Une nouvelle méthode de conception de structures mécaniques à déformations réparties et actionnement discret. Application sur une micro-pince.

Paul Bernardoni (1), Christine Libersa (1), Catherine Bidard (1), Jean-Pierre Friconneau (1), Philippe Bidaud (2), Olivier Millet (3) et Lionel Buchaillot (3)

(1) Laboratoire architecture et Prototype Robotique (LPR), CEA, DRT-IdF, LIST/DTSI/SCRI, 18 route du Panorama, BP 6, 92265 FONTENAY AUX ROSES Cedex

(2) Laboratoire de Robotique de Paris (LRP), Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, FRE CNRS 2507, 18 route du Panorama, BP 61, 92265 FONTENAY AUX ROSES Cedex

(3) Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN), UMR CNRS 8520, Département ISEN, Cité Scientifique, Avenue H. Poincaré, BP 69, 59652 VILLENEUVE D'ASCQ Cedex

Résumé :

Cet article présente une nouvelle méthode de conception préliminaire de structures flexibles à déformations réparties et actionnement discret. Cette méthode est basée sur l'agencement optimal de blocs flexibles élémentaires, de type réseaux de poutres, dans un domaine de conception fixé. La topologie, les dimensions, le matériau, le nombre et la position des points fixés au bâti, ceux des contacts et ceux des actionneurs, peuvent être générés automatiquement à l'aide d'un algorithme génétique pour fournir un ensemble de solutions optimales, vis-à-vis de critères caractérisant la tâche visée, et en correspondance avec le cahier des charges. Nous illustrons quelques apports de cette méthode à travers un exemple issu de la microrobotique, et donnons ses limites ainsi que les perspectives de développement.

Abstract :

This paper deals with a new preliminary method for designing deformable structures, on which actuators are discretely located. This method is based on the optimal layout and assembly of truss-type elementary flexible blocks, inside a specified design area. Topology, dimensions, material, number and position of fixed nodes, actuators and contacts location, can be optimized using a genetic algorithm. This algorithm displays a set of structures, which are optimal for many criteria characterizing the task, and which answer simultaneously the schedule of conditions. Through the study of a microrobotic device, many contributions of this method are shown, as well as its limits, before giving development perspectives.

Mots clefs : structure flexible, optimisation multi-objectifs, outil de conception

1 Introduction

Le développement de systèmes microrobotiques basés sur le monolithisme n'est pas récent. En particulier, les avantages de l'utilisation des mécanismes monolithiques, dits compliants, qui fournissent et/ou transmettent un mouvement et une force en subissant des déformations élastiques, sont nombreux. L'absence d'assemblage de pièces mobiles facilite la fabrication et la maintenance. Il n'y a ni jeu ni frottement, ce qui élimine les problèmes fonctionnels tels que l'usure et le grippage, permettant d'obtenir un système mécanique plus fiable. Dans le cadre de la microrobotique, les applications sont très variées, et vont de la manipulation de micro objets biologiques, mécaniques ou électroniques, à l'exploration et l'intervention en chirurgie mini invasive. Aussi, le cahier des charges de la structure mécanique active varie énormément d'une application à l'autre (efforts à fournir/transmettre, débattements ou mouvements requis, rigidités souhaitées, matériaux admissibles…).

L'approche la plus naturelle consiste à s'inspirer des mécanismes articulés pour concevoir la structure compliante. Les liaisons cinématiques sont alors remplacées par des liaisons flexibles reliant des éléments rigides [1 - 3]. Mais les déformations se retrouvent localisées aux points stratégiques de la structure, et entraînent dans la majorité des cas des structures à faible débattement, si l'on veut garantir leur durée de vie. De plus, l'encombrement ou la quantité de matière sont rarement optimisés. Les structures à déformations

réparties permettent d'obtenir des débattements plus importants en utilisant au mieux le matériau. Il faut alors trouver une autre approche pour concevoir de telles structures. Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation de structures compliantes [4 - 6]. Certaines de ces méthodes sont capables de fournir la topologie de la structure, mais ne peuvent alors prendre en compte simultanément plusieurs critères d'optimisation, traiter le cas de critères non-convexes, ni explorer un espace de variables discontinu ou discret. De plus, à cause des procédures d'optimisation employées, elles peuvent malheureusement converger vers un optimum local. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation stochastiques permet d'éviter ces problèmes en fournissant, pour des problèmes d'optimisation multi-critères, plusieurs candidats à l'optimum global, également dans le cas de variables discrètes [7].

