



HAL
open science

Actionneurs miniatures à alliages à mémoire de forme fabriqués par microstéréophotolithographie

S. Ballandras, M. Calin, S. Zissi, A. Bertsch, J. André, A. Bourjault, D.
Hauden

► **To cite this version:**

S. Ballandras, M. Calin, S. Zissi, A. Bertsch, J. André, et al.. Actionneurs miniatures à alliages à mémoire de forme fabriqués par microstéréophotolithographie. *Journal de Physique III*, 1996, 6 (12), pp.1759-1774. 10.1051/jp3:1996212 . jpa-00249556

HAL Id: jpa-00249556

<https://hal.science/jpa-00249556>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Actionneurs miniatures à alliages à mémoire de forme fabriqués par microstéréolithographie

S. Ballandras ^(1,*), M. Calin ⁽²⁾, S. Zissi ⁽³⁾, A. Bertsch ⁽³⁾, J.C. André ⁽³⁾,
A. Bourjault ⁽²⁾ et D. Hauden ⁽¹⁾

⁽¹⁾ LPMO - CNRS, 32 avenue de l'Observatoire, 25044 Besançon Cedex, France

⁽²⁾ LAB - ENSMM, 26 chemin de l'Épitaphe, 25030 Besançon Cedex, France

⁽³⁾ CNRS (*), 1 rue Grandville, BP 451, 54001 Nancy Cedex, France

(Reçu le 16 février 1996, révisé le 23 août 1996, accepté le 5 septembre 1996)

PACS.81.20.-n – Methods of materials synthesis and materials processing

PACS.85.80.-b – Electrochemical, thermoelectromagnetic, and other devices

Résumé. — La mise au point d'un procédé de fabrication d'actionneurs associant la microstéréolithographie (μ SPL) avec des éléments d'Alliages à Mémoire de Forme (AMF) est décrite dans le présent article. L'idée repose sur l'assemblage de fils d'AMF avec des architectures mécaniques passives en polymère réalisées par μ SPL. Une étape de collage assisté par la lumière (photopolymérisation) permet de lier rigidement les fils d'AMF à la structure polymère. Cette approche a été utilisée pour fabriquer des actionneurs à élasticité répartie ou à charnières déformables. L'association de tels actionneurs en série ou en parallèle donne alors lieu à de nouveaux composants (éléments articulés), dont le principe est présenté. Certains de ces actionneurs ont été testés expérimentalement. Les résultats de ces tests sont reportés et analysés.

Abstract. — A new method for the fabrication of actuators has been implemented. It is based on polymer structures built using microstereolithography (μ SPL) integrating Shape Memory Alloy (SMA) elements. The principle of the proposed approach consists in the assembly of SMA wires together with passive mechanical architectures fabricated using μ SPL techniques. A light aided assembly method based on photopolymerization has been adjusted to clamp SMA parts to μ SPL parts. This approach has been implemented to build actuators using distributed elasticity or liable hinge architectures. These actuators have been associated in parallel or serie to produce new active mechanical components. Some of these actuators have been experimentally tested. The obtained results are presented and discussed.

1. Introduction

L'utilisation d'Alliages à Mémoire de Forme (AMF) pour la fabrication d'actionneurs a fait l'objet de nombreuses recherches puisque l'on ne dénombre pas moins de 201 brevets sur le sujet dans la base de données WPI (obtenus en associant Shape Memory Alloy et Actuator). Une démarche identique effectuée sur la base PASCAL du CNRS donne accès à 46 brevets sur ce même thème.

(*) Auteur auquel doit être adressée la correspondance (e-mail : ballandr@lpmo.univ-fcomte.fr)

(*) GdR 1080

Ces brevets sont souvent centrés sur une application particulière d'un actionneur à base d'AMF réalisé en techniques d'usinage conventionnelles (machines-outils numériques, électro-érosion, découpage chimique ou estampage) souvent inadaptées à une réduction des dimensions (applications microtechniques).

Les AMF sont particulièrement attractifs pour réaliser des actionneurs à grands déplacements car on peut espérer des déformations reproductibles de l'ordre de 4 % de la dimension active du dispositif [1]. Il est alors possible de transformer, grâce à une architecture mécanique adaptée, des déplacements de contraction longitudinale en effets de flexion ou de rotations. Des études sur le sujet ont été menées par des équipes italiennes [2] et japonaises [3] pour la fabrication de dispositifs centimétriques.

D'autres équipes cherchent à développer des actionneurs à base de films minces d'AMF [4,5], mais la nature des forces disponibles, leur amplitude et les structures ainsi accessibles confinent pour l'instant de tels actionneurs à des applications planaires spécifiques (déformations de membranes pour micro-pompes, micro-miroirs orientables, écrans plats déformables, *etc.*).

L'étude décrite dans cet article concerne la mise au point d'une technique de fabrication de composants actifs électromécaniques pour des applications micro-robotiques. Ces composants (actionneurs) doivent être réellement tridimensionnels pour pouvoir s'adapter aux applications envisagées, à savoir l'inspection endoscopique, la manipulation dans l'espace, le positionnement précis, avec de multiples degrés de liberté et avec des débattements les plus grands possible. Pour finir, le procédé doit être adapté à la miniaturisation dans le but de fabriquer des microactionneurs utilisables pour des applications biomédicales ou de type microassemblage.

Nous avons initialement cherché des solutions au problème de la réalisation d'un bras articulé miniature dont l'actionnement commandé électriquement à l'aide d'AMF permettrait d'obtenir des déplacements de grande amplitude. Parmi les diverses technologies disponibles, le procédé de stéréophotolithographie (SPL) [6] est de loin le plus attractif pour les applications envisagées.

