

# Méthode des blocs sensitifs pour la synthèse optimale de mécanismes flexibles à mesure piézoélectrique intégrée

ROBA EL KHOURY MOUSSA<sup>1,2,a</sup>, MATHIEU GROSSARD<sup>1</sup>, CHRISTINE ROTINAT-LIBERSA<sup>1</sup>, MEHDI BOUKALLEL<sup>1</sup>, NICOLAS CHAILLET<sup>2</sup> ET ARNAUD HUBERT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA LIST, Laboratoire de Robotique et Mérorobotique, 18 route du Panorama, 92260 Fontenay-aux-Roses, France

<sup>2</sup> Institut Femto-ST, Département AS2M, UMR CNRS 6596, UFC, ENSMM, UTBM, 32 avenue de l'Observatoire, 25000 Besançon, France

Reçu le 20 avril 2009

**Résumé** – Cet article présente une méthode de synthèse optimale pour la conception préliminaire de mécanismes flexibles monolithiques piézoélectriques. La construction d'un tel mécanisme, selon cette méthode baptisée FlexIn, est basée sur l'agencement de blocs flexibles piézoélectriques élémentaires qui peuvent être structurels, actionneurs et/ou capteurs, sélectionnés respectivement dans trois bibliothèques. Cet article décrit plus particulièrement l'approche utilisée pour établir le modèle aux éléments finis multi-physiques des blocs capteurs piézoélectriques, de type treillis de poutre, en vue de son intégration dans le logiciel de synthèse optimale. Les résultats obtenus présentent un écart de quelques pourcents avec ceux issus d'un code aux éléments finis commercial. À titre d'exemple, le modèle capteur est appliqué à une micropince monolithique existante; le résultat de mesure est d'un ordre de grandeur satisfaisant. Ces résultats permettent de dresser les perspectives de la méthode de synthèse optimale proposée dans le cadre général de la conception de structures intelligentes pour la microrobotique.

**Mots clés** : Optimisation topologique / structures flexibles / piézoélectricité / capteurs / charge électrique

**Abstract** – Sensing building blocks method for the optimal design of flexible mechanisms with integrated piezoelectric sensors. This paper presents an optimal synthesis method for the preliminary design of monolithic piezoelectric flexible smart mechanisms. The design of such a mechanism, according to this method known as FlexIn, is based on the assembly of structural, active and/or sensing elementary piezoelectric flexible blocks, selected respectively out of three block libraries. This paper presents more particularly the approach used to establish the mixed finite element model of the truss type piezoelectric sensing blocks, for its integration in the optimal synthesis software. The obtained results present a negligible error comparing to those given by a commercial finite element software. To illustrate, the sensor model is applied to an existing piezoelectric microgripper; the sensing measurement result achieved is satisfying. These results will lead to drawing up the prospects of the proposed sensing method for the design of smart structures in microrobotics.

**Key words**: Topological optimization / flexible structures / piezoelectricity / sensors / electric charge

## 1 Introduction

Dans le cadre du développement de systèmes mécatroniques pour des applications à petite échelle, les structures flexibles déformables sont une alternative prometteuse aux systèmes mécaniques articulés, qui, outre des difficultés de miniaturisation et d'assemblage, peuvent présenter à cette échelle des problèmes fonctionnels et d'usure liés aux jeux et aux frottements. Les céramiques piézoélectriques font partie des matériaux actifs

couramment utilisés en microrobotique, pour actionner de telles structures flexibles. Tous leurs avantages (performances en force, en bande-passante, en résolution nanométrique) font qu'on les exploite pour la conception de très nombreux prototypes de micropinces à actionnement intégré [1]. En outre, un intérêt important des matériaux piézoélectriques est la réversibilité de leur effet de couplage électromécanique, ce qui explique leur utilisation potentielle en microrobotique comme actionneurs et/ou capteurs, [2–4].