Une nouvelle méthode d'aide à la conception de structures flexibles a été développée sur ce principe. Elle considère que les actionneurs, les contacts et les liaisons au bâti sont des éléments additionnels, pouvant être répartis sur la structure de façon discrète. Pour la première fois, il devient possible d'optimiser simultanément la forme et le matériau de la structure, ainsi que les conditions aux limites en déplacement et en effort, et la répartition de contacts unilatéraux intermittents. Nous présentons ici cette méthode, et illustrons ses apports pour la conception de micro-pinces.

2 FlexIn : Flexible Innovation

2.1 La méthode des blocs

La nouvelle méthode proposée [8] est basée sur l'utilisation d'une bibliothèque d'éléments flexibles élémentaires, appelés blocs. Les blocs sont des réseaux de poutres à sections rectangulaires. L'assemblage de ces blocs permet de décrire de nombreuses structures. Ils sont définis d'après l'expérience du concepteur, et permettent une évolution future de la méthode pour la prise en compte des nouvelles contraintes technologiques du problème posé (forme, matériau, etc.). Les contraintes liées au procédé de fabrication ne sont que partiellement prises en compte dans l'état actuel (épaisseurs de dépôts admissibles pour les procédés de micro-usinage de surface). Les blocs sont également définis de manière à éviter les déformations localisées.

Actuellement, seul le comportement mécanique statique linéaire de la structure est pris en compte. Pour le calcul des performances (évaluation des critères), la méthode des éléments finis utilise le modèle de poutre de Navier-Bernoulli en petites perturbations, pour des matériaux supposés isotropes élastiques linéaires. Pour accélérer encore le calcul, chaque bloc (comportant initialement 13 nœuds) est caractérisé par sa matrice de rigidité condensée aux quatre nœuds externes du bloc, et calculée une fois pour toutes au début du processus.

La méthode des blocs est implémentée, pour le cas des mécanismes plans, dans le logiciel FlexIn (boîte à outils développée sous Matlab©). Un processus d'optimisation permet de déterminer des solutions automatiquement. Celui-ci s'appuie sur un algorithme évolutionnaire multi-objectif inspiré de K. Deb et al. [9]. La taille du domaine, le nombre de blocs à utiliser et les caractéristiques des points de sortie sont des paramètres fixés au début du processus. Les performances à atteindre sont précisées sous forme de critères tels que : les déplacements et/ou les efforts aux nœuds de sortie du mécanisme, les rapports d'amplification de force ou de déplacement, l'énergie de déformation, la masse, etc… De nouveaux critères peuvent aussi être définis par l'utilisateur.

Tout ou partie des variables définissant la structure flexible peuvent être optimisées : les variables définissant la topologie de la structure (types de blocs utilisés et leur agencement), ses dimensions et son matériau ; les variables définissant les points liés au bâti (base fixe), les contacts unilatéraux (internes ou externes), et la distribution des actionneurs. Cependant, en pratique, on est limité par le nombre de variables à optimiser simultanément, car plus l'espace de recherche est grand, plus le temps de calcul et de convergence augmente. Il est donc recommandé de réduire au maximum l'espace de recherche. En sortie du processus, FlexIn fournit la liste des structures flexibles optimales les plus proches de la cible, tout en répondant aux contraintes du cahier des charges. Enfin, FlexIn permet de visualiser et de simuler le comportement d'une structure obtenue par l'optimisation ou définie manuellement.

2.2 Démarche générale de conception avec FlexIn

Le concepteur dispose de différents outils qui lui permettent (figure 1) : d'interpréter et d'affiner un assemblage de blocs conçu arbitrairement (3. et 4.) ; de simuler plus finement cette structure (5.) ; et de réaliser des prototypes (6.). Dans certains cas, une optimisation peut s'avérer utile. Les spécifications sont alors précisées (1.), puis un algorithme génétique génère plusieurs solutions candidates (2.). En effet, le résultat d'une optimisation multi-critères est un ensemble de solutions pseudo-optimales réparties le long d'un front de Pareto (chaque solution peut être représentée graphiquement par un point ayant pour coordonnées les valeurs des critères utilisés). Il est ainsi possible de choisir une solution parmi plusieurs propositions. Pour cela, il est utile d'interpréter et d'affiner les structures obtenues (3. et 4.). Puis l'utilisateur peut soit corriger les spécifications du problème d'optimisation (reprise de 1.), soit dégager un nombre réduit de paramètres et les optimiser à leur tour (CO).