La solution adoptée présente des avantages décisifs en termes de miniaturisation et de structure tridimensionnelle. En effet, les récents progrès de la SPL [7] permettent de fabriquer des architectures de taille réduite avec des précisions et des résolutions suffisantes pour ne pas nuire au fonctionnement général de l'actionneur. D'autre part, les AMF sont disponibles sous forme de plaques ou de fils pré-éduqués de dimensions adaptées à nos besoins.

Différentes architectures mécaniques en polymère, de complexité croissante, ont été élaborées par SPL. Elles ont été montées chacune en série afin de visualiser de façon nette et mesurable les déplacements engendrés à l'extrémité de la structure. Des actionneurs constitués de cinq éléments mis bout à bout ont été ainsi fabriqués (y compris l'assemblage de l'élément d'AMF avec la structure en polymère), donnant lieu à des composants de 2 à 4 mm de section de base, sur une longueur de 2 cm.

La première partie de l'article est consacrée à la méthode de fabrication et d'assemblage de ces actionneurs. Le principe des essais expérimentaux est alors décrit et les résultats sont analysés en détail. Finalement, divers domaines d'applications de ces actionneurs sont proposés.

2. Microstéréophotolithographie (μ SPL)

La stéréophotolithographie laser est une technologie de fabrication d'objets tridimensionnels par polymérisation résolue dans l'espace et induite par la lumière (les premiers brevets ont été pris dès 1984 [8, 9]). Les applications de ce procédé assisté par ordinateur concernent essentiellement la réalisation de pièces prototypes industrielles de forme complexe dont la fabrication est réalisée en peu de temps par rapport aux méthodes traditionnelles. La taille typique d'un objet tridimensionnel fabriqué par SPL est de l'ordre de quelques dm^3 avec une résolution voisine de 0,1 mm.

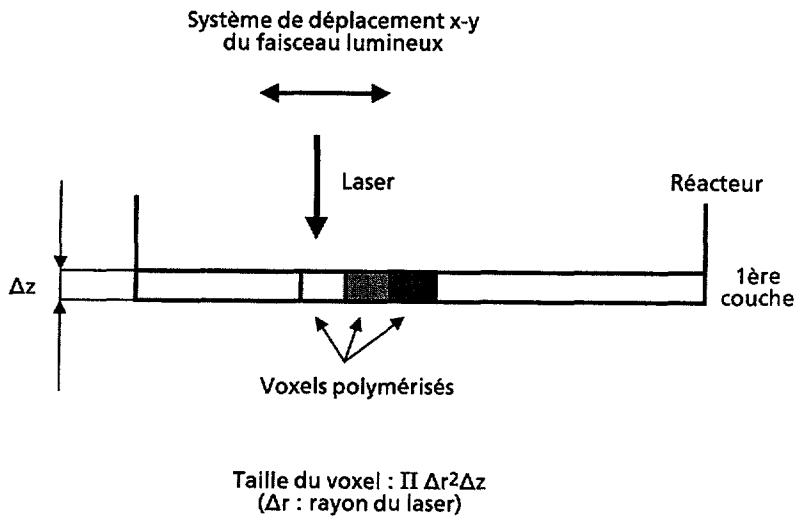


Fig. 1. — Fabrication d'une couche voxel par voxel.

[Fabrication of a layer voxel by voxel (voxel: polymerized elementary volume).]

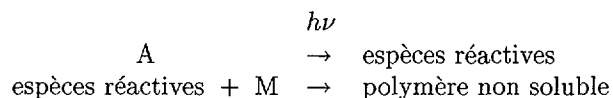
L'application de cette technologie à la microfabrication nécessite donc une amélioration notable de la résolution spatiale. Cette approche est cependant intéressante car elle présente plusieurs avantages vis-à-vis des autres techniques de microfabrication :

- obtention directe de micro-objets tridimensionnels, sans étape d'assemblage,
- insensibilité de la technique à la forme des objets (suivant les trois dimensions), il suffit en effet de disposer des coordonnées de l'objet stockées numériquement,
- possibilité de fabrication collective (production de masse),
- temps de fabrication réduit (prototypage rapide),
- choix des matériaux (isolants, conducteurs, matériaux actifs),
- compatibilité avec la plupart des technologies de fabrication, en particulier celles de la microélectronique.

C'est l'ensemble de ces potentialités qui nous a amené à entreprendre des recherches vers l'amélioration de la résolution spatiale des objets fabriqués par SPL. On rappelle tout d'abord le principe du procédé de SPL. Ensuite on décrit rapidement les adaptations nécessaires à la fabrication d'objets de taille réduite.

2.1. RAPPELS SUR LA PHOTOPOLYMÉRISATION - PRINCIPE DE FABRICATION PAR COUCHES.

L'absorption d'une quantité suffisante de photons par unité de volume entraîne la création d'espèces réactives qui permettent la polymérisation de monomères liquides M en un polymère solide, en général réticulé, insoluble dans le monomère (*cf.* Fig. 1).



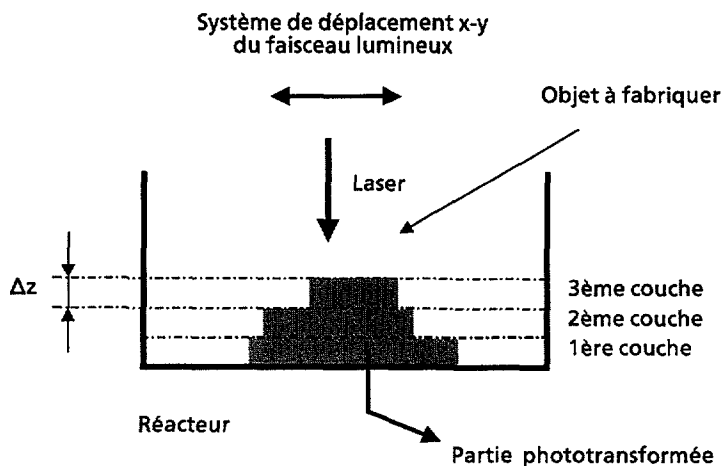


Fig. 2. — Principe de fabrication d'un objet couche par couche.

