

Choix d'un actionneur adapté à notre micropince

2.1 Introduction

De nos jours, divers fabricants proposent des systèmes de micropositionnement disposant de bonnes caractéristiques (notamment une résolution submicrométrique). En revanche, comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, peu de micropinces sont disponibles sur le marché.

Nous avons recensé déjà un grand nombre de prototypes issus de laboratoires mais nous constatons toujours un fort engouement de la communauté scientifique pour le domaine des micropinces. Un engouement justifié car le domaine de la micropréhension est loin d'être tari et les besoins sont grandissants. En effet, la micromanipulation, c'est à dire la manipulation d'objets de dimensions variant de $1\mu\text{m}$ à 1mm , et le micro-assemblage concernent de nombreux secteurs. Parmi ces domaines, nous pouvons citer :

- *l'assemblage* de pièces micromécaniques rigides comme par exemple des micro-roues dentées, des microlentilles optiques, des micro-composants pour la réalisation de circuits hybrides, etc...
- *la manipulation d'échantillons* dans le but de les tester ou les caractériser. En effet, des pièces de très petite taille réalisées par des procédés microtechniques (pour l'industrie horlogère notamment) ne présentent pas forcément les mêmes caractéristiques que leurs homologues obtenues par des procédés plus traditionnels sous une forme massive. Lors de la fabrication de pièces microtechniques, il est alors nécessaire de réaliser des essais sur le même substrat (par exemple des tests de nanoscratching¹ ou de nano-indentation²) afin de caractériser le matériau ainsi élaboré ;

1. Le nanoscratching est une méthode de caractérisation des paramètres d'un matériau qui consiste à analyser des rayures réalisées en surface de la matière au moyen d'un nanolevier.

2. La nano-indentation est une méthode de caractérisation analogue à la précédente à la différence que c'est un "poinçon" qui marque le matériau avec une force contrôlée.

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

Un des points communs entre ces exemples d'application est sans nul doute la nécessité de contrôler les forces de serrage. En effet, il n'est pas concevable que les outils de préhension détériorent les pièces destinées à un assemblage ; ou encore, il n'est pas imaginable de déformer un échantillon micrométrique, donc fragile, avant d'être caractérisé. Pis encore, il n'est pas envisageable d'endommager une cellule vivante lors de sa manipulation. Enfin, plus généralement, le téléopérateur a besoin des informations de force pour ressentir les efforts appliqués.

2.1.1 Fonctionnalités d'un micropréhenseur

Un micropréhenseur regroupe un ensemble de fonctionnalités plus ou moins complexes, que l'on peut résumer par le schéma de la figure 2.1. Cette représentation est l'un des résultats d'un consortium allemand composé d'utilisateurs, de fabricants et d'institutions de recherche issus du projet "Gripper Construction Kit" (Gengenbach 2001). Sur ce modèle, nous pouvons distinguer quatre blocs fonctionnels :

- *Les modules fonctionnels*, lesquels regroupent les actionneurs, les organes terminaux et les modules du type éjection ou aide à la dépose d'objets, etc... Les actionneurs génèrent les forces et assurent les mouvements de la micropinçe tandis que les organes terminaux, c'est à dire les pièces disposées en bout de la pinçe, sont étudiées pour venir en contact avec les objets à manipuler ;
- *Les capteurs* : ils sont utiles à la mesure des interactions entre la micropinçe et les pièces à manipuler ainsi qu'entre la micropinçe et son environnement. Parmi les mesurandes possibles, nous pouvons citer la mesure de force qui permet de connaître, de ressentir ou de limiter la force exercée sur l'objet manipulé. Les mesures de position extéroceptives (caméra) et proprioceptives (microcapteurs intégrés) peuvent quant à elles être utilisées pour mesurer la position des pièces à saisir ou encore la position relative de la pinçe par rapport à un référentiel. Enfin, la détection de présence est une information importante pour être certain que l'objet soit réellement pris ;
- *Le traitement du signal* : selon les capteurs et actionneurs embarqués, plusieurs composants peuvent être intégrés dans la micropinçe. En particulier, l'électronique

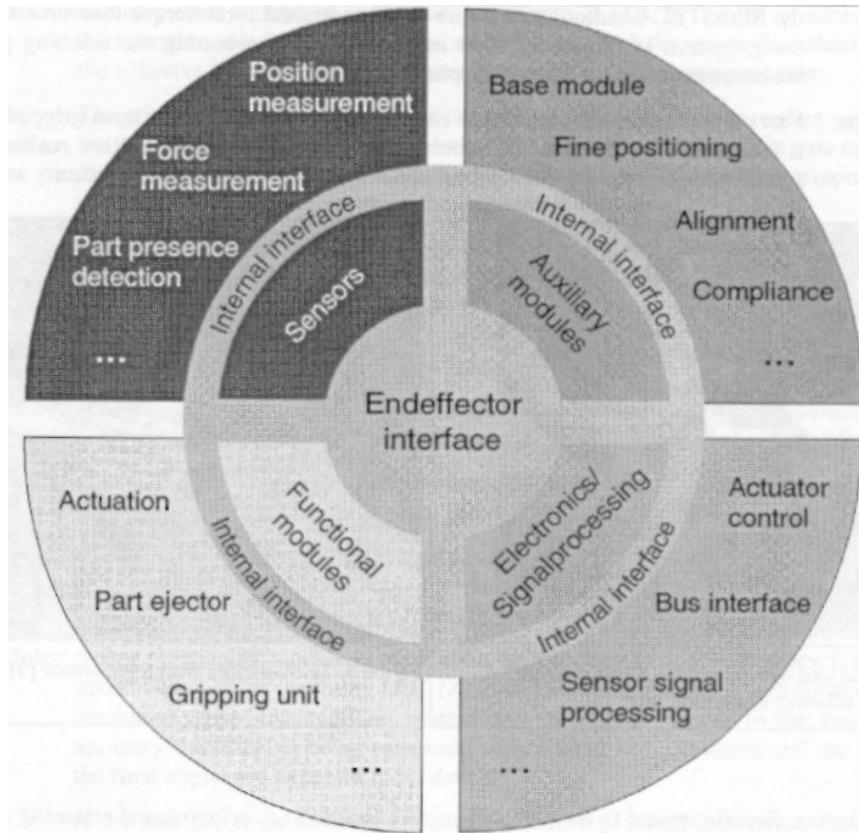


FIG. 2.1 – Schéma des fonctionnalités d'un micropréhenseur selon Gengenbach (2001)

de conditionnement, de conversion et de traitement des informations provenant des capteurs, l'électronique de commande des actionneurs (par exemple, les amplificateurs hautes tensions pour les actionneurs piézoélectriques) mais aussi l'électronique de communication (bus d'interface) afin de limiter le nombre de liaisons électriques par câble et éviter les problèmes de transmission d'un signal analogique ;