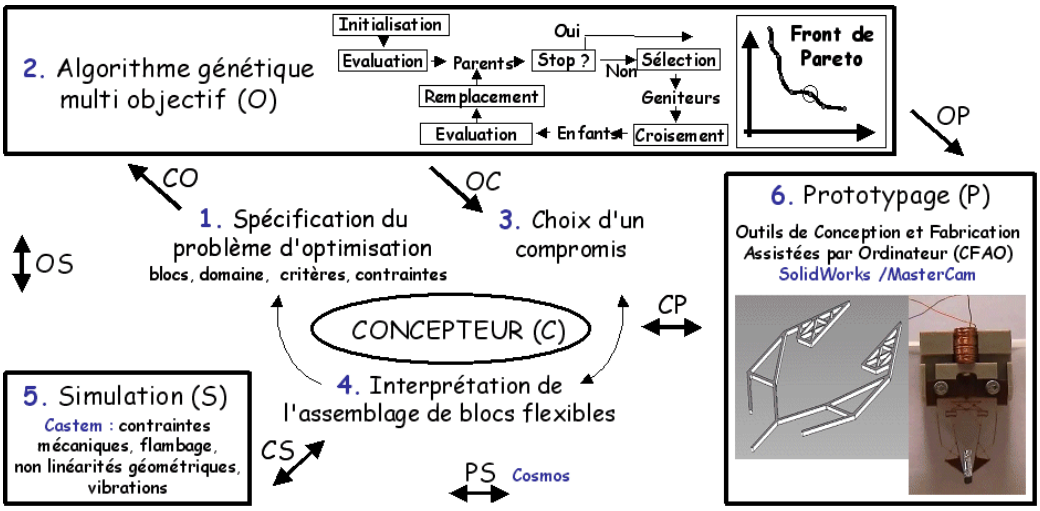


FIG. 1 – Processus de conception de structure compliantes par la méthode des blocs

Or, les blocs sont supposés connectés les uns aux autres uniquement par leurs quatre nœuds externes. De plus, les non linéarités géométriques et matérielles, les limites de flambage et les caractéristiques dynamiques ne sont pas prises en compte dans l'étape de recherche d'optima. C'est pourquoi, avant de passer à la phase de réalisation, les caractéristiques et performances effectives de la structure choisie doivent être vérifiées en post-traitement de FlexIn, à l'aide de logiciels de simulation par éléments finis plus puissants (5.). En particulier, une fonctionnalité de FlexIn permet de convertir un réseau de blocs en réseau de poutres, et d'exécuter une simulation détaillée sous Castem. Mais cette simulation n'est pas encore possible pour les structures dont la forme a été ajustée en post-traitement à l'aide de logiciels de CAO (congés de raccordement), en vue de la réalisation de prototypes (6.).

3 Exemple d'application : conception de micro-pinces flexibles

3.1 Une pince flexible équivalente à la micro-pince articulée de l'IEMN

Une micro-pince articulée en polysilicium (E = 192.000 MPa, ν = 0,3), de dimensions 1,2 × 1,6 mm² et d'épaisseur 4,5 µm, a été développée à l'IEMN [10]. Elle est actionnée à l'aide d'un train de 16 actionneurs SDA (Scratch Drived Actuators) qui fournissent 800 µN (fig. 2). Ceux-ci sont guidés linéairement par des liaisons élastiques, et utilisent la conversion de forces électrostatiques, générées par des électrodes placées sous le substrat, en forces de frottement. Si on néglige les frottements aux articulations, l'effort de serrage disponible au niveau des mors est de l'ordre de 80 µN, et la course maximale de chaque mors est de 0,275mm. Outre les problèmes liés aux jeux et aux frottements au niveau des articulations (qui pourraient être réduits par les techniques récentes de fonctionnalisation de surface), la réalisation de ces articulations par les procédés de micro-usinage de surface existants reste délicate : cette pince a nécessité 8 niveaux de masque différents. La possibilité de pouvoir réaliser en une seule étape, une micro-pince flexible aux performances équivalentes, est donc un enjeu particulièrement intéressant.