[Fabrication principle of an object layer by layer.]

Dans ce schéma réactionnel, A est un amorceur photochimique qui conduit aux espèces réactives pouvant être des radicaux libres ou des ions. Ce mécanisme simplifié fait apparaître deux éléments majeurs du procédé : l'absorption localisée de la lumière et le choix de la résine.

L'absorption de la lumière pendant un temps t entraîne la polymérisation d'un élément de volume V (voxel, cf. Fig. 1) :

$$V \simeq \Pi \Delta r^2 \Delta z \quad (1)$$

avec Δr le rayon du faisceau et Δz l'épaisseur de la couche polymérisée.

La polymérisation des couches successives d'épaisseur Δz s'effectue comme suit (cf. Fig. 2). En partant de la base, on polymérise une première couche de monomère. Le faisceau laser se déplace dans le plan $x-y$ à l'aide de miroirs galvanométriques afin de permettre la solidification d'une surface ou de son contour défini par l'ordinateur. À l'aide d'une unité mécanique (moteur, racleur, etc.), une deuxième couche de monomère est ajoutée et polymérisée à nouveau, etc. Dans ces conditions, il est possible de fabriquer un objet tridimensionnel de géométrie complexe.

Pour améliorer la résolution spatiale, il faut diminuer la taille du voxel, donc réduire le diamètre du faisceau lié à l'optique du système et diminuer l'épaisseur de la couche. Cette dernière est déterminée, d'une part par l'absorption de la lumière par le mélange photosensible, et d'autre part par la résolution spatiale de l'unité mécanique de mise en place des couches.

2.2. LE SYSTÈME RÉACTIF

2.2.1. Considérations théoriques. — La transformation du monomère en polymère peut être représentée en première approximation par un système réactif à seuil (cf. Fig. 3). Ce seuil est atteint lorsqu'une quantité de photons S a été absorbée par unité de volume de monomère. L'expression de S peut être approximée par :

$$S = I_a / t_0 \quad (2)$$

où : S est l'énergie seuil absorbée par le monomère pour faire démarrer la photopolymérisation (photon \cdot m⁻³) ;

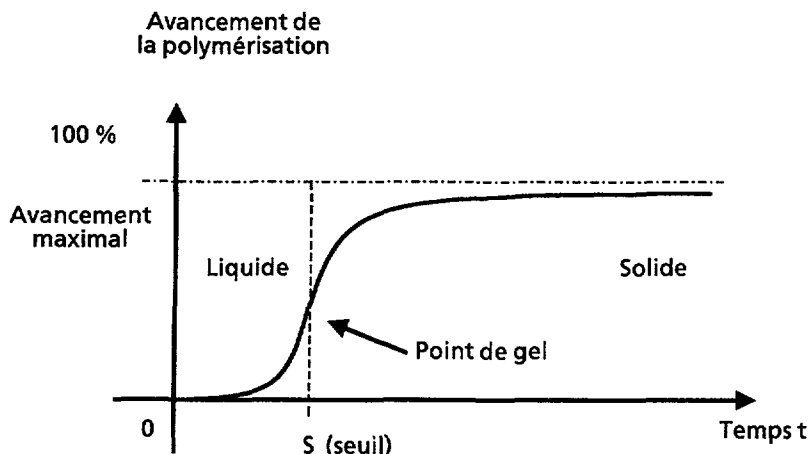


Fig. 3. — Représentation de la photopolymérisation par un système à seuil.

[Representation of photopolymerisation by a threshold system.]

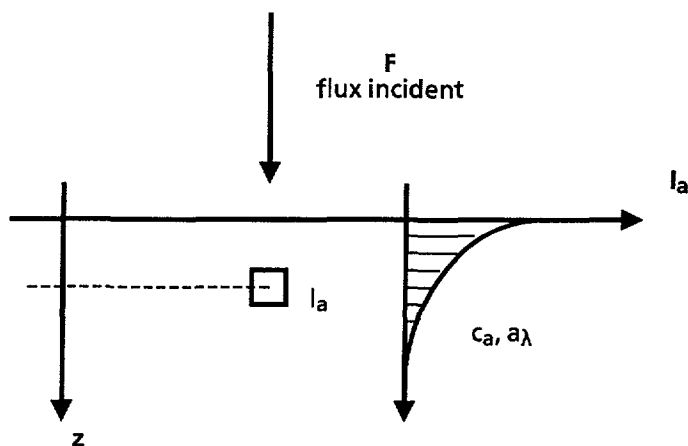


Fig. 4. — Intensité lumineuse absorbée suivant z .

[Light strength absorbed along z -axis.]

I_a la vitesse d'absorption de la lumière ($\text{photon} \cdot \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$);
 t_0 le temps d'irradiation nécessaire pour arriver au seuil (S).

La vitesse d'absorption de lumière par le mélange réactif à une distance z est représentée par la loi de Beer-Lambert suivant laquelle l'amorceur photochimique A présent dans le monomère liquide M absorbe de la lumière de fréquence ν (longueur d'onde λ) en provoquant une atténuation exponentielle du flux (cf. Fig. 4).

$$I_a(z) = a_{\lambda} c F \exp(-a_{\lambda} cz) \quad (3)$$

avec F, I_a . flux incident et transmis ($\text{photon} \cdot \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$),
 c : concentration de l'amorceur (mol l^{-1}),

z : épaisseur traversée (m),

a_λ : coefficient d'extinction molaire ($\text{m}^2 \text{mole}^{-1}$) de l'amorceur qui exprime la probabilité de l'absorption de la lumière.