La conception optimale d'une structure mécatronique nécessite une stratégie d'ensemble appropriée pour traiter le problème du couplage entre le mécanisme, ses

<sup>a</sup> Auteur pour correspondance :  
roba.el-khoury-moussa@cea.fr

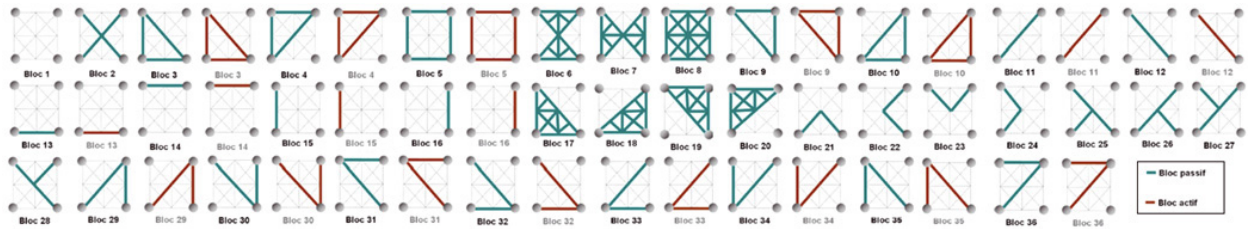


Fig. 1. Bibliothèque de blocs flexibles passifs et actifs implémentés dans FlexIn.

actionneurs, ses capteurs et sa commande. Une nouvelle méthode innovante d'optimisation a été introduite [5] basée sur l'agencement de blocs structurels et piézoélectriques actifs, pour obtenir des structures flexibles à actionnement intégré. Le but de nos recherches est d'étendre cette méthode pour aboutir à la conception optimale de structures monolithiques à actionnement et mesure piézoélectriques intégrés. Cet article est structuré de la façon suivante : en premier lieu, nous décrivons brièvement l'idée fondamentale de la méthode FlexIn pour la conception des mécanismes flexibles. Ensuite, nous présentons dans la Section 3, le modèle aux Eléments Finis (EF) de poutres piézoélectriques conduisant à l'implémentation d'une nouvelle bibliothèque de blocs sensitifs. La validation du modèle par simulation est aussi étudiée pour quelques cas. Pour démontrer l'intérêt de cette nouvelle méthode de mesure, qui intègre des blocs constitutifs passifs, actifs et sensitifs dans la même structure, nous terminons par l'application du modèle dans le cas d'une micropinçe à actionnement et mesure piézoélectriques intégrés (Sect. 4). Enfin, nous concluons par les perspectives de la méthode proposée dans le cadre général de la conception de structures intelligentes pour la microrobotique, répondant ainsi aux besoins posés par des applications aux cahiers des charges très divers.

## 2 FlexIn : une méthode stochastique pour la conception optimale de structures flexibles intégrées

Dans cette section, la méthode des blocs flexibles est présentée. Elle est implémentée dans le logiciel dit FlexIn, développé avec MATLAB<sup>®</sup>, pour la conception de structures planes dont les mouvements sont contenus dans ce même plan. La méthode utilise une approche par algorithme génétique pour la conception optimale de structures mécatroniques, définies comme un assemblage de briques élémentaires choisies au sein d'une bibliothèque de blocs passifs, et d'une autre de blocs piézoélectriques actifs. Une description plus détaillée de la méthode est donnée dans [6] et [7].

### 2.1 Blocs flexibles élémentaires

Une bibliothèque de blocs passifs contenant 36 éléments ainsi qu'une autre de blocs actifs comportant 19 éléments, sont proposées dans FlexIn (voir Fig. 1).

Ils sont suffisants pour constituer une grande variété de topologies que l'on peut rencontrer dans la littérature. Ils sont caractérisés par leur forme géométrique, leur matériau, leurs dimensions, puis sont assemblés de façon à constituer la structure du mécanisme déformable.

Chaque bloc résulte d'un assemblage de poutres Navier-Bernoulli à sections rectangulaires. En outre, l'avantage des blocs actifs est qu'ils peuvent fournir, avec seulement un bloc élémentaire, de multiples degrés de liberté couplés, produisant ainsi des mouvements plus complexes qu'avec des actionneurs discrets.