Les spécifications nécessaires à la définition du problème d'optimisation sont regroupées dans le tableau 1. Les matériaux et les épaisseurs explorés par le processus d'optimisation sont le polysilicium (ép. 2, 4 ou 6 μm) et la résine SU8 (E = 4.020 MPa, ν = 0,22) (ép. 20, 40 ou 60 μm). La pince flexible recherchée est supposée symétrique, fixée au bâti par deux points, et actionnée par les mêmes actionneurs. Le domaine de conception est donc réduit de moitié, et maillé par 9 blocs, qui permettront de décrire des solutions suffisamment complexes. Deux critères d'optimisation sont utilisés simultanément : l'amplification des déplacements et l'amplification des forces, pour la saisie d'un objet rigide de diamètre 0,4 mm. Ces rapports d'amplification sont calculés entre le point de sortie qui représente le mors de la pince, et le point actionné. Pour la pince articulée, les rapports d'amplification en force (0,2) et en déplacement (5) sont pratiquement constants sur la plage d'utilisation.

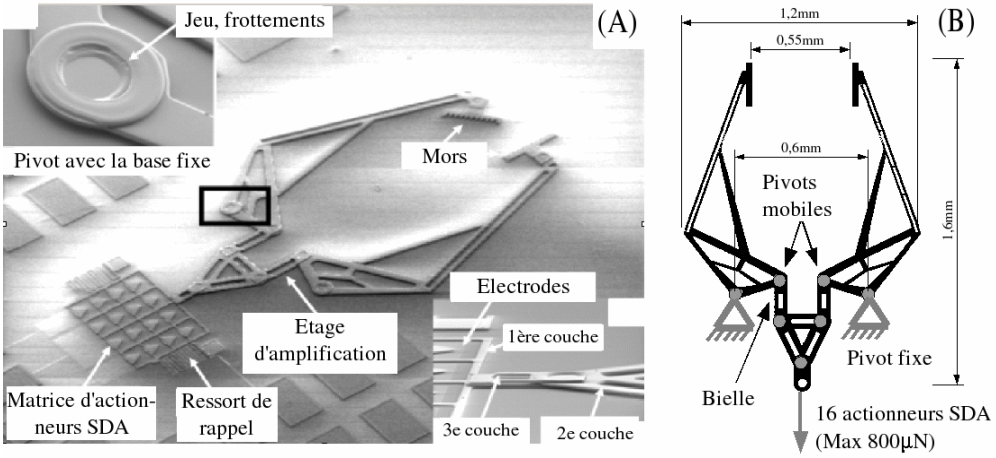


FIG. 2: Micro-pince articulée de l'IEMN [10]

Une première optimisation a été effectuée. Elle ne concernait que les variables définissant le type des blocs, leurs dimensions, leur matériau et leur épaisseur. Une seconde optimisation concernait de plus la position du point fixé au substrat, et la localisation et le jeu d'un contact interne. Les solutions obtenues ont permis, après épuration de la forme sans nuire aux performances, d'obtenir des pinces flexibles aux caractéristiques voisines de celles de la pince IEMN (tab. 1). Pour les solutions retenues, la contrainte maximale de Von Mises reste bien en deçà de la limite élastique du matériau, et le coefficient de sécurité au flambage est satisfaisant.

Soulignons qu'une pince flexible classique (sans contact interne) ne peut atteindre le niveau d'amplification des déplacements de la pince articulée qu'en dégradant l'amplification des forces. En effet, une partie de l'énergie mécanique fournie par l'actionneur est emmagasinée dans la structure sous forme d'énergie de déformation. Par contre, l'utilisation de contacts internes unilatéraux dans la structure induit un comportement mécanique à bifurcations [11], qui peut conduire à un gain en force sans perdre en déplacement ou vice versa. Pour mieux comprendre l'influence du contact interne sur le fonctionnement de la pince flexible, une analyse des performances de serrage de la pince a été effectuée pour des objets rigides de différentes tailles. L'évolution de la force de serrage est représentée sur les courbes de la figure 3a, où l'on compare notamment, pour quantifier l'apport des contacts, le comportement de la pince avec contacts internes avec celui de la même pince sans contact, et celui de la pince dont les contacts sont bloqués. Il s'avère que la présence de contacts internes permet de cumuler les avantages de la pince sans contact et de la pince à contacts bloqués, où comme ici, les contacts sont toujours actifs quelle que soit la taille de l'objet. Ainsi, cette pince à contacts internes permet la saisie d'objets de petite taille avec des efforts de serrage significatifs, tout en conservant de bonnes performances de serrage pour des objets plus grands. Néanmoins, les jeux des contacts internes suggérés par l'optimisation, et définissant l'entrée en action de ces contacts, ne sont pas forcément réalisables avec le procédé de fabrication envisagé. C'est le cas ici, puisque un jeu de 0,14 μm pour des dimensions hors tout de $1{,}2 \times 1{,}6$ mm² semble bien impossible à obtenir.