Ainsi, pour fabriquer de petits objets avec une bonne résolution verticale, la recherche s'oriente vers des substances chimiques amorçantes à fort coefficient a_λ d'absorption.

2.3. MÉLANGES RÉACTIFS UTILISÉS. — En s'appuyant sur les calculs détaillés en référence [7], nous avons formulé des résines spécifiquement destinées à la microfabrication en jouant sur les facteurs suivants :

on cherche, d'une part à diminuer l'épaisseur polymérisée en diminuant l'épaisseur optique μ du système représenté par :

$$\mu = \frac{1}{\sum_i a_{\lambda_i} c_i} \quad (4)$$

et d'autre part à permettre la réalisation de couches en un temps le plus faible possible. Cela conduit :

- à l'augmentation de la concentration en amorceur jusqu'à 10 % en poids,
- au rajout d'un produit neutre absorbant à la longueur d'émission du faisceau laser,
- à l'utilisation de résines moins réactives et peu visqueuses pour faciliter la mise en place des couches liquides par l'intermédiaire d'une diminution du temps de relaxation nécessaire à l'uniformisation de la surface libre du mélange réactif.

Les produits pour la formulation de ces résines sont :

- le 2,2'-bis [4-méthacryloxy-éthoxy] phényl] propane, connu sous le nom de Diacryl 101 (Akzo Chemicals) comme monomère ;
- la 2,2'-diméthoxy-2-phénylacétophénone (DMPA) (produit Ciba Geigy et Aldrich) comme amorceur ;
- la 2-(2-hydroxy-5-méthyl-phényl)-2H-benzotriazole, connu sous le nom de Tinuvin P (Ciba Geigy) comme absorbeur ;
- le 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA) (Cray Valley-Total). Sa viscosité est 100 fois moins élevée que celle du Diacryl 101 comme monomère de faible viscosité.

3. Intégration d'alliages à mémoire de forme dans une structure de stéréolithographie

La fabrication d'actionneurs tridimensionnels à commande électrique tels que présentés en introduction a été rendue possible par la mise au point d'une méthode spécifique d'insertion et d'intégration de matériaux actifs (AMF) sous forme de fils ou de plaques au sein d'une structure élaborée par SPL ou μ SPL. Cette méthode consiste à prévoir durant la phase de conception et de dessin de la structure SPL, des zones d'ancrage non polymérisées, de dimensions légèrement supérieures à celles du fil ou de la plaque d'AMF à insérer, dans lesquelles sera emprisonné grâce aux tensions superficielles un volume de monomère. On introduit alors l'élément d'AMF dans la structure SPL (*cf.* Fig. 5). Le monomère est assez fluide pour ne pas empêcher cette opération. Une fois l'élément d'AMF correctement positionné dans la structure SPL, on le soumet à une précontrainte mécanique obtenue par exemple à l'aide d'un poids calibré fixé à une

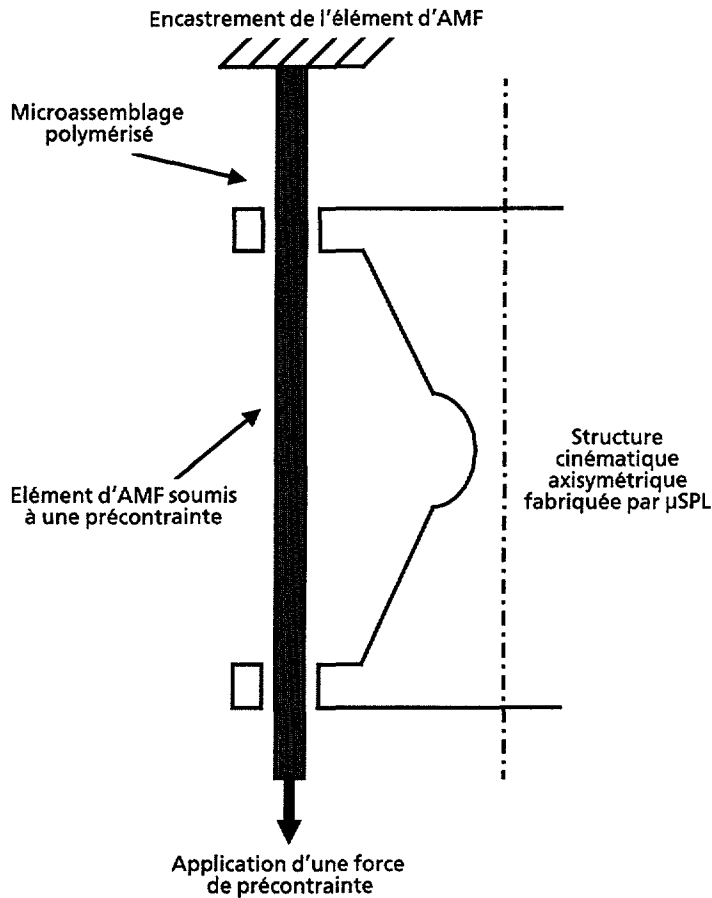


Fig. 5. — Principe d'assemblage d'un fil d'AMF dans une structure SPL.