- *Les modules auxiliaires* : ce sont tous les modules qui ne sont pas directement liés à la fonction de préhension mais plutôt à des fins d'ajustement de la micropince par rapport à son système de maintien ou à la cible. Par exemple, un module d'alignement peut être mis en œuvre pour ajuster l'alignement et l'orientation par rapport au système de coordonnées de l'espace de travail. Un module de positionnement fin peut être utile lorsque la précision du robot porteur n'est pas suffisante. Un tel module peut correspondre à un petit manipulateur offrant une faible course et une résolution élevée. Un module de compliance (active ou passive) peut avoir tout son sens lors des phases d'insertion. Dans le cas d'une compliance active, le système mesure la force de contact du robot sur son environnement et opère

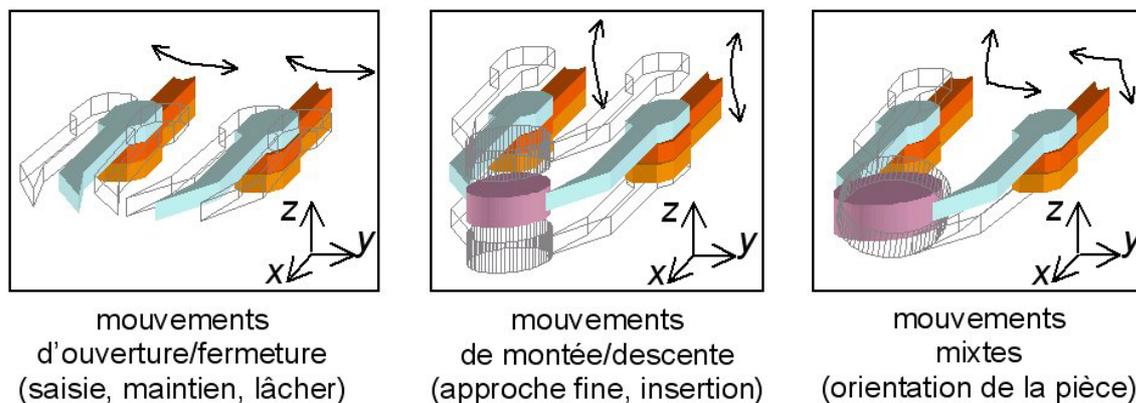


FIG. 2.2 – Mobilités envisagées des doigts d'une micropince

un mouvement dans le sens opposé. Ces mouvements peuvent parfaitement être exécutés par le module de positionnement fin évoqué dans les lignes précédentes. Une compliance passive utilise une déformation élastique pour réduire la force de contact en modifiant la position de la pince sans actionnement externe.

A ce stade de l'étude, il serait illusoire d'imaginer un micropréhenseur disposant de toutes les fonctionnalités présentées ci-avant. Dans la suite de ce travail, nous allons plutôt porter nos efforts sur le "module fonctionnel" d'une micropince à deux doigts de serrage, en particulier les actionneurs qui la composent, la structure de ces derniers et les organes terminaux utiles à la réalisation de tâches de micromanipulation.

2.1.2 Caractéristiques envisagées de notre micropince

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

- *les degrés de liberté* : les réalisations existantes offrent souvent un seul et unique degré de liberté, à savoir l'ouverture/fermeture simultanée des deux doigts de serrage (figure 2.2, dessin de gauche). Sur d'autres modèles, l'ouverture/fermeture de chacun des doigts peut être commandée indépendamment. Cette configuration est intéressante car elle permet de corriger localement un défaut de centrage de la pince par rapport à l'objet. Nous pouvons imaginer le scénario suivant : lorsqu'un premier doigt est en contact avec l'objet, il s'arrête ; le second doigt quant à lui continue son mouvement jusqu'à la saisie complète de l'objet. Aucune contrainte indésirable n'est alors soumise à l'objet ou aux doigts. Nous retenons pour notre étude le principe d'une telle micropince.

Aussi, nous pensons aller encore plus loin dans les mobilités des doigts d'une pince. Il nous semble en effet intéressant de disposer également de mouvements indépendants de montée/descente des doigts. Utilisés conjointement, cela permettrait

par exemple à la pince de réaliser une opération d'insertion (figure 2.2, dessin au centre). Commandés de manière antagoniste, il serait alors possible d'orienter un objet entre les mors de la pince (figure 2.2, dessin de droite) et, accessoirement, d'ajuster également un éventuel défaut d'alignement des doigts ;

- *les courses* : la manipulation des objets de dimensions supérieures au millimètre s'accommodent parfaitement des techniques déjà disponibles. Le cas des objets de dimensions inférieures à la dizaine de micromètres relève davantage des technologies dérivées de la microscopie à champ proche. Notre champ d'investigation concerne donc la manipulation d'objets de dimensions comprises entre la dizaine de micromètres et le millimètre.

Les courses d'ouverture et de fermeture ainsi que de montée et de descente doivent par conséquent atteindre plusieurs centaines de micromètres ;

- *les forces* : à ce stade de l'étude, elles sont difficiles à chiffrer tant les limites et les plages utiles sont différentes d'une application à une autre. Pour ne citer qu'un exemple, en médecine ou en biologie, certaines cellules vivantes ne supportent pas des forces supérieures à quelques dizaines de nano-Newton (Suzuki 1996, l'auteur chiffre la déformation d'un oeuf de poisson de $100\ \mu\text{m}$ à 80% de sa taille initiale avec une force de 30 nN).

Nous pouvons cependant estimer la force maximale nécessaire à la micromanipulation d'objets rigides de taille submillimétrique. Pour cela, considérons le cas extrême qui, dans le cadre de notre étude, correspond à un objet de 1mm de côté et de forte densité³, de l'ordre de 20 par exemple. Avec une hypothèse basse d'un coefficient de frottement de 0,1 entre les mors de la pince et l'objet, nous aboutissons à une force de serrage de 2 mN environ pour assurer le maintien statique de cet objet soumis à la gravité.

Ce chiffre est intéressant puisqu'il laisse sous-entendre qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'une force de serrage importante pour des pinces destinées à des tâches lentes de micromanipulation unitaire. Cette force doit être cependant considérée comme un ordre de grandeur. Des opérations comme par exemple la prise-dépose rapide de microcomposants nécessitent en revanche des forces plus importantes : en effet, les robots industriels affichent de nos jours des accélérations pouvant atteindre $10\ \text{g}^4$ conduisant, pour notre cube de 1 mm de côté, à des forces de serrage nécessaires de près de 20 mN. Enfin, des tâches de microassemblage peuvent requérir des forces plus importantes encore.

Ainsi, nous retenons une force de serrage de plusieurs dizaines de milli-Newton pour notre micropince.

- *la résolution* : l'objectif de manipuler des objets de quelques dizaines de micromètres pour les plus petits d'entre eux nous conduit à une résolution de positionnement submicronique ;

3. A titre d'exemple, la densité de l'acier est de 8 environ ; celle de l'or est de 19,32 et enfin, elle peut atteindre 22,5 pour l'iridium.