### 2.2 Méthode d'optimisation par algorithme génétique multicritères

La méthode de conception optimale consiste à rechercher une distribution idéale des blocs constitutifs autorisés, et des différents paramètres structurels considérés. L'endroit des nœuds fixes, le choix du matériau, les dimensions des blocs, et l'emplacement des blocs actifs de la structure, peuvent également être considérés comme paramètres d'optimisation. La méthode d'optimisation emploie une approche par algorithme génétique inspirée de Deb et al. [8], permettant une optimisation multicritères (voir Fig. 2). L'algorithme est structuré comme suit :

- paramétrage discret des mécanismes flexibles selon les conditions de conception (taille des mailles, topologie, matériau et épaisseur, conditions aux limites, etc.) ;
- évaluation des individus (calcul des critères d'optimisation) ;
- opérateurs stochastiques pour l'optimisation (modification de la description des mécanismes flexibles).

Plusieurs critères mécaniques et automatiques sont disponibles dans FlexIn, comme le déplacement et l'effort au nœud de sortie, l'avantage géométrique, l'avantage mécanique, des critères portant sur des mesures de commandabilité. L'algorithme génétique évalue les critères choisis à chaque itération et fournit plusieurs solutions pseudo-optimales dans le cas d'une optimisation multicritères, ou une seule pour une optimisation monocritère. L'utilisateur interprète et analyse les solutions, pour en choisir une selon les besoins de l'application visée (Fig. 2).

## 3 Implémentation d'une bibliothèque de blocs sensitifs

Dans cette section, l'approche EF adoptée pour la modélisation des blocs piézoélectriques sensitifs, ainsi que

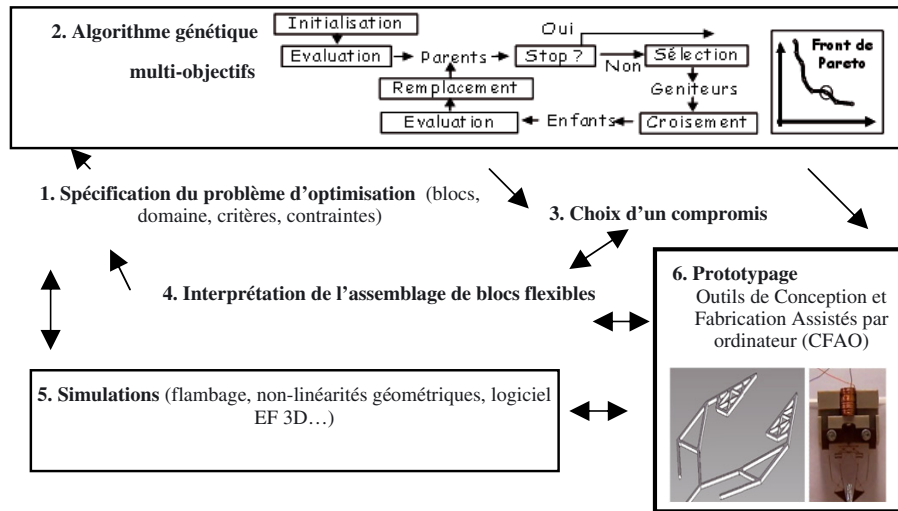


Fig. 2. Méthode de conception optimale de structures flexibles avec FlexIn.

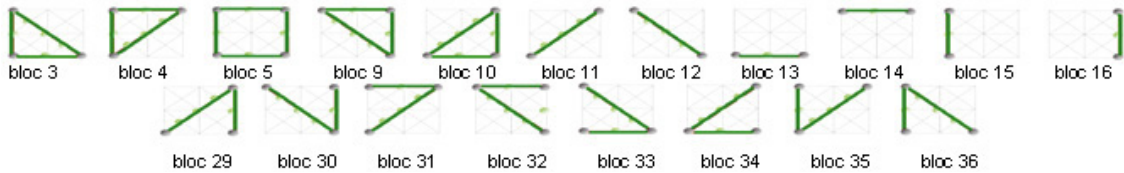


Fig. 3. Bibliothèque des blocs flexibles sensibles de FlexIn.

son implémentation dans le logiciel d'optimisation FlexIn, sont présentées.