[Assembly principle of a SMA wire in a SPL structure.]

des extrémités de l'élément d'AMF, l'autre extrémité étant maintenue fixe. Cette étape pourrait bien sûr être nettement améliorée et fiabilisée grâce à une machine de traction soumettant l'élément d'AMF à un effort contrôlé. On effectue alors le collage de l'élément d'AMF avec la structure SPL en plaçant les points d'ancrage sous l'influence d'une source de rayonnement ultra-violet (U.V.). La résine doit être, à l'issue de cette étape de phototransformation, suffisamment polymérisée pour bloquer efficacement l'élément d'AMF. À cette fin, l'application d'un supplément de résine aux points d'ancrage suivie de sa polymérisation, rend plus solidaire le fil de la structure. L'élément d'AMF peut alors subir l'échauffement nécessaire à sa transition de phase austénite-martensite engendrant le déplacement mécanique moteur. Celui-ci peut être induit à l'aide d'une source extérieure de chaleur, d'un faisceau laser ou encore par effet Joule, l'AMF étant un conducteur électrique. Dans cette dernière hypothèse, l'élément d'AMF jouera un rôle résistif et sera inséré dans une boucle de courant. Selon cette approche, les deux extrémités de l'élément d'AMF constituent les pôles électriques à relier à une source extérieure de courant. On peut également envisager la réalisation des contacts électriques par une métallisation locale obtenue par une technique de dépôt métallique (Cu par exemple)

assistée laser [10]. De même, le passage des conducteurs assurant l'excitation de l'élément d'AMF au sein de la structure SPL permet d'optimiser l'encombrement de la partie alimentation électrique (on peut également réaliser ces conducteurs selon la technique de dépôt assistée laser évoquée précédemment, ou encore utiliser de simples fils métalliques isolés électriquement). On se propose également d'intégrer une fibre optique à la structure SPL, afin de servir de capteur suivant le mode de fonctionnement décrit dans la référence [11]. Cela s'effectuera suivant le même principe d'insertion que l'élément d'AMF décrit au début du présent chapitre.

4. Structures actives déformables pour la réalisation d'actionneurs et de capteurs mécaniques

4.1. CONCEPTION DES STRUCTURES MÉCANIQUES. — Des modules élémentaires ont été conçus à partir de la démarche exposée au paragraphe précédent, composés d'une structure déformable à charnières élastiques (*cf.* Fig. 6a) ou à élasticité répartie (*cf.* Figs. 6b et 6c), et de fils d'AMF insérés dans la structure SPL. Celle-ci pourra être de géométrie classique, à deux cônes reliés par une articulation élastique sphérique offrant la mobilité tridimensionnelle recherchée (*cf.* Fig. 6a) ou encore à élasticité distribuée hors de son axe neutre (*cf.* Figs. 6b et 6c), assurant ainsi le rôle de ressort de rappel lors de la phase de transformation martensitique sous contraintes mécaniques des fils d'AMF pour retour à l'état initial. On notera que pour la structure de la figure 6a, cette fonction est presque entièrement tenue par un élément d'AMF symétriquement opposé à l'élément actif intégré à la structure SPL sans subir de précontrainte initiale. Sa mise sous contrainte lors de la déformation de la structure lui confère alors l'énergie mécanique nécessaire à assurer le rôle de ressort de rappel. De plus, une structure symétrique permet, par combinaison d'excitation des fils moteurs, un fonctionnement à multi-degrés de liberté.

Un des avantages remarquables des structures à élasticité distribuée consiste à éviter la concentration localisée de contraintes (cas de la structure à articulation sphérique centrale). Une des conséquences majeures de cette approche réside dans la diminution notable d'effets de fatigue, entraînant une plus grande longévité du module.

D'autre part, les structures à élasticité distribuée ont été conçues pour fonctionner avec un très grand nombre d'éléments d'AMF. Cette démarche a été adoptée afin d'offrir des degrés de liberté multiples par association de différents éléments d'AMF (flexions radiales ou normales, torsions). On met également à profit cette approche afin de faire fonctionner les modules en régime de déplacements calibrés, par seuil, en jouant sur les différentes combinaisons possibles des éléments d'AMF. Enfin, la répartition symétrisée des éléments d'AMF associée à une bonne connaissance des propriétés mécaniques de la structure polymérisée assure la possibilité de fonctionnement en régime de compression, ce qui se traduit par des déplacements de translation suivant la hauteur du module (principalement pour les structures des Figs. 6b et 6c).

Chaque module peut être associé avec des modules identiques à lui-même ou différents par construction directe en stéréolithographie, ou par collage de modules élémentaires en utilisant une étape de polymérisation assistée U.V. Dans le premier cas, les éléments d'AMF pourront être localisés à chaque structure en regroupant plusieurs modules, ceux-ci fonctionnant alors comme éléments de liaison mécanique à fort potentiel de déformation. L'association à cet ensemble de modules d'une fibre optique utilisée comme capteur de déplacement offre alors la possibilité d'asservissement du système. Le principe de cette détection, décrit en référence [11], repose sur la modification du trajet optique au cœur d'une fibre monomode à gradient d'indice, ce qui induit une variation de l'intensité du signal transmis par la fibre proportionnelle au taux de flexion que celle-ci subit. On inclut donc, lors de la fabrication des modules, des espaces destinés aux fibres de détection, sachant que le circuit optique doit être nécessairement fermé