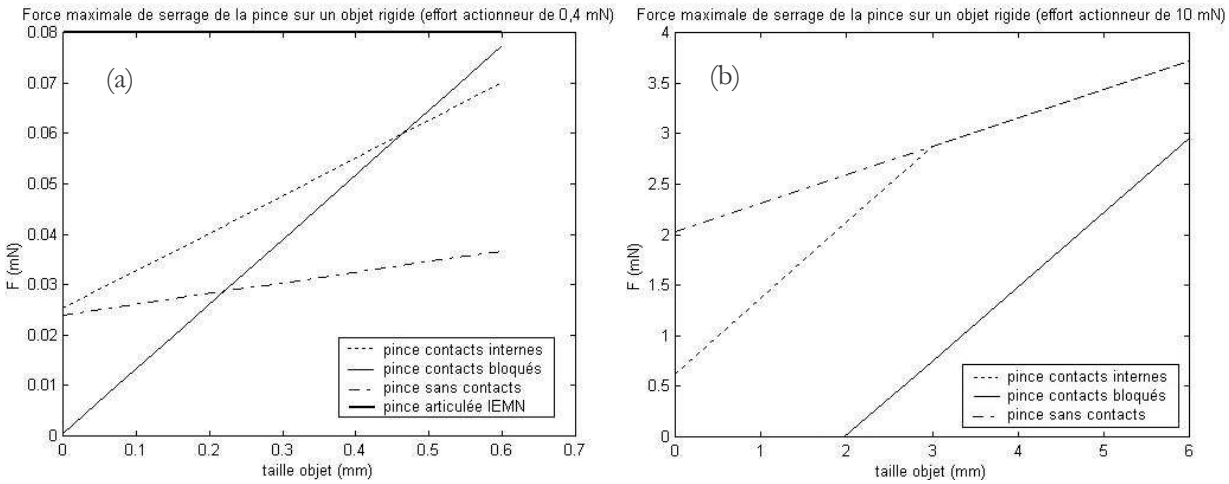
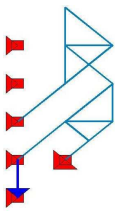
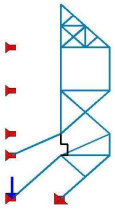
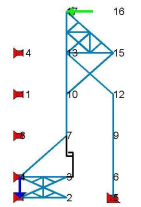
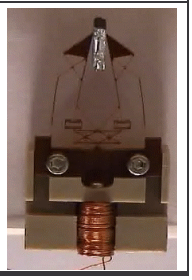


FIG. 3: Performances de serrage de pinces flexibles, pour des objets de différentes tailles (calculs effectués sur la ½ pince). (a) : micro-pince flexible équivalente IEMN et (b) : meso-pince flexible CEA.

3.2 Réalisation d'un prototype à l'échelle méso-scopique

Nous considérons à présent le problème à l'échelle 10, avec ici un actionneur électromagnétique [12]. Pour une pince de cette taille (environ 16mm), le micro-usinage de surface n'est plus adapté. Nous utilisons un centre d'usinage de précision qui impose une contrainte de jeu minimal pour les contacts internes (égale au diamètre de la micro-fraise, soit 0,3mm). Cette contrainte technologique a été prise en compte lors de l'optimisation. Les caractéristiques de la nouvelle pince obtenue sont regroupées dans le tableau 1, et l'évolution de la force de serrage est représentée sur la figure 3b. Contrairement à la pince précédente, la 'grande' valeur du jeu implique que les contacts internes ne sont actifs que pour la saisie de petits objets. Ceci entraîne une diminution de l'effort de serrage que fournirait la pince sans contact. Cette particularité peut être utile pour manipuler des objets fragiles, ou lorsque les efforts à fournir doivent être limités.