### 3.1 Création d'une bibliothèque de blocs sensibles

À notre connaissance, cette nouvelle méthodologie de synthèse de mécanismes flexibles utilisant des blocs sensibles piézoélectriques pour l'intégration de la fonction « mesure » n'a pas été rapportée auparavant dans la littérature. Quatre topologies différentes de blocs sensibles sont considérées. Cela permet d'obtenir une nouvelle bibliothèque de 19 blocs sensibles implémentée dans FlexIn (Fig. 3).

### 3.2 Modèle aux EF 1D pour le calcul de la charge électrique d'origine mécanique

#### 3.2.1 Modèle aux EF d'une poutre piézoélectrique

L'effet piézoélectrique met en jeu les interactions entre les phénomènes mécaniques et électriques du matériau. Les équations constitutives de la piézoélectricité prennent alors la forme suivante [10] :

$$T = c^E S - e^T E \quad (1)$$

$$D = e S + \varepsilon^S E \quad (2)$$

où  $T$  et  $S$  sont respectivement les tenseurs de contrainte et déformation mécaniques,  $D$  et  $E$  le déplacement et le

champ électriques,  $c^E$ ,  $e^T$  et  $\varepsilon^S$  sont respectivement le tenseur rigidité à champ électrique constant, la matrice entre la déformation et l'induction à champ constant, et la matrice de permittivité diélectrique à déformation constante [7]. À partir de ces équations linéaires et du principe de Hamilton [9], une approche variationnelle est établie pour dériver la formulation du modèle aux EF pour une poutre piézoélectrique. Le détail de ce calcul, notamment sur le choix des fonctions d'interpolation et l'expression des déformées associées, peut être trouvé dans [10]. Le modèle matriciel aux éléments finis statique qui exprime le comportement d'une poutre piézoélectrique à partir de ses déplacements et forces nodaux, les potentiels et les quantités de charges électriques sur ses électrodes s'écrit dans son repère local comme suit :

$$K_p U_p = G_p \varphi_p + F_p \quad (3)$$

$$G_p^t U_p = q_p - C_p \varphi_p \quad (4)$$

où  $K_p$  est la matrice raideur de la poutre,  $G_p$  la matrice de couplage électromécanique,  $C_p$  la matrice capacité,  $\eta_p$  le vecteur des déplacements nodaux,  $\varphi_p$  le potentiel extérieur appliqué aux électrodes de la poutre en cas d'actionnement,  $F_p$  le vecteur de forces mécaniques nodales,  $q_p$  les charges électriques réparties sur la surface des électrodes de la poutre. L'équation (3) est surtout utilisée en cas d'actionnement [11] où le potentiel appliqué  $\varphi_p$  induit une déformation et ainsi un déplacement des nœuds  $\eta_p$ .

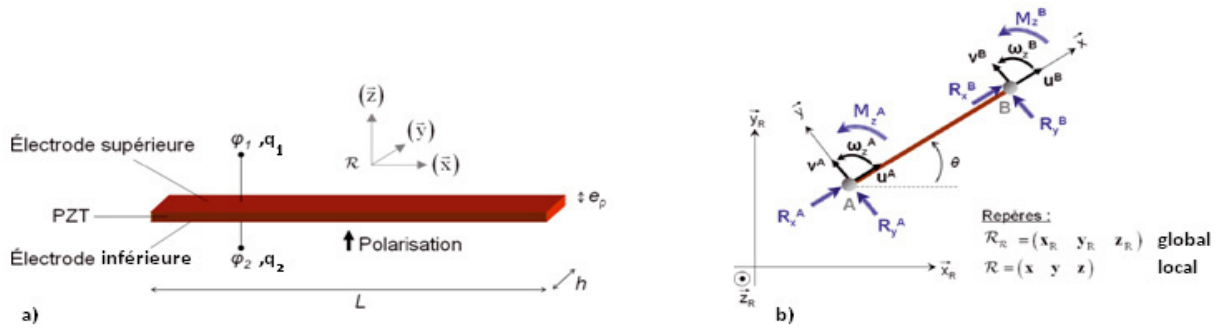


Fig. 4. (a) Poutre piézoélectrique 3D; (b) coordonnées curvilignes de la poutre d'extrémités A et B.