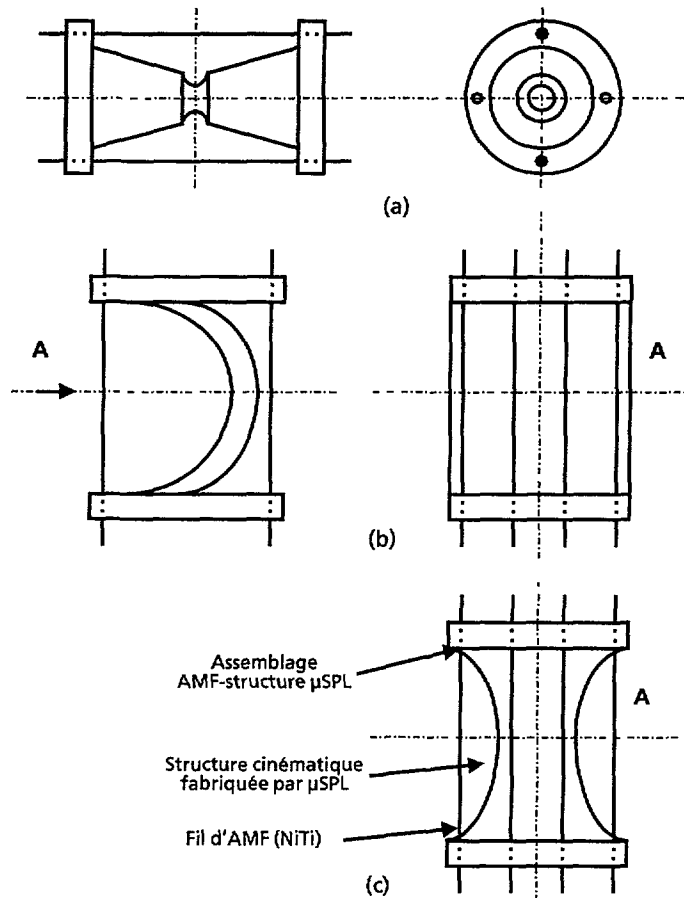


Fig. 6. — Schéma de principe de structures élémentaires SPL à charnière déformable (a) ou à élasticité distribuée (b, c).

[Principle scheme of SPL elementary structures based on liable hinges (a) or distributed elasticity (b, c).]

pour permettre la détection du signal optique (cf. Fig. 7). Dans ce but, on bouclera la fibre à une extrémité de l'actionneur comme sur le premier dessin de la figure 7. Si cela conduit à un rayon de courbure rédhibitoire pour le fonctionnement de la fibre, on métallisera sa section en bout d'actionneur afin de bénéficier de l'effet de réflexion optique totale permettant le transit aller-retour du signal optique dans la même fibre.

4.2. MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE. — Toutes les structures présentées sur la figure 6 ont été fabriquées selon les principes décrits dans les chapitres précédents à l'aide de fils d'AMF (NiTi) de diamètre $120 \mu\text{m}$ produits par A.M.T. n.v.. Dans le but de mesurer facilement leur comportement cinématique, elles ont été associées en série, donnant ainsi lieu à quatre types d'actionneurs différents (un par structure) composés chacun de cinq modules élémentaires. Ceux testés sont présentés sur les photographies de la figure 8 (a, b). Des actionneurs de

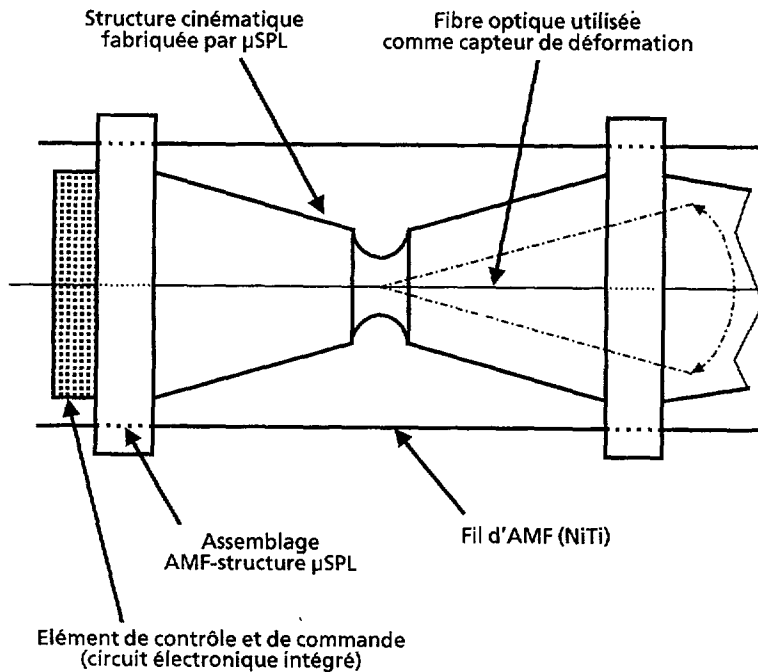


Fig. 7. — Structure élémentaire SPL à charnière déformable intégrant une fibre optique utilisée comme capteur de déplacement.

[SPL elementary structure based on liable hinge with an optical fiber used as displacement sensor.]

section de base de 2 à 4 mm et de longueur égale à 2 cm y sont montrés, après mise en place des fils d'AMF.

On présente maintenant les résultats expérimentaux mesurés sur la structure à charnière déformable de la figure 6a et celle à élasticité distribuée (Fig. 6b). Ces structures passives sont destinées à transformer le mouvement moteur de contraction du fil d'AMF en un déplacement de flexion de grande amplitude. Celui-ci peut alors être mesuré en bout d'actionneur grâce à une sonde à diode laser dont la résolution ultime est de l'ordre du micromètre.

Cette sonde délivre une tension directement proportionnelle au déplacement mesuré ($1 \text{ mV} = 1 \mu\text{m}$), donc très facilement mesurable à l'aide d'un multimètre. L'excitation du fil d'AMF est assuré grâce à une alimentation programmable commandée par un ordinateur qui collecte les informations de temps, de courant dans le fil, de tension imposée et de déplacement de l'actionneur par l'intermédiaire d'un bus série IEEE 488.

Le montage expérimental est présenté figure 9. Le principe de l'expérience consiste à appliquer une tension initiale à l'actionneur, mesurer la déformation résultante, couper l'excitation pour une valeur de déplacement fixée, puis reprendre l'excitation une fois la position initiale retrouvée. On applique ainsi un très grand nombre de cycles à l'actionneur afin de caractériser la dynamique de la structure et sa stabilité par rapport à la durée de l'expérience. Les figures 10a et 10b illustrent les résultats pour chaque module avec une tension d'excitation imposée à 2 volts (générateur de courant).