4. Caractéristique du robot IRB340 de la société ABB (www.abb.com/robotics).

TAB. 2.1 – *Comparaison de plusieurs principes d'actionnement d'après Kornbluh (1998) (sauf AMF)*

type d'actionneur	déformation (%)	densité d'énergie ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$)	rendement (%)	vitesse
thermique (<i>aluminium</i>)	1	0,4	<10	lente
AMF ^a (<i>nickel-titane</i>)	6 à 8	>10	<1	lente
piézoélectrique (<i>céramique PZT</i>)	0,2	0,1	>90	rapide
magnétostriction (<i>terfenol-D</i>)	0,2	0,025	60	rapide
électrostriction (<i>silicone</i>)	32	0,034	90	rapide
électrostatique	50	0,0015	>90	rapide
électromagnétique	50	0,025	>90	rapide
muscle naturel	>40	0,07	>35	moyenne

^a d'après Benzaoui (1998)

- *La bande passante* : des progrès sensibles ont été réalisés dans le monde des robots. L'avènement de robots très rapides, fondés sur des structures parallèles (Delta par exemple), permettent des cadences élevées, 150 coups/min (Caractéristique du robot IRB340 de la société *ABB*), que les systèmes de préhension peinent à suivre. Une bande passante de plusieurs centaines de Hertz nous semble nécessaire ;
- *les dimensions* : ce critère n'est pas forcément une fin en soi. Nous nous efforcerons tout de même d'aboutir à une solution la plus compacte possible ;
- *les matériaux* : l'environnement dans lequel les outils de micromanipulation sont utilisés est un critère important à prendre en considération (Zhou 2001). Il s'agit notamment d'environnements tels qu'une "salle blanche" ou de milieux plus confinés comme une chambre à vide d'un microscope électronique à balayage. Des précautions doivent alors être prises : par exemple, les matériaux utilisés ne doivent pas (ou peu) dégazer pour une utilisation dans une chambre à vide et ne doivent d'une manière générale émettre aucune particule solide.

Nous présentons désormais le cheminement qui nous a permis de choisir les actionneurs. Après un rappel des principes physiques du mode d'actionnement retenu, nous passons en revue les actionneurs existants pour finalement définir la structure mécanique la plus appropriée à nos besoins.

2.2 Quel principe d'actionnement ?

Pour nous aider dans ce choix, le tableau 2.1 donne une comparaison succincte de différents principes d'actionnement. Des informations complémentaires pourront être obtenues dans les articles de Kornbluh (1998) et de Benzaoui (1998).

Comme nous l'avons déjà mentionné, les domaines d'applications des micropinces sont variés et s'étendent des manipulations unitaires de laboratoire à l'assemblage industriel automatisé. Aussi, nous privilégions des principes d'actionnement réputés pour leur rapidité. Par conséquent, nous écartons d'emblée les actionneurs thermiques (dilatation de matériaux, alliage à mémoire de forme).

Parmi les principes restants, nous ne retenons pas les actionneurs électromagnétiques et magnétostrictifs. En effet, ces deux principes nécessitent de générer des champs magnétiques par le biais de bobines, lesquelles ne disposent pas d'un rapport d'échelle favorable à des réalisations de très petites tailles (Minotti 1998). En outre, l'utilisation d'un principe magnétique exclurait l'exploitation d'un tel outil de micromanipulation dans un microscope électronique à balayage dans lequel le champ magnétique perturberait le faisceau d'électrons.

A l'inverse, l'actionnement électrostatique se prête parfaitement aux petites dimensions mais offre une faible densité d'énergie mécanique.

A ce stade, notre choix se réduit à deux principes électro-actifs : la piézoélectricité et l'électrostriction. Notre choix se tourne vers un principe d'actionnement piézoélec-

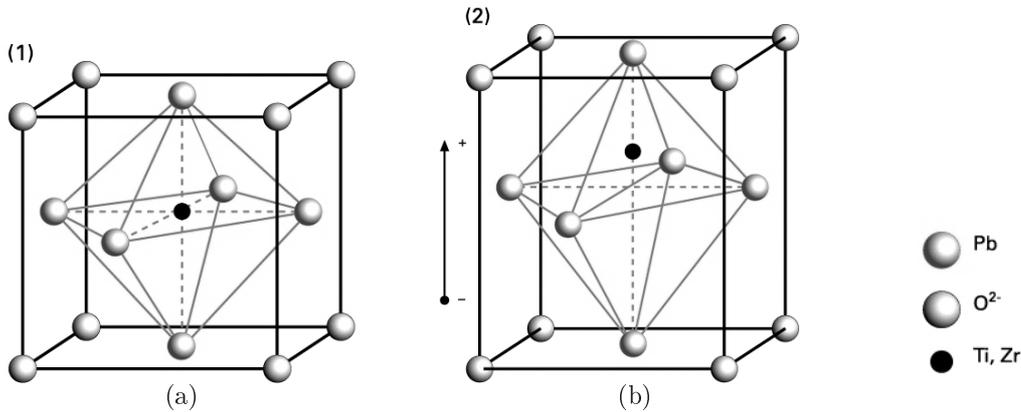


FIG. 2.3 – Structure perovskite d'une céramique piézoélectrique.

trique, qui est, non seulement rapide, mais dispose aussi d'une densité d'énergie mécanique appréciable (ce mode d'actionnement se classe sur ce plan juste après les principes thermiques) et supérieure aux actionneurs électrostrictifs. De plus, les matériaux piézoélectriques sont largement disponibles sur le marché et ont acquis une grande maturité industrielle. Enfin, le principe physique à l'origine de la piézoélectricité, la déformation des mailles cristallines (pour plus de détails, voir la section suivante), offre une résolution quasi infinie.

2.3 La piézoélectricité

2.3.1 Bref historique de la piézoélectricité

Le préfixe «*piézo*» vient du grec et signifie «*serrer*» ou «*presser*». Mais, selon une étude sur l'histoire de la piézoélectricité réalisée par Ballato (1996), c'est Coulomb (1815) qui le premier démontre que l'électricité peut être produite par l'application d'une pression. Lorsque cette dernière est remplacée par une traction, la polarisation change de sens. La première observation qualitative de ce phénomène est attribuée à Haüy (1817). L'étude systématique est entreprise par les frères Pierre et Jacques Curie (1880) à qui l'on attribue la découverte de la piézoélectricité, à savoir que certains cristaux se polarisent sous l'action d'une contrainte mécanique qui les déforme. Il s'agit dans ce cas de l'effet *piézoélectrique direct*. Ce n'est qu'en 1881 que Hankel propose le terme «*piézoélectricité*» qui sera accepté par la communauté scientifique pour décrire ce phénomène. Également en 1881, Lippmann suggère l'effet *piézoélectrique inverse*, à savoir qu'un cristal piézoélectrique soumis à un champ électrique doit subir une déformation. Les frères Curie ne tardent pas à vérifier ces prédictions et montrent que les coefficients piézoélectriques du quartz ont les mêmes valeurs pour l'effet inverse que pour l'effet direct. En 1893, Kelvin énonce une théorie phénoménologique de la piézoélectricité fondée sur les principes de thermodynamique. La formulation mathématique est développée par Duhem et Pockels, puis complétée par Voigt (1894) qui propose une formulation dans laquelle les équations de comportement des cristaux piézoélectriques sont décrites par des tenseurs.