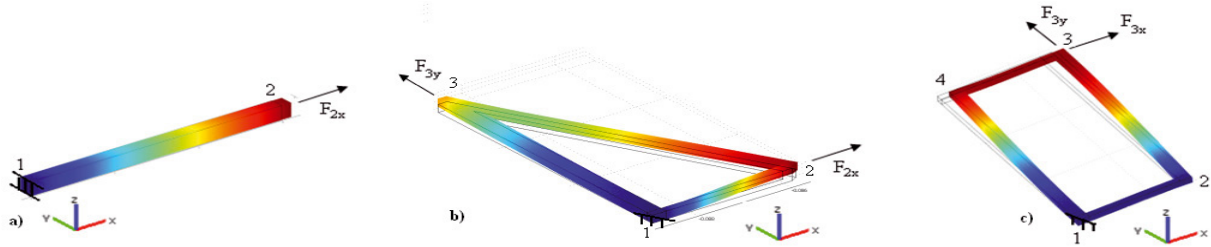


Fig. 5. (a) Bloc piézoélectrique 13 et sa déformée, où le nœud 1 est bloqué, ( $L_{12} = 3$  mm,  $h_{12} = 150$   $\mu$ m,  $e_p = 200$   $\mu$ m); (b) bloc piézoélectrique 3 et sa déformée, où le nœud 1 est bloqué, ( $L_{12} = 3$  mm,  $h_{12} = 150$   $\mu$ m,  $L_{13} = 6$  mm,  $h_{13} = 300$   $\mu$ m,  $L_{23} = 6.708$  mm,  $h_{23} = 167.7$   $\mu$ m,  $e_p = 200$   $\mu$ m); (c) bloc piézoélectrique 5 et sa déformée, où le nœud 1 est bloqué, ( $L_{12} = 3$  mm,  $h_{12} = 150$   $\mu$ m,  $L_{13} = 6$  mm,  $h_{13} = 300$   $\mu$ m,  $e_p = 200$   $\mu$ m).

### 3.2.2 Calcul de la charge électrique des blocs sensitifs

Pour ce qui est de la fonction capteur, l'équation (4) permet de récupérer la quantité de charges électriques sur les électrodes, induites par la déformation  $G_p^t U_p$  de la poutre. En pratique, pour mesurer ces charges, on utilise généralement des convertisseurs charge-tension mettant en jeu un amplificateur opérationnel. En régime parfait, les électrodes supérieure et inférieure de la poutre piézoélectrique sont court-circuitées via l'amplificateur opérationnel supposé idéal, ce qui impose  $\varphi_p$  comme nul dans l'équation (4). Ainsi, la mesure est découplée de l'actionnement. En partant de ce principe, pour une poutre élémentaire aux nœuds d'extrémité A et B, représentée à la figure 4b, l'équation (4) devient dans le plan de la poutre :

$$q_p = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = Y h d_{31} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{xA} \\ v_{yA} \\ \omega_{zA} \\ u_{xB} \\ v_{yB} \\ \omega_{zB} \end{pmatrix}_R \quad (5)$$

avec  $Y$  le module de Young du matériau piézoélectrique considéré,  $h$  la largeur de la poutre élémentaire, et  $d_{31}$  la constante piézoélectrique transverse.  $q_1$  et  $q_2$  sont les charges électriques égales et opposées, induites sur les deux électrodes de la poutre. Ainsi, l'hypothèse de Navier-Bernoulli implique dans ce cas, que seule une déformation en traction/compression induit des charges électriques sur les électrodes sensitives. D'après l'équation (5)  $q_p$  est alors

directement proportionnelle à la largeur de la poutre et à sa déformation longitudinale.