Les cycles reportés sur ces figures sont extraits d'une série de tests en comportant plusieurs centaines. Les irrégularités des mesures de déplacements sont liées à la lenteur du système

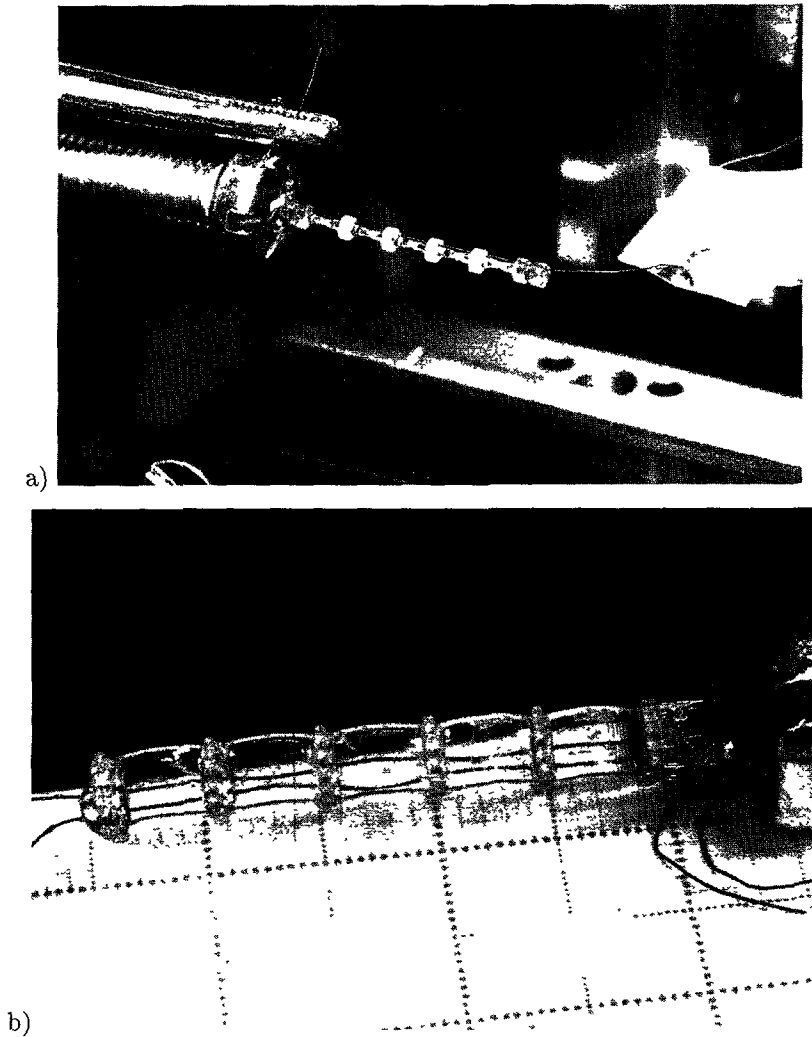


Fig. 8. — Photographies des différents actionneurs SPL-AMF après l'opération d'assemblage du fil d'AMF : a) structure à charnière déformable montée sur banc de mesure, b) structure à élasticité distribuée.

[Photographs of the different SPL-SMA actuators after SMA wire assembly. a) Liable hinge structure placed on the experimental bench. b) Distributed elasticity actuator.]

informatique utilisé ainsi qu'au temps d'intégration du capteur interférométrique nécessaire à l'obtention d'une résolution micrométrique. Des tests effectués à l'aide d'une électronique analogique plus rapide ont montré la fiabilité du système et surtout la reproductibilité des résultats. La dynamique du système, évaluée pour des conditions de fonctionnement données, reste très stable dans le temps, même après plusieurs milliers de cycles appliqués à la structure testée.

La figure 11 (a et b) permet d'évaluer celle-ci pour une excitation de 2 V appliquée au fil d'AMF. Cette figure présente les temps de réponse et de relaxation de chaque actionneur pour un cycle de la tension d'excitation. Ces résultats montrent le rôle joué par les fils d'AMF

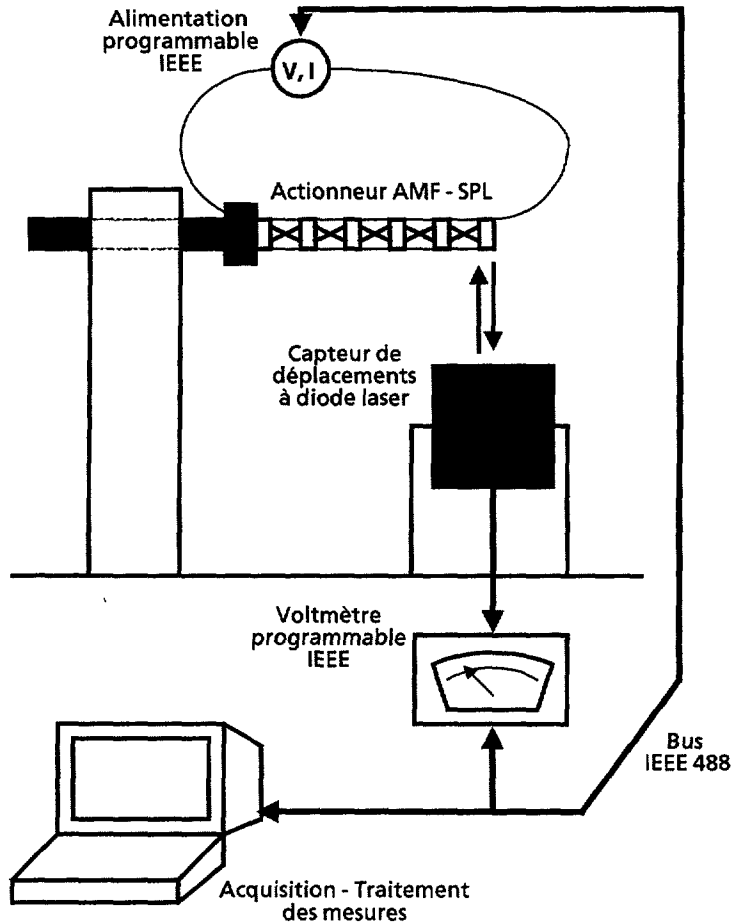


Fig. 9. — Principe du banc expérimental de test des dispositifs AMF-SPL.

