T. Gururaja et R. K. Panda**, Current status and future trends in ultrasonic transducers for medical imaging applications, dans Proc. IEEE Applications of Ferroelectrics, , pp. 223–228, 1998.
- [48] : **R. Goldberg, S. Smith et K. Mottley, J.G. an Ferrara**, Ultrasound, dans The Biomedical Engineering Handbook, J. D. Bronzino rédacteur , chapitre 65, CRC Press LLC, 2e édition, 2000.
- [49] : **P. Wells**, Ultrasonic imaging of the human body, Reports on Progress in Physics, vol. 62, no 5, pp. 671–722, 1999.
- [50] : **E. Brunner**, Ultrasound system considerations and their impact on front-end components, Rapport technique, Analog Devices, Inc., 2002.

- [51] : **W. T. Ang, C. N. Rivier et P. K. Khosla**, Design and implementation of active error canceling in hand-held microsurgical instrument, dans Proc. IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 1106–1111, 2001.
- [52] : Morgan Electro Ceramics, [www.morganelectroceramics.com](http://www.morganelectroceramics.com), Piezoelectric electroceramics: table of properties, 2005.
- [53] : **A. Renotte, J. Duval et B. Nogarède**, **Electroactive wing** : towards novel actuation concepts, dans Proc. Conf. ACTUATOR 2004, pp. 190–193, 2004.
- [54] : **T. Ikeda**, Fundamentals of piezoelectricity. Oxford Science Publication, Oxford, 1990.
- [55] : **L. LongTu**, Piezoelectric ceramic transformer, Ferroelectrics, Vol.28, p.403, 1980.
- [56] : **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.
- [57] : **L. LongTu**, Piezoelectric ceramic transformer, Ferroelectrics, Vol.28, p.403, 1980.
- [58] : **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.
- [59] : **B. Nogarède**, Moteurs piézoélectriques, Techniques de l'Ingénieur, N° D3765, 2000.
- [60] : **IEEE-Standard**. Ieee standard on piezoelectricity. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1978.
- [61] : **J. G. Smits and W. S. Choi**. Equations of state including the thermal domain of piezoelectric and pyroelectric heterogeneous bimorph. Ferroelectrics, Vol. 141, pp. 271–276, 1993.
- [62] : **N. N. Rogacheva, C. C. Chou, and S. H. Chang**. Electromechanical analysis of a symmetric piezoelectrical/elastic laminate structure: theory and experiment. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 45(2), March 1998.
- [63] : **S. H. Chang and C. C. Chou**. Electromechanical analysis of an asymmetric piezoelectrical/elastic laminate structure : theory and experiment. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 46(2), March 1999.
- [64] : **M. S. Weinberg**. Working equations for piezoelectric actuators and sensors. IEEE ASME, Journal of MEMS, 8(4), 1999.
- [65] : **M. Géradin and D. Rixen**. Théorie des vibrations. Masson, Paris, 1993.
- [66] : **J. Courbon**. Plaques minces élastiques. Editions Eyrolles, Paris, 1980.
- [67] : **F. Galiano**. Conception, modélisation théorique et caractérisation des moteurs piézoélectriques mono et multi-degrés de liberté : applications à la microrobotique et aux micromachines. PhD thesis, LEEI de Toulouse, ENSEEIHT, novembre 2000. N°536.

- [68] : **C. Giraud-Audine**. Contribution à la modélisation analytique d'actionneurs piézoélectriques en vue de leur conception et dimensionnement. PhD thesis, LEEI de Toulouse, ENSEEIHT, décembre 1998. N° 1501.
- [69] **C. Giraud-Audine**, Contribution à la modélisation analytique d'actionneurs piézoélectriques en vue de leur conception et dimensionnement. PhD thesis, LEEI de Toulouse, ENSEEIHT, décembre 1998. N°1510.
- [70] : **Tiersten, H. F. Hamilton's** principle for linear piezoelectric media, Proceedings Letters of the IEEE Journal, 1967, pp. 1523-1524.
- [71] : **Eer Nisse, E. P.** On variational techniques for piezoelectric device analysis, Proceedings Letters of the IEEE Journal, 1967, pp. 1524-1525.
- [72] : **Yu, Y.-Y.** Vibration of Elastic Plate : Linear and Nonlinear Dynamical Modeling of Sandwiches, Laminated Composites, and Piezoelectric Layers, 1996, New-York, Springer-Verlag.
- [73] : ANSYS 6.1 MULTIPHYSICS electronic manual
- [74] : **J. Agnus and N. Chaillet**. Dispositif de commande d'un actionneur piézoélectrique et Scanner muni de ceux-ci. INPI, patent, N°FR 03000532, 2003.
- [75] : **J.L FANCHON** "Guide de la mécanique" Edition Nathan, 1998
- [76] : **R.J ROARK, W.C YOUNG** "Formulas for Stress and Strain" New York: McGraw-Hill 6th edition, 1989