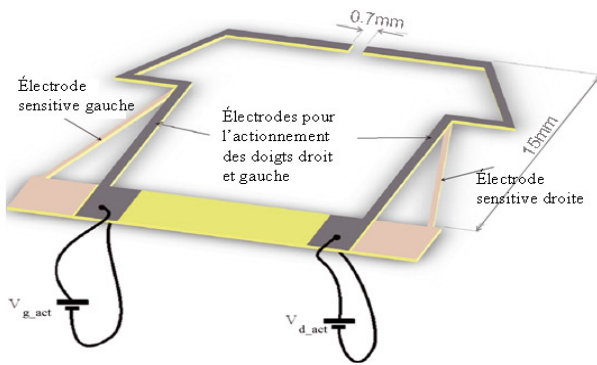
Toutes les matrices de couplage électromécanique  $G_{\text{bloc}}$  et de capacité électrique  $C_{\text{bloc}}$  sont calculées pour toutes les possibilités de blocs sensitifs. La charge électrique  $q_{\text{bloc}}$  d'un bloc est alors la somme des charges électriques induites sur chaque poutre de ce bloc.

### 3.3 Validation du modèle aux EF de la bibliothèque sensitive

Les résultats obtenus utilisant notre modèle aux EF ont été comparés et validés par un logiciel de simulation aux EF multiphysique 3D du commerce (Comsol Multiphysics), pour tous les blocs sensitifs sous plusieurs conditions aux limites. Les valeurs de charges électriques des blocs 13 (Fig. 5a), 3 (Fig. 5b) et 5 (Fig. 5c) sont présentées dans le tableau 1, pour un matériau PZT PIC 151 [12]. Les déformations des poutres des blocs sont assurées par des actionneurs en force agissant sur les nœuds des blocs (Fig. 5). La valeur de chaque effort appliqué est de 1 mN. En moyenne, l'erreur relative pour tous les blocs de la bibliothèque sensitive est inférieure à 10 %, ce qui reste très acceptable, étant donné notre modélisation curviligne et simplifiée des poutres capteurs. Toutefois, cet écart peut être en partie expliqué par l'hypothèse 1D de FlexIn qui ne prend pas en compte les effets de bord tridimensionnels, contrairement à Comsol Multiphysics. Cependant, l'erreur relative devient plus importante quand le bloc en question subit une déformation en flexion comme pour le bloc 5 présenté à la figure 5c. En effet, le modèle de mesure

**Tableau 1.** Valeurs des charges électriques calculées par FlexIn et Comsol pour trois blocs de la bibliothèque sensitive (3, 5 et 13).

Numéro du bloc	FlexIn : charge électrique induite sur l'électrode supérieure (C)	Comsol : charge électrique induite sur l'électrode supérieure (C)	Ecart relatif (%)
13	$3,15e^{-12}$	$3,18e^{-12}$	1
3	$9,45e^{-12}$	$9,08e^{-12}$	4
5	$9,45e^{-12}$	$11e^{-12}$	14

**Fig. 6.** Vue CAO de la micropinçe piézoélectrique mettant en évidence les zones dédiées à l'actionnement et la mesure.

de l'équation (5) ne considère que les charges électriques dues aux mouvements de traction/compression. Ceci peut se justifier par l'hypothèse suivante : lors de la flexion, la fibre neutre sépare la poutre de façon symétrique en une moitié en compression et l'autre en traction. Ainsi, les charges induites de part et d'autre de la fibre neutre s'annulent. Mais cette hypothèse n'est pas systématiquement vérifiée en réalité, d'où l'écart observé.

#### 4 Exemple d'utilisation dans le cas d'une micropinçe active

Dans cette section, nous évaluons la possibilité de l'utilisation de la mesure de charge électrique au sein d'une micropinçe (Fig. 6) développée sous FlexIn [5]. Il s'agit d'une micropinçe monolithique piézoélectrique, qui avait été optimisée pour le placement des actionneurs piézoélectriques, pour réaliser la fonction de préhension entre les deux doigts de serrage.