[Principle of the experimental bench for testing SMA-SPL devices.]

suivant leur utilisation (moteur et ressort de rappel). Bien que les deux structures ne soient pas comparables en termes de principe de fonctionnement, on comprend aisément au regard des résultats que la réduction des temps de réponse du système dans la phase de retour à la position initiale tient essentiellement à la présence ou non de fils d'AMF intégrés dans la structure μ SPL. Dans le cas du dispositif à charnière déformable, un fil d'AMF considéré comme passif (puisque non alimenté électriquement et non précontraint), intégré à la structure μ SPL de façon analogue au fil moteur, est mis en traction lors de l'excitation de celui-ci, et emmagasine ainsi de l'énergie mécanique. Lorsque l'on coupe cette excitation, cette énergie est dissipée par relaxation des contraintes de traction et le fil fonctionne alors comme un ressort de rappel, contribuant de façon significative à la dynamique du dispositif.

Pour le dispositif à élasticité distribuée, c'est la structure μ SPL seule qui doit effectuer la fonction de ressort de rappel. On note alors sur les mesures effectuées que le temps de retour à l'état initial est pratiquement dix fois supérieur au temps de réponse à l'excitation, alors que les deux étaient quasiment comparables pour le dispositif à charnière déformable.

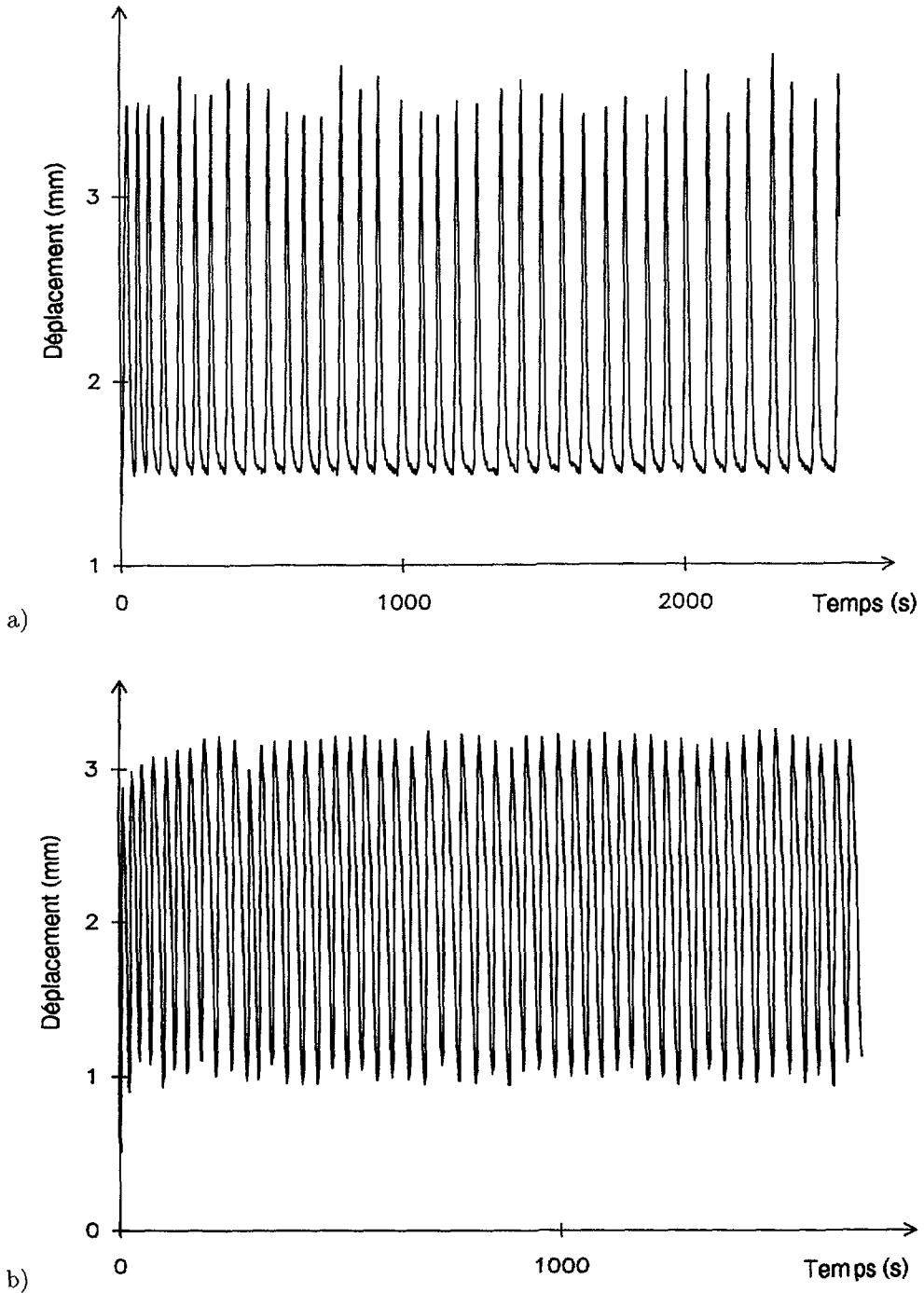


Fig. 10. — Séries de mesures de déplacement des dispositifs à charnière déformable (a) et à élasticité distribuée (b) pour une excitation cyclique de 2 V.

[Displacement measurements performed on liable hinge devices (a) and distributed elasticity devices (b) submitted to a 2 V cyclic excitation.]