Annexe 1  
Equation de la déflexion d'un cantilever soumis à  
une force localisée

Pour établir l'équation donnant la déflexion du cantilever en fonction de l'intensité de la force appliquée, nous utilisons la méthode de double intégration de l'équation des moments fléchissant. Dans le cas d'une poutre sollicitée en flexion, la théorie des poutres montre que le moment fléchissant résultant  $M_f$ , calculé en un point quelconque de la ligne moyenne d'une poutre, s'exprime en fonction de la dérivée seconde de la déflexion  $z(x)$  sous la forme suivante.

$$M_f = E.L. \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$$

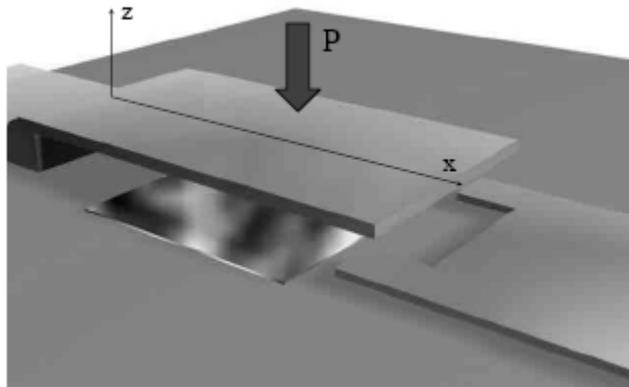


Figure A1 - 1: Structure type cantilever

Par double intégration de cette équation sur la longueur de la poutre, on obtient l'expression de la déflexion  $z(x)$  sous l'action de la force appliquée:

$$y(x) = \iint \left( \frac{M_f}{E.L} dx \right) dx + Cte_1 x + Cte_2$$

Où  $E$  représente le module de Young du matériau constituant la poutre,  $I$  le moment quadratique de la section droite de la poutre et  $Cte_1$  et  $Cte_2$  les constantes d'intégration qui seront déterminées à partir des conditions aux limites imposées par les appuis du cantilever (ici son point d'ancrage).

Le moment quadratique dépend essentiellement de la géométrie de la structure et est défini sous la forme suivante:

$$I = \iint_S y^2 ds$$

Où  $S$  est l'aire de la section de droite. Dans le cas d'une poutre à section rectangulaire, en intégrant sur  $S$  on obtient:

$$I = W \int y^2 dy = \left. \frac{W \cdot y^3}{3} \right|_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} = \frac{Wh}{12}$$

Nous souhaitons obtenir l'équation de la déflexion d'un cantilever de longueur  $L$ , soumis à une force  $\vec{p}$  appliquée à une distance  $a$  du point d'ancrage (cf. Figure A1 - 2). L'ancrage du cantilever au point A se modélise par une condition d'encastrement. Cette condition impose l'invariabilité de la section de la membrane encastrée: au point d'ancrage on aura

$$Y(x_A) = 0 \quad \text{et} \quad \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=x_A} = 0$$

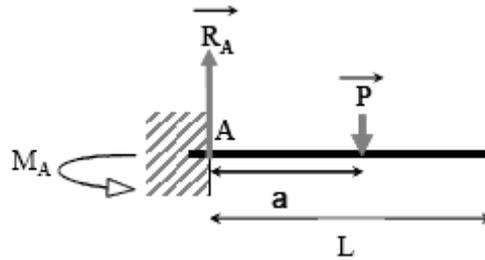


Figure A1 - 2: Cantilever soumis à une force localisée

La condition d'encastrement suppose également que le cantilever est supporté par son ancrage. Lorsque la membrane va être sollicitée en flexion, il va exercer une contre réaction se modélisant par un effort tranchant  $\vec{R}_A$  associé à un moment résultant  $\vec{M}_A$  pris par rapport au point d'appui (cf. Figure A1 - 2). L'expression du moment fléchissant, calculé en n'importe quel point  $x$  du cantilever, est donnée par :

$$M_f(x) = R_A \cdot x - P \langle x - a \rangle^1 - M_A$$

Où  $\langle x - a \rangle^1$  représente la fonction de singularité d'ordre 1 en  $x = a$ . Cette fonction est ici utilisée pour décrire la discontinuité du moment fléchissant en  $x = a$ . La fonction de singularité d'ordre  $n$   $f_n(x)$  prise par rapport au point  $a$ , se définit pour  $n \geq 0$  par:

$$f_n(x) = \langle x - a \rangle^n$$

Avec

$$\begin{cases} f_n(x) = \langle x - a \rangle^n & \text{lorsque } x \geq a \\ f_n(x) = 0 & \text{lorsque } x < a \\ \int_{-\infty}^x \langle x - a \rangle^n dx = \frac{\langle x - a \rangle^{n+1}}{n + 1} \end{cases}$$