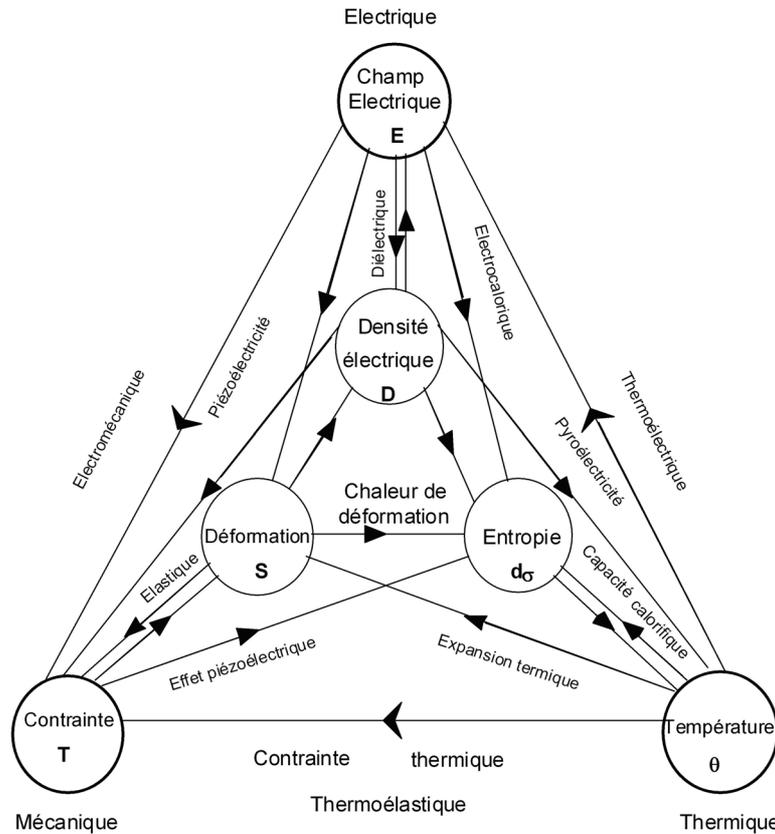


FIG. 2.4 – Interdépendance entre les phénomènes mécaniques, électriques et thermiques (Ikeda 1990)

2.3.2 Phénomène physique de la piézoélectricité

La piézoélectricité est liée à la *structure cristalline* du matériau : elle ne peut apparaître que dans un cristal ne présentant pas de centre de symétrie. Dans un tel cristal, une contrainte de compression ou de cisaillement dissocie les barycentres des charges positives et négatives et fait apparaître un moment dipolaire par unité de volume, c'est à dire une *polarisation*.

Sur 32 classes cristallines, 20 classes sont piézoélectriques parmi lesquelles 10 possèdent une polarisation spontanée en l'absence de champ électrique externe, dont l'amplitude peut varier en fonction de la température : c'est l'effet *pyroélectrique*. Enfin, à l'intérieur de ces 10 classes pyroélectriques, on peut distinguer les matériaux ferroélectriques.

On appelle *matériau ferroélectrique*, un matériau diélectrique dans lequel les moments dipolaires sont couplés. Toutes leurs propriétés sont très sensibles à la température. La ferroélectricité disparaît au-delà d'une température appelée *température de Curie*.

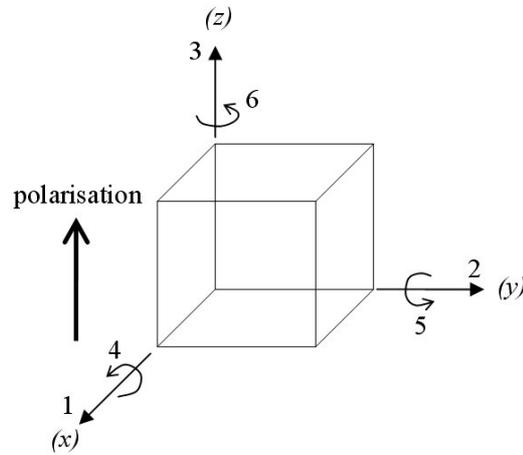


FIG. 2.5 – Représentation du système d’axes d’un matériau piézoélectrique.

La ferroélectricité ne se rencontre que dans quelques structures cristallines particulières. A titre d’exemple, le PZT de formule $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$, souvent utilisé comme actionneur, est composé d’une structure perovskite (figure 2.3). Les huit ions plomb sont placés aux sommets d’un cube, dont les centres des faces contiennent les ions oxygène. L’ion titane occupant le centre du cube, le moment dipolaire de la structure est égal à zéro (figure 2.3.a). Nous sommes dans ce cas au dessus de la température de Curie. Au dessous de cette température, après polarisation, cette structure se déforme légèrement, passant de cubique à tétragonale (figure 2.3.b). La dissymétrie de la maille cristalline confère à la structure déformée un moment dipolaire.

Les interactions entre les différents phénomènes, mécaniques, électriques et thermiques, peuvent être résumé sous la forme d’un diagramme (figure 2.4). La piézoélectricité met en jeu le champ électrique E , la déformation S , le déplacement électrique D et la contrainte T . En pratique, les effets mécano-thermiques et électro-thermiques sont faibles dans les matériaux utilisés. Aussi, dans la suite de cette étude, ces aspects seront négligés pour s’intéresser au seul couplage électromécanique.

2.3.3 Relations fondamentales de la piézoélectricité

En premier lieu, il convient de définir un système d’axes pour repérer le matériau polarisé, par convention, selon l’axe 3 (ou z). Conformément à la norme IEEE (“*IEEE Standard of Piezoelectricity*”), on définit un trièdre de référence orthogonal $Oxyz$ (figure 2.5).

Caractéristiques mécaniques :

Les indices 1, 2 et 3 de la figure 2.5 correspondent respectivement aux directions des axes Ox , Oy et Oz pour les composantes normales et les indices 4, 5 et 6 aux plans yOz , xOz et xOy pour les composantes tangentielles ou de cisaillement.

TAB. 2.2 – Équations piézoélectriques.