Caractéristiques	**Pinces flexibles**		
	Equivalentes à la pince IEMN		**Prototype CEA**
Dimensions (mm)	1,2 × 1,6	1,2 × 1,6	12 × 15
Effort actionneur	800 µN	800 µN	10 mN
Variables optimisées	topologie, matériau, dimensions	topologie, matériau, dimensions, base fixe, contacts internes	topologie, matériau, dimensions, base fixe, contacts internes contraints en jeu
Matériau / Epaisseur	SU8, 30 µm	SU8, 30 µm	Polyimide, 1 mm
Course maximale d'un mors	0,300 mm (fermeture)	0,300 mm (fermeture)	3 mm (fermeture)
Amplification des déplacements	5,1	7,7	2,8
Amplification des forces	0,13 (objet de 0,4 mm)	0,14 (objet de 0,4 mm)	0,32 (objet de 4 mm)
Forces maxi de serrage	52 µN (objet de 0,4 mm)	56 µN (objet de 0,4 mm)	3,2 mN (objet de 4 mm)
Représentation sous **FlexIn** de la demi pince		 jeu = - 0,14 µm (!)	 jeu = - 0,3 mm (limite du procédé) 

TAB. 1: Comparaison des performances des micro- et méso pinces symétriques étudiées

Les contraintes liées au procédé de fabrication (comme la contrainte de jeu minimal admissible) ont donc une grande influence sur le fonctionnement des solutions optimales trouvées. La seule prise en compte de critères d'évaluation globaux, comme ceux utilisés jusqu'à présent, ne permet pas de prédire le fonctionnement réel des pinces flexibles. Selon l'application visée, les choix des critères spécifiques à utiliser et de l'espace de recherche à explorer lors de l'optimisation, sont autant de problèmes à résoudre pour disposer d'un outil de conception préliminaire efficace. La caractérisation expérimentale des performances est également nécessaire pour vérifier que les simplifications effectuées dans le modèle mécanique utilisé durant l'optimisation sont sans effet sur l'optimalité et les performances réelles des structures générées (influence des grands déplacements, par exemple).

4 Conclusion et perspectives

Un outil d'aide à la conception, basé sur une nouvelle méthode utilisant une représentation par blocs, permet de générer automatiquement des structures flexibles optimales pour un cahier des charges spécifié par l'utilisateur. C'est un outil qui intervient en amont du processus, soit pour orienter la conception vers une solution non triviale ou innovante, soit pour optimiser une solution connue pour un cahier des charges proche, et ceci sans nuire aux performances attendues de la structure. Des ajustements doivent ensuite être réalisés à l'aide d'outils et de modèles spécifiques, car tous les aspects liés à la réalisation technologique ne peuvent être pris en compte de manière globale (diversité de comportements des actionneurs, intégration physique des différents éléments, aspects technologiques et limitations liés aux procédés de fabrication, etc.), et peuvent parfois rendre une solution non viable. Il faudra donc pouvoir prendre en compte les contraintes de fabrication directement dans le processus d'optimisation. A terme, la conception préliminaire de mécanismes tridimensionnels à plusieurs degrés de liberté devrait aussi être possible par cette méthode.

Références

[1] S. Henein, « Conception des guidages flexibles », Collection META, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001

[2] S.T. Smith, « Flexure », Gordon and Breach Science Publishers, 2000

[3] L.L. Howell, « Compliant mechanisms », John Wiley and Sons Inc., 2001

[4] G. Allaire, « Shape optimization by the homogenization method », Springer Verlag, 2002

[5] M.I. Frecker et al., « Topological synthesis of compliant mechanisms using multi-criteria optimisation », Journal of Mechanical Design, vol. 119, pp. 238-245, juin 1997

[6] A. Saxena et al., « Pennsyn : a topology synthesis software for compliant mechanisms », Proceedings of DETC'00, ASME Design Engineering and Technical Conference, Baltimore, Maryland, USA, sept. 2000

[7] H. Hamda et al., « Représentations non structures en optimisation topologique de formes par algorithmes évolutionnaires », Proceedings ESAIM, actes du 32ème congrès d'analyse numérique : CANUM2000, Vol. 8, sept. 2000

[8] P. Bernardoni, « Outils et méthodes de conception de structures mécaniques à déformations réparties et actionnement discret - Applications en microrobotique », Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Mécanique Robotique, 25 oct. 2004

[9] K. Deb et al., « A fast and elitist multi-objective genetic algorithm : Nsga-2 », Parallel Problem Solving from Nature, PPSN VI, 6th International Conference, Paris, France, sept. 2000

[10] O. Millet et al., « Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism », Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 114, Iss. 2-3, pp. 371-378, sept. 2004

[11] N.D. Mankame, G.K. Ananthasuresh, « Contact aided compliant mechanisms : concept and preliminaries », Proceedings of ASME DETC'02, MECH-34211, Montreal, 2002

[12] M. Benali-Khoudja, M. Hafez, « An optimization tool for designing linear electromagnetic actuators », Proceedings of Actuator 2004, 9th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, June 2004