L'application du principe fondamental de la statique [73] impose que la somme des forces ainsi que la somme des moments appliqués au cantilever soient nulles:

$$\begin{cases} P - R_A = 0 \\ M_A - R_A.L + P.(L - a) = 0 \end{cases}$$

On déduit alors que  $P = R_A$  et  $M_A = P.a$ . Le moment fléchissant se réduit ainsi à:

$$M_f(x) = P.x - P \langle x - a \rangle^1 - Pa$$

A partir de cette expression du moment fléchissant, l'équation A1- 1 est alors intégrée, permettant ainsi d'obtenir l'équation régissant la déflexion du cantilever.

$$E.IY(x) = P.\frac{x^3}{6} - P.\frac{\langle x - a \rangle^3}{6} - P.a.\frac{x^2}{2} + Cte_1 + Cte_2$$

Les propriétés de l'ancrage en A ( $x = 0$ ) imposent que les constantes d'intégration  $Cte_1$  et  $Cte_2$  soient nulles. L'équation mécanique régissant la déflexion du cantilever soumis à une force de flexion localisée en un point  $x = a$ , s'exprime alors sous la forme.

$$\text{➤ Pour } 0 < x < a \quad y(x) = -\frac{P.x^4}{6.E.I} [3.a - x]$$

$$\text{➤ Pour } a < x < L \quad y(x) = -\frac{P.a^3}{6.E.I} [3.x - a]$$

Cette méthode de l'intégration de l'équation des moments fléchissant peut se généraliser à d'autres géométries de structures soumises à d'autres formes de sollicitations (force uniformément répartie ou plusieurs forces appliquées....). D'autres configurations sont développées plus amplement par R.J Roark et W.C Young dans [74].

## Annexe 2

### 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  $\rho$  (en kg/m<sup>3</sup>), le module de Young  $E$  (en GPa) et le coefficient de Poisson  $\nu$ . Le seul paramètre électrique à définir est la matrice des permittivités relatives  $[\epsilon]$  (en F/m). Enfin, les caractéristiques piézoélectriques traitées par ANSYS correspondent aux paramètres définis dans l'équation A.3 de l'Annexe A, soit la matrice de rigidité à déformation constante  $[c^E]$  (en N/m<sup>2</sup>) et la matrice des constantes piézoélectriques  $[e]$  (en C/m<sup>2</sup>).

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

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

Avec  $\sigma$  : vecteur de contrainte,  $d$  : vecteur d'intensité électrique,  $\epsilon$  : vecteur de déformation,  $C^E$  : matrice d'élasticité,  $e$  : matrice piézoélectrique et  $\epsilon^e$  : matrice de permittivité.

D'après l'équation (A.1) les matrices des composantes élastiques et piézoélectriques pour quelques matériaux utilisés dans notre simulation numérique.

Monocristal PMN-0.25PT

37.5	-18.9	-15.7	0	0	0	0	0	-386
-18.9	37.5	-15.7	0	0	0	0	0	-386
-15.7	-15.7	35.3	0	0	0	0	0	843
0	0	0	15.3	0	0	0	152	0
0	0	0	0	15.3	0	152	0	0
0	0	0	0	0	17.4	0	0	0
0	0	0	0	152	0	1.41	0	0
0	0	0	152	0	0	0	1.41	0
-386	-386	843	0	0	0	0	0	2.86

<b>11.9</b>	<b>-3.55</b>	<b>-5.02</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-100</b>
<b>-3.55</b>	<b>11.9</b>	<b>-5.02</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-100</b>
<b>-5.02</b>	<b>-5.02</b>	<b>13.78</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>247</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>33.4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>249</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>33.4</b>	<b>0</b>	<b>249</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30.9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>249</b>	<b>0</b>	<b>1.15</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>249</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.15</b>	<b>0</b>
<b>-100</b>	<b>-100</b>	<b>247</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.73</b>

## Monocrystal PMN-0.40PT

<b>13.1</b>	<b>-1</b>	<b>-6.94</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-128</b>
<b>-1</b>	<b>13.1</b>	<b>-6.94</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-128</b>
<b>-6.94</b>	<b>-6.94</b>	<b>16.14</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>272</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>22.9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>371</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>22.9</b>	<b>0</b>	<b>371</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>16.9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>371</b>	<b>0</b>	<b>2.58</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>371</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.58</b>	<b>0</b>
<b>-128</b>	<b>-128</b>	<b>272</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.99</b>

Caractéristiques de la plaque d'aluminium et les transducteurs piézoélectriques.