<i>Variables indépendantes</i>	<i>Relations piézo-électriques</i>	<i>Forme</i>
T, E	$S = s^E T + d^t E$ $D = dT + \varepsilon^T E$	forme d
S, E	$T = c^E S - e^t E$ $D = eS + \varepsilon^S E$	forme e
T, D	$S = s^D T + g^t D$ $E = -gT + \beta^T D$	forme g
S, D	$T = c^D S - h^t D$ $E = -hS + \beta^S D$	forme h

Les contraintes et les déformations sont représentées par des tenseurs de composantes T_{ij} et S_{kl} respectivement (i, j, k et l variant de 1 à 3). Ces deux grandeurs sont reliées par un tenseur de rigidité de composantes c_{ijkl} (ou de souplesse s_{ijkl}) dans le cadre d'une relation linéaire entre la contrainte et la déformation conformément à la loi de Hooke :

$$T_{ij} = \sum c_{ijkl} S_{kl} = \sum \frac{S_{kl}}{s_{ijkl}} \quad (2.1)$$

T_{ij} représente la contrainte appliquée sur les faces orthogonales à la direction i et dans une direction parallèle à j . Sous la forme matricielle, la loi devient :

$$[T_m] = [c_{mn}][S_n] = \frac{[S_n]}{[s_{mn}]} \quad \text{avec } m, n = 1 \text{ à } 6 \quad (2.2)$$

Caractéristiques électriques :

Dans un diélectrique isotrope placé dans un champ électrique E , il apparaît une induction électrique D , colinéaire au champ, telle que :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.3)$$

Dans le cas de cristaux diélectriques anisotropes, l'induction électrique et le champ ne sont plus colinéaires et la permittivité est un tenseur de dimension 3×3 . La relation entre ces deux grandeurs devient :

$$D_i = \sum \varepsilon_{ij} E_j \quad \text{avec } m, n = 1 \text{ à } 6 \quad (2.4)$$

Caractéristiques piézoélectriques :

Les équations piézoélectriques décrivent l'interaction entre les propriétés élastiques et électriques d'un matériau. Elles peuvent être résumées en huit équations d'état différentes (TAB. 2.2). Chaque couple d'équations (d , e , g et h) fait intervenir des coefficients piézoélectriques différents qui définissent la forme de l'écriture du couple.

Les constantes sont définies pour certaines conditions électriques ou mécaniques (précisées en exposant sur les constantes) :

- D : déplacement électrique constant (ou circuit ouvert) ;
- E : champ électrique constant (ou court-circuit) ;
- T : contrainte constante (ou libre mécaniquement) ;
- S : déformation constante (ou bloqué mécaniquement).

Les matériaux qui présentent un effet piézoélectrique sont anisotropes. Il existe cependant des symétries cristallines qui laissent invariantes les propriétés physiques, réduisant alors le nombre de coefficients indépendants pour une classe donnée de symétrie cristalline. A titre d'exemple, les relations piézoélectriques d'un matériau de la classe $6mm$ (ou *système hexagonal*) sont données par :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

avec : $s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$ (2.5)

Les matériaux piézoélectriques sont aussi caractérisés par d'autres coefficients : le coefficient de couplage et les facteurs de qualité mécanique et électrique.

Le *coefficient de couplage* k traduit l'aptitude d'un matériau à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique ou vice-versa. Il est défini par :

$$k^2 = \frac{\text{énergie électrique convertie en énergie mécanique}}{\text{énergie électrique absorbée}} \quad (2.6)$$

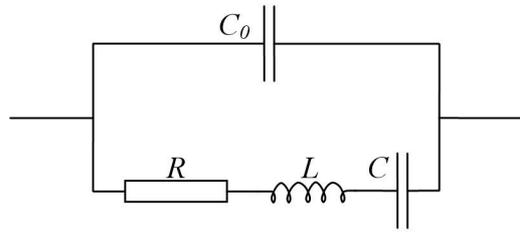


FIG. 2.6 – Schéma électrique équivalent à une structure piézoélectrique - Modèle de Masson

Ce coefficient varie suivant la forme de l'échantillon piézoélectrique (lame, disque, tige, tube...) et le mode de vibration sollicité (épaisseur, radial, cisaillement, longitudinal).

Le *facteur de qualité mécanique* Q_m renseigne sur les pertes mécaniques du matériau. Un élément piézoélectrique soumis à un champ électrique alternatif subit des déformations alternatives. Ces oscillations sont très faibles, sauf lorsque la fréquence d'excitation coïncide avec la fréquence de résonance mécanique propre de l'élément. Il est généralement défini par :

$$Q_m = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (2.7)$$

où Δf est la largeur de bande à 3dB, ce qui correspond à une réduction d'amplitude des oscillations mécaniques par rapport à la résonance dans un rapport $1/\sqrt{2}$.

Le facteur de qualité peut être également défini en fonction d'un circuit équivalent. La figure 2.6 représente un tel schéma appelé modèle de Masson. Il est composé des éléments suivants :

1. C_0 représente la capacité statique du matériau ;
2. la branche RLC est appelée *branche motionnelle* où :
 - L est proportionnelle à la masse du matériau ;
 - C est proportionnelle à l'inverse de la raideur du matériau ;
 - R est proportionnelle aux pertes mécaniques dans le matériau.
3. ce modèle peut être complété par une résistance R_0 , en parallèle à C_0 , qui rend compte des pertes diélectriques statiques ;

On peut alors écrire le coefficient de qualité par rapport aux éléments de la branche motionnelle :

$$Q_m = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.8)$$

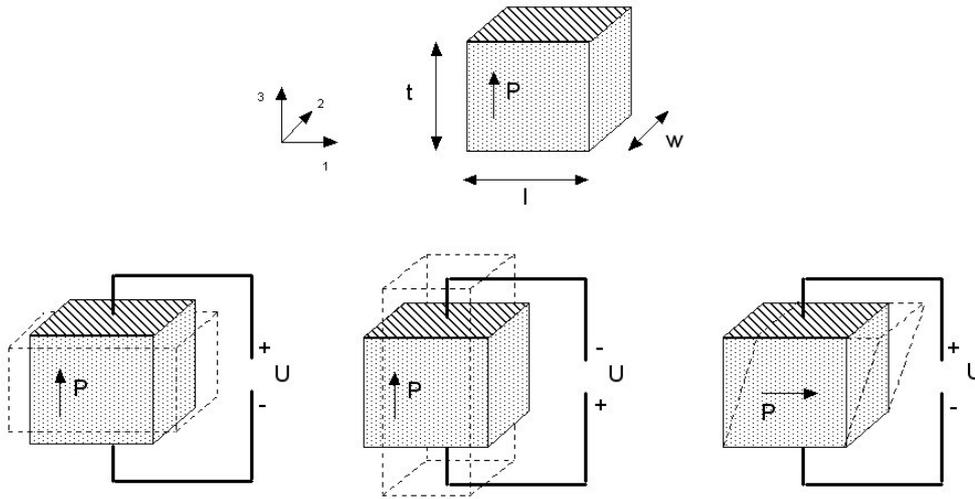


FIG. 2.7 – Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique : de gauche à droite, modes dits “transversal”, “longitudinal”, “en cisaillement”

Enfin, l'angle de pertes électriques $\tan \delta$ caractérise la qualité d'un diélectrique. Le quartz par exemple est un diélectrique de très bonne qualité alors que d'autres matériaux comme le PZT présentent des pertes plus importantes. Sur la base du schéma équivalent de la figure 2.6, complété par une résistance R_0 en parallèle à C_0 matérialisant les pertes diélectriques statiques dans le matériau, ce paramètre s'exprime par :

$$\tan \delta = \frac{1}{R_0 C_0 \omega} \quad (2.9)$$

2.3.4 Modes de déformation des céramiques piézoélectriques

La figure 2.7 montre les modes possibles de déformation d'un matériau piézoélectrique :

- *le mode transversal* : dans ce cas, le champ électrique et de déplacement sont perpendiculaires (image de gauche) ;
- *le mode longitudinal* : c'est le cas où le champ électrique et le déplacement produit sont parallèles (image du milieu). Pour bénéficier de déformations plus importantes, cette configuration est utilisée par empilement de couches ;
- enfin, *le mode de cisaillement* : le champ est ici perpendiculaire à la polarisation pour donner des déformations de cisaillement comme le montre l'image de droite de la figure 2.7. Ces déformations peuvent être mise à profit pour obtenir un déplacement parallèle à une surface avec une raideur importante.