L'idée ici est d'employer les deux poutres latérales correspondant aux blocs 11 et 12 de la bibliothèque de blocs sensitifs, comme des capteurs de déformation pour la mesure des charges électriques induites selon le modèle de l'équation (5). Lorsque la pinçe est alimentée sous une différence de potentiels de 100 V, chaque doigt de préhension se déplace environ de  $10 \mu\text{m}$  dans le sens de serrage. La valeur de charges obtenue par FlexIn sur l'une des électrodes sensitives vaut  $1,22 \times 10^{-10}$  C. Bien que la mise en place d'une électronique de mesure de charges d'un tel ordre de grandeur soit en cours, il semble que cette valeur de charge soit réaliste. Il serait ainsi intéressant de comparer le résultat qui en est issu, avec les déplacements mesurés par un capteur extérieur.

#### 5 Conclusion et perspectives

L'évolution de la méthode des blocs flexibles, pour prendre en compte l'intégration des blocs sensitifs au sein de structures flexibles actives a été présentée. Le modèle 1D de mesure piézoélectrique a été validé pour la plupart des blocs sensitifs. Un critère permettant de calculer la charge électrique produite par la sollicitation mécanique de ces blocs sensitifs a été mis en œuvre. Les développements pour son utilisation au cours d'une optimisation sont en cours. Ils permettent de placer de manière optimale les blocs sensitifs au sein des structures-trellis. Les placements retenus seront ceux, pour lesquels la quantité de charges électriques produites sur les électrodes sera maximale, améliorant ainsi la plage de mesure qu'il est possible d'atteindre par des circuits électroniques appropriés. L'objectif que nous poursuivons est la synthèse optimale d'un dispositif microrobotique (par exemple, une micropinçe) capable d'intégrer de manière optimale au sein de la structure monolithique, les fonctions d'actionneur et capteur. La solution optimale choisie sera ensuite interprétée, simulée et prototypée, en vue de la validation expérimentale.

#### Références

- [1] J. Agnus, P. Nectoux, N. Chaillet, Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on a MMOC microgripper, Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA), Espoo, Finlande, June 2005, pp. 117–123
- [2] X. Lin, F.G. Yuan, Diagnostic lamb waves in an integrated piezoelectric sensor/actuator plate : analytical and experimental studies, Smart Materials and Structures 10 (2001) 907–913
- [3] D. Campolo, R. Sahai, R.S. Fearing, Development of piezoelectric bending actuators with embedded piezoelectric sensors for micromechanical flapping mechanisms, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, September 2003, pp. 3339–3346
- [4] P.J. Costa Branco, J.A. Dente, On the electromechanics of a piezoelectric transducer using a bimorph cantilever undergoing asymmetric sensing and actuation, Smart Materials and Structures 13 (2004) 631–642
- [5] M. Grossard, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet, M. Boukallel, Mechanical and Control-Oriented Design of a Monolithic Piezoelectric Microgripper using a New Topological Optimisation Method, IEEE Transactions on Mechatronics, In press

- [6] P. Bernardoni, Outils et méthodes de conception de structures mécaniques à déformations réparties et actionnement discret – applications en microrobotique, Thèse de Doctorat réalisée au CEA, Université Paris 6, France, 2004
- [7] M. Grossard, Contribution à la conception optimale et la commande de systèmes mécatroniques flexibles à actionnement piézoélectrique intégré – Application en microrobotique, Thèse de Doctorat réalisée au CEA, Université Franche Comté Besançon, France, 2008
- [8] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab, T. Meyarivan, A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization, Nsga-II, Proc. of the 6th Int. Conf. on Parallel Problem Solving from Nature, Paris, France, 2000
- [9] ANSI/IEEE Std. 176-1987 IEEE Standard on piezoelectricity, 1987
- [10] M. Grossard, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet, Y. Perrot, Flexible building blocks method for the optimal design of compliant mechanisms using piezoelectric material, 12th IFTOMM World Congress, Besançon France, 2007
- [11] H.F. Tiersten, Hamilton's principle for linear piezoelectric media, Proceedings Letters of the IEEE Journal (1967) 1523–1524
- [12] P.I. Piezo, Ceramic Technology, Available at <http://www.picceramic.com/>, 2005