<b>Matériau</b>	<b>Plaque Aluminium</b>	<b>Actionneur PZT</b>
Longueur (l)	36mm	10mm
Largeur (b)	36mm	10mm
Epaisseur (h)	1mm	0.5mm
Module d'Young (E)	69GPa	-
Coefficient de Poisson ( $\nu$ )	0.3	0.3
Densité ( $\rho$ )	2700	7700-8070

Propriétés mécaniques et piézoélectriques du PZT

<b>Matériau</b>	<b>PZT-189p</b>
Module d'Young (E)	$2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Module de cisaillement (G)	$0,75 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Coefficient de Poisson ( $\nu$ )	0,29
Coefficient piézoélectrique ( $d_{31}$ )	$2,5 \cdot 10^{-11} \text{ C/N}$
Coefficient piézoélectrique ( $d_{32}$ )	$0,3 \cdot 10^{-11} \text{ C/N}$
Coefficient piézoélectrique ( $d_{33}$ )	$3,6 \cdot 10^{-11} \text{ C/N}$

## Résumé

Les matériaux orthotropes « intelligents » ont connus une évolution importante dans le domaine scientifique du génie mécanique, de l'aéronautique et même dans la biomécanique. Le but de ce travail est d'analyser et d'optimiser le comportement mécanique d'un matériau multifonctionnel de type piézoélectrique intelligent capable de détecter des faibles déformations afin de déterminer les contraintes dans des corps sous l'effet des efforts extérieurs utilisant la théorie de l'élasticité des matériaux orthotropes. Aussi une simulation numérique de la structure intelligente par la méthode des éléments finis a été considérée.

Cette analyse nous permet de simuler les déformations dans une poutre céramique piézoélectrique soumise à un champ électrique et à des sollicitations mécaniques simples en tenant compte du couplage électromécanique et en prenant les potentiels électriques comme degrés de liberté supplémentaires. L'intérêt de la modélisation numérique permet d'analyser comparativement la conception et l'optimisation des éléments piézoélectriques qui sont utilisés pour déterminer et contrôler les vibrations et les déformations de certaines structures dites adaptatives. Pour valider cette modélisation on a comparé la solution obtenue par la méthode des éléments finis et celle obtenues analytiquement et il a été constaté qu'une bonne adéquation des résultats par les deux méthodes a été obtenue.

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

## Abstract

The orthotropic "intelligent" materials knew significant scientific evolutions in the field of the mechanical engineering, aeronautics and even in biomechanics. The goal of this work is to analyze and optimize the mechanical behavior of a multipurpose piezoelectric material of type intelligent capable of detecting the weak deformations in order to determine the stresses in bodies under the effect of the external efforts using the theory of elasticity of orthotropic materials. Also a digital numerical simulation of the intelligent structure using the finite element method has been considered.

This analysis allows us to simulate the deformations in a piezoelectric ceramic beam subjected to an electric field and simple mechanical requests by taking into account the electromechanical coupling and by taking the electric potentials like additional degrees of freedom. The numerical modeling interest allows to analyzing comparatively the design and the optimization of the piezoelectric elements which are used to determine and controls the vibrations and the deformations of some structures known as adaptive. In order to validate this modeling we have compared the solution obtained by the finite element method and this obtained analytically and it has been noted that a good adequacy of the results using the two methods was obtained.

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

## ملخص:

إن المواد المركبة "الذكية" عرفت تقدماً مهماً في المجال العلمي للهندسة الميكانيكية، للملاحة الجوية وكذلك الميكانيك العضوية. الهدف من هذا العمل هو التحليل الأمثل للتصرف الميكانيكي للمادة متعددة الوظائف من نوع الكهربية الضغطية الذكية، القادرة على كشف أضعف التشوهات لأجل تعيين الإجهادات في الأجسام تحت تأثير التأثيرات الخارجية وهذا بإستعمال نظرية المرونة للمواد المركبة و كذا التظاهرة الرقمية للبنية الذكية مع إعتبار طريقة العناصر المحدودة. يسمح لنا هذا التحليل بتظاهر التشوهات في الرافدة الكهربية الضغطية الصينية تحت تأثير حقل كهربائي و تأثيرات ميكانيكية بسيطة ، مع إعتبار التزاوج الكهروميكانيكي و أخذ الكمونات الكهربية كدرجات حرية إضافية . النمذجة العددية تسمح للتحليل والتصميم الأمثل لعناصر الليزو كهربائي التي تستخدم لتحديد ومراقبة الاهتزازات والتشوهات من بعض الهياكل المعروفة باسم التكيفيه. من أجل اثبات صحة هذه النماذج بمقارنة الحل الذي حصلنا عليه بطريقة العناصر المحدودة مع الذي حصل عليه بالطريقة التحليلية ولقد لوحظ تكافؤ جيد بين النتائج باستخدام هذين الطريقتين.

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