Nous venons de présenter le phénomène, les relations constitutives de la piézoélectricité et les modes de déformation d'un matériau muni de telles propriétés. Comme nous l'avons

TAB. 2.3 – Principales caractéristiques de divers matériaux électroactifs selon TRS Ceramics Inc pour le PZN 4,5 % PT et Camus (1999) pour les autres

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

^a D'autres auteurs font état de densités d'énergie mécanique plus importantes.

vu, c'est un principe connu de longue date et somme toute assez simple puisqu'il fait appel à des équations linéaires entre les grandeurs mécaniques et électriques. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'en pratique, ce type de matériau présente une hystérésis entre la tension appliquée à ses bornes et la déformation résultante⁵.

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

2.4 Quel matériau pour l'actionneur ?

Parmi les matériaux qui présentent un effet piézoélectrique, on trouve des *monocristaux*, comme par exemple la tourmaline et le quartz, pour lesquels l'effet résulte directement de leur structure cristalline. On rencontre également des *structures polycristallines*, à savoir des céramiques comme le Titanate Zirconate de Plomb, usuellement

5. Les effets non-linéaires des matériaux piézoélectriques sont abordés au chapitre 5, page 111.



FIG. 2.8 – Diverses céramiques piézoélectriques (source Ferroperm).

appelés PZT, ou des polymères comme le Polyvinylidène fluorure, généralement appelés PVDF. Plus récemment sur le marché, on voit apparaître des *cristaux relaxeurs* issus de l'ingénierie cristallographique comme les PZN-PT ou encore les PMN-PT. Les structures polycristallines ainsi que les cristaux relaxeurs sont quant à eux rendus piézoélectriques par des traitements électriques et thermiques appropriés. Le tableau 2.3 résume les principales caractéristiques de divers matériaux piézoélectriques.

Les céramiques électrostrictives présentent à température ambiante des niveaux de déformation légèrement supérieurs à ceux des matériaux piézoélectriques. Cependant, nous n'utiliserons pas ce type de matériau car les céramiques électrostrictives massives sont très délicates à élaborer à un niveau industriel et les propriétés sont très sensibles à la température et à la fréquence d'excitation. De plus, même si l'hystérésis est plus faible que celle rencontrée dans les céramiques piézoélectriques, le comportement est nettement non linéaire. Une autre différence réside dans l'absence de polarité réduisant ainsi par deux les déformations que nous pourrions obtenir avec un signal bipolaire.

Les films piézoélectriques présentent une déformation maximale réduite mais surtout une densité d'énergie beaucoup trop faible pour être utilisés comme actionneurs. Ce type de matériau est plutôt utilisé dans l'élaboration de capteurs.

Les composites à fibres actives disposent de nombreux atouts, en particulier leur déformation importante au regard des matériaux précédemment cités mais aussi leur densité d'énergie. Malgré ces avantages apparents, nous n'exploiterons pas ce type de matériau pour des raisons de disponibilité. En effet, ces composites n'existent pas sur catalogue; pour concevoir de telles structures, il faut se procurer les fibres, élaborer le composite puis le polariser pour le rendre piézoélectrique.

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

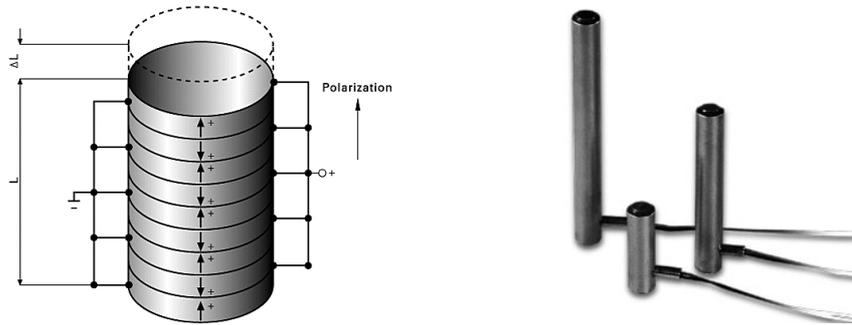


FIG. 2.9 – *Empilements piézoélectriques : schéma de principe ; actionneur commercial (source Polytec-PI).*

Notre choix se porte alors sur des céramiques piézoélectriques de type PZT. Ces matériaux sont en fait les plus utilisés en raison de leur large disponibilité sous diverses formes (figure 2.8) et de leur facilité de mise en œuvre. Les matrices de souplesse, de permittivité et de coefficients piézoélectriques de ce type de matériau sont données par la relation 2.5.

2.5 Quelle structure d'actionneur pour notre micropinçe?

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

- *Les empilements libres* (ou non contraints, figure 2.9) : ces actionneurs ayant un mode de travail en d_{33} sont supposés fournir les énergies les plus importantes. On distingue les stacks piézoélectriques basse tension (100 V à 400 V) et haute tension (1000 V à 2000 V). Les stacks basse tension sont réalisés par l'assemblage collé de composants élémentaires obtenus par co-frittage de 20 à 40 lamelles d'épaisseur 80 à 120 μm . Les stacks haute tension sont réalisés directement par le collage d'éléments d'épaisseur 0,5 à 2 mm ;
- *Les empilements précontraints* : ces actionneurs linéaires intègrent pratiquement exclusivement des céramiques PZT douces privilégiant la course à l'effort et/ou la réponse dynamique. Les stacks de ces actionneurs sont contenus dans une enveloppe protectrice et précontraints lors du montage.

Deux structures se distinguent : les enveloppes cylindriques réalisées en acier inoxydable dans lesquelles les stacks sont précontraints par un empilement de rondelles Belleville ; ou encore les enveloppes réalisées dans la masse d'un matériau et conçues pour appliquer une précontrainte par leur propre rigidité après y avoir logés l'empilement piézoélectrique (figure 2.10).

Cette mise en contrainte permet de faire travailler l'actionneur tant en compression qu'en traction ;

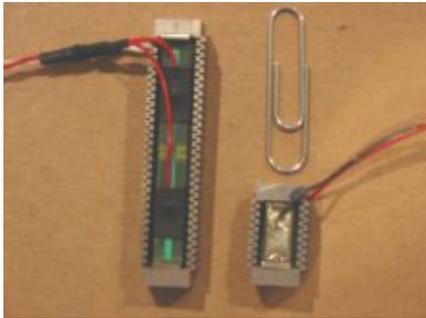


FIG. 2.10 – *Empilement piézoélectrique précontraint (source Cedrat Recherche).*



FIG. 2.11 – *Actionneur elliptique amplifié (source Cedrat Recherche).*

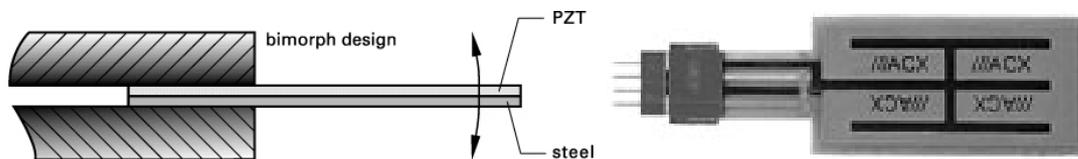


FIG. 2.12 – *Unimorphe piézoélectrique : schéma de principe ; actionneur commercial Quickpack[®] (source ACX)*

- *Les actionneurs amplifiés elliptiques* basse tension (développés par Cedrat Recherche pour le positionnement, figure 2.11) présentent des courses élevées en conservant des possibilités de transmission d’effort intéressantes. Il existe une large gamme de produit qui privilégie soit l’effort, soit le déplacement ;
- *Les unimorphes et bimorphes piézoélectriques* (figure 2.12) : les unimorphes sont composés d’une couche de matériau piézoélectrique généralement collée sur une lame métallique. Les bimorphes quant à eux sont constitués de deux couches de matériau piézoélectrique et parfois munis d’une très fine lame métallique entre les deux couches afin de rendre l’actionneur moins fragile. Le mode transversal (exploitation du mode transversal d_{31}) est ici mis à contribution pour allonger le matériau piézoélectrique. La liaison mécanique entre ce dernier et le matériau support implique une flexion de l’ensemble. Dans le cas du bimorphe, les deux lames sont soumises à un champ électrique (l’une fonctionne en élongation et l’autre en contraction) et permet un travail plus important qu’un unimorphe où une seule lame est motrice. Ces actionneurs offrent des courses importantes mais les forces de blocage⁶ restent faibles par rapport aux actionneurs précédents ;
- *Les disques piézoélectriques* (figure 2.13) : ces actionneurs sont composés de deux disques, unimorphes ou bimorphes, encastrés sur leur périmètre. L’excitation des disques donne naissance à la flexion des “membranes” piézoélectriques. Il en résulte une translation dans l’axe perpendiculaire aux faces des disques.

6. La force de blocage est définie comme étant la force extérieure à appliquer sur l’actionneur pour maintenir une déformation nulle lorsque celui-ci est alimenté.

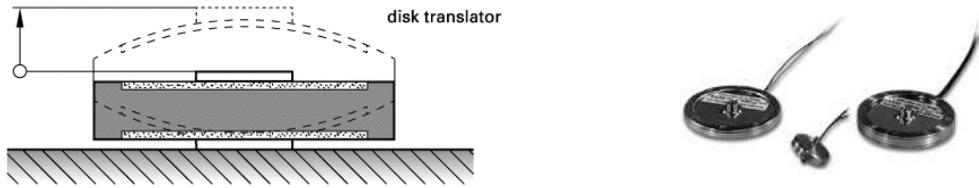


FIG. 2.13 – Disques piézoélectriques : schéma de principe ; actionneurs commerciaux (source Polytec-PI)



FIG. 2.14 – Tubes piézoélectriques ; exemple pour une configuration xyz ; produits commerciaux

Cette structure d'actionneur est, lorsqu'elle peut être utilisée, un excellent compromis déflexion-force-encombrement. Elle permet en effet d'obtenir des courses importantes comparées aux déplacements des structures de type empilements et comparables aux actionneurs de type unimorphe et génère des forces bien supérieures à ces mêmes unimorphes ;

- *Les tubes piézoélectriques* (figure 2.14) : ces actionneurs cylindriques creux peuvent fonctionner tant en élongation qu'en flexion pour les modèles munis de quatre électrodes équi-réparties sur leur périphérie.

Ces tubes offrent cependant des déplacements moindres comparés aux empilements piézoélectriques puisqu'ils exploitent un mode de déformation transversale (dans ce cas, le coefficient d_{31} est mis à contribution). En revanche, la multiplicité des degrés de liberté en fait un actionneur complet et compact. Ils sont souvent utilisés dans des systèmes de microscopie à champ proche comme par exemple les têtes de microscope à force atomique ;

- *Les actionneurs monolithiques*⁷ (figure 2.15) : ils sont de conception très différentes des actionneurs précédents puisqu'ils sont réalisés directement dans la masse du matériau. Ce dernier remplit à la fois le rôle de structure mécanique déformable, par le biais de bras de levier et de charnières élastiques par exemple (figure 2.15, image de droite), et d'actionneur aux endroits précis où les électrodes sont présentes et alimentées. A leur crédit, ces actionneurs sont très compacts et limitent

⁷ Communément appelé par l'auteur (Breguet 1997) *Piézo-Actionneur Monolithique (PAM)* ; en anglais : *Monolithic Piezo-Actuator (MPA)*.

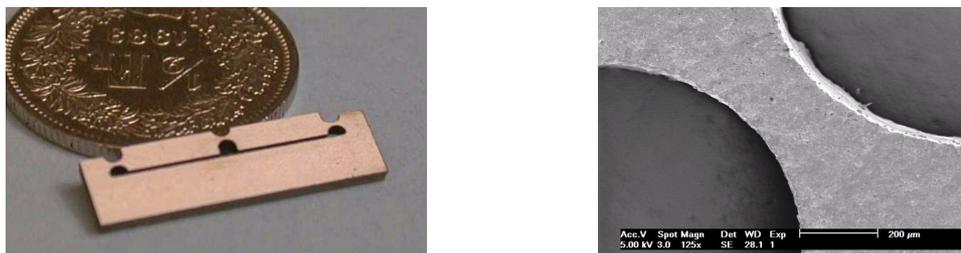


FIG. 2.15 – Un actionneur piézoélectrique monolithique (Breguet 1997) et le détail d'une charnière élastique (Perez 2001)

les opérations d'assemblage de petites pièces. En revanche, deux inconvénients restreignent leur utilisation : en particulier, la relative fragilité du matériau ainsi que des configurations d'actionnement limitées aux structures planaires. Enfin, précisons également qu'il faut les élaborer à partir de matériau massif.

Tous ces actionneurs trouvent leur utilisation dans une application ou une autre en fonction de leurs avantages et de leurs caractéristiques intrinsèques. À ce sujet, la figure 2.16 présente les performances importantes pour des actionneurs, en l'occurrence le couple composé de la force et de la course maximales. Les lignes en pointillés sur ce graphique représentent les limites supérieures correspondants aux besoins de notre étude.

Nous constatons sur le graphique de la figure 2.16 les grandes tendances suivantes :

- des forces maximales importantes accompagnées de faibles courses pour les empilements libres et précontraints ;
- à l'inverse, des déflexions conséquentes et des forces limitées pour les structures de type bimorphe ;
- les caractéristiques des disques piézoélectriques se situent entre les deux types d'actionneurs précédents ;
- enfin, les actionneurs elliptiques amplifiés tirent leur épingle du jeu puisque certains modèles affichent à la fois des courses et des forces maximales importantes, parmi les plus élevées.

Finalement, sur la base des caractéristiques attendues de notre pince (manipulation d'objets compris entre quelques dizaines de micromètres et le millimètre) et par conséquent de chacun des doigts (force de serrage de plusieurs dizaines de millinewtons), deux possibilités largement utilisées dans les exemples de micropinces exposés dans le chapitre 1 nous sont offertes :

- l'exploitation d'un ou plusieurs actionneurs piézoélectriques (de type empilements, disques, etc.) couplés à une structure déformable qui permet un mouvement amplifié des doigts ;
- l'utilisation de structures de type bimorphe.

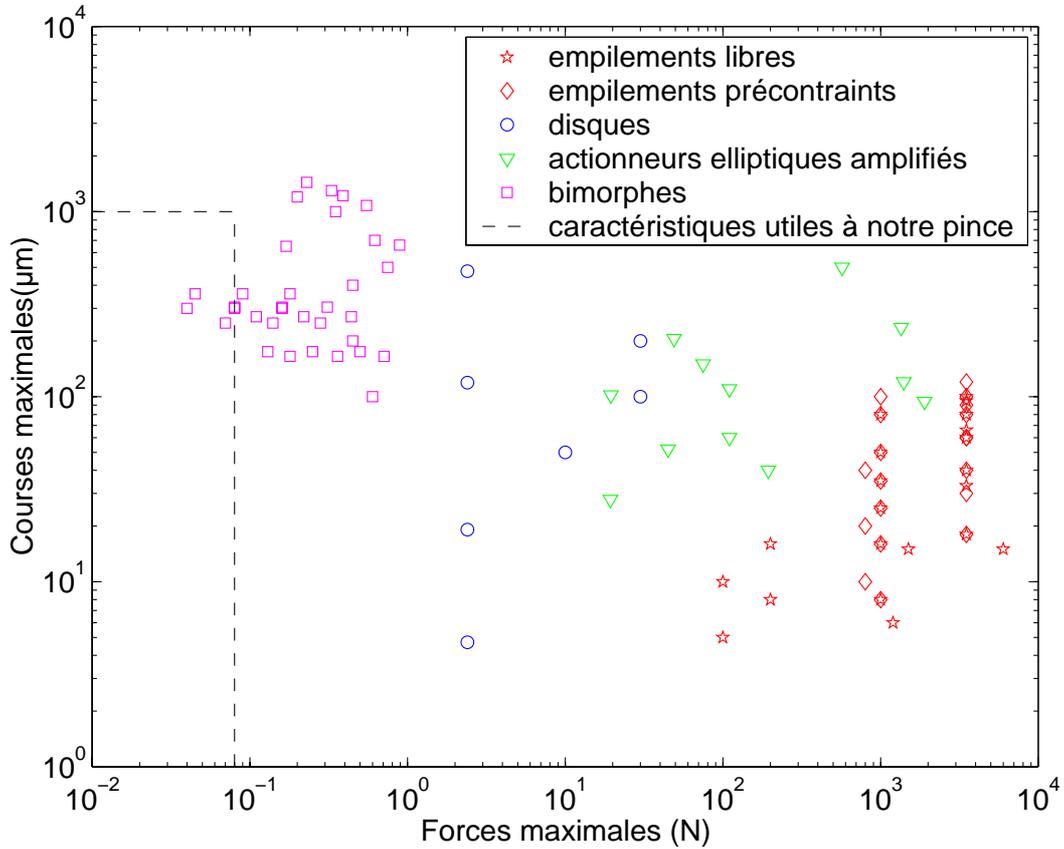


FIG. 2.16 – *Caractéristiques forces/déplacements pour plusieurs actionneurs piézo-électriques commerciaux (sources : APC International Inc., Cedrat Technologies, Piezosystem Jena GmbH, Physik Instrumente)*

Ces deux solutions exploitent les déformations élastiques de certaines parties de la structure. Ce principe a pour effet de ne pas faire intervenir d'autre frottement que celui interne à la matière. En outre, dans les petites dimensions, l'assemblage des différents composants d'un microrobot est en général très délicat. Il est donc important de minimiser ces étapes coûteuses et fastidieuses en privilégiant une structure suffisamment monolithique. Pour ces raisons, nous optons pour des bimorphes qui ont l'avantage de jouer à la fois le rôle de structure mécanique d'une partie des doigts et d'actionneurs amplifiés.

TAB. 2.4 – *Résumé des caractéristiques attendues pour notre micropince en vue de la manipulation d’objets submillimétriques.*

<i>Critères</i>	<i>Caractéristiques essentielles</i>	<i>Remarques</i>
Principe d’actionnement	piézoélectrique	matériau de type PZT
Structure mécanique	monolithique et compliant	Structure bimorphe
Mobilités	ouverture/fermeture indépendante sur chaque doigts montée/descente synchrone des doigts ^a montée/descente asynchrone des doigts ^b	ces fonctionnalités dépendent de la structure et du principe d’actionnement
Course	plusieurs centaines de micromètres pour chacune des mobilités	nécessite une amplification du mouvement
Résolution	submicrométrique	“théoriquement infinie” ^c pour un actionnement piézoélectrique
Force	quelques dizaines de mN	Les forces générées par une structure bimorphe piézoélectrique sont suffisantes pour les applications visées
Bande passante	plusieurs centaines de Hertz	le principe actif piézoélectrique est rapide mais une attention particulière sera portée sur la structure mécanique
Encombrement	le plus compact possible	la structure monolithique compliant permet un gain de place

^a Permet une insertion ou un positionnement fin de haut en bas.

^b Permet une orientation de l’objet ou une correction du défaut d’alignement des organes terminaux.

^c En pratique, la résolution obtenue correspond au plus petit incrément de commande permis par le système de commande.

2.6 Conclusion

Pour conclure, le tableau 2.4 résume les principales caractéristiques envisagées pour notre micropince. Le fondement repose sur une structure monolithique compliant de type bimorphe, actionnée par un principe piézoélectrique. Cet actionnement confère à la micropince une grande résolution ainsi qu'une dynamique importante.

Les caractéristiques les plus originales envisagées dans le cadre de cette étude sont sans conteste l'intégration de plusieurs mobilités dans une même micropince :

- tout d'abord les mouvements dans le plan, d'ouverture et de fermeture des doigts, pour assurer la fonction première d'une pince, à savoir la saisie, le maintien et le lâcher d'un objet ;
- mais aussi, les mouvements hors plan, de montée et de descente synchrone ou asynchrone des doigts, pour permettre une insertion, un positionnement fin, un ajustement de l'alignement des organes terminaux ou encore une orientation d'un objet entre les mors de la pince.

Enfin, nous exposons dans le chapitre suivant comment il est possible de générer deux mobilités sur une seule poutre active.

★ ★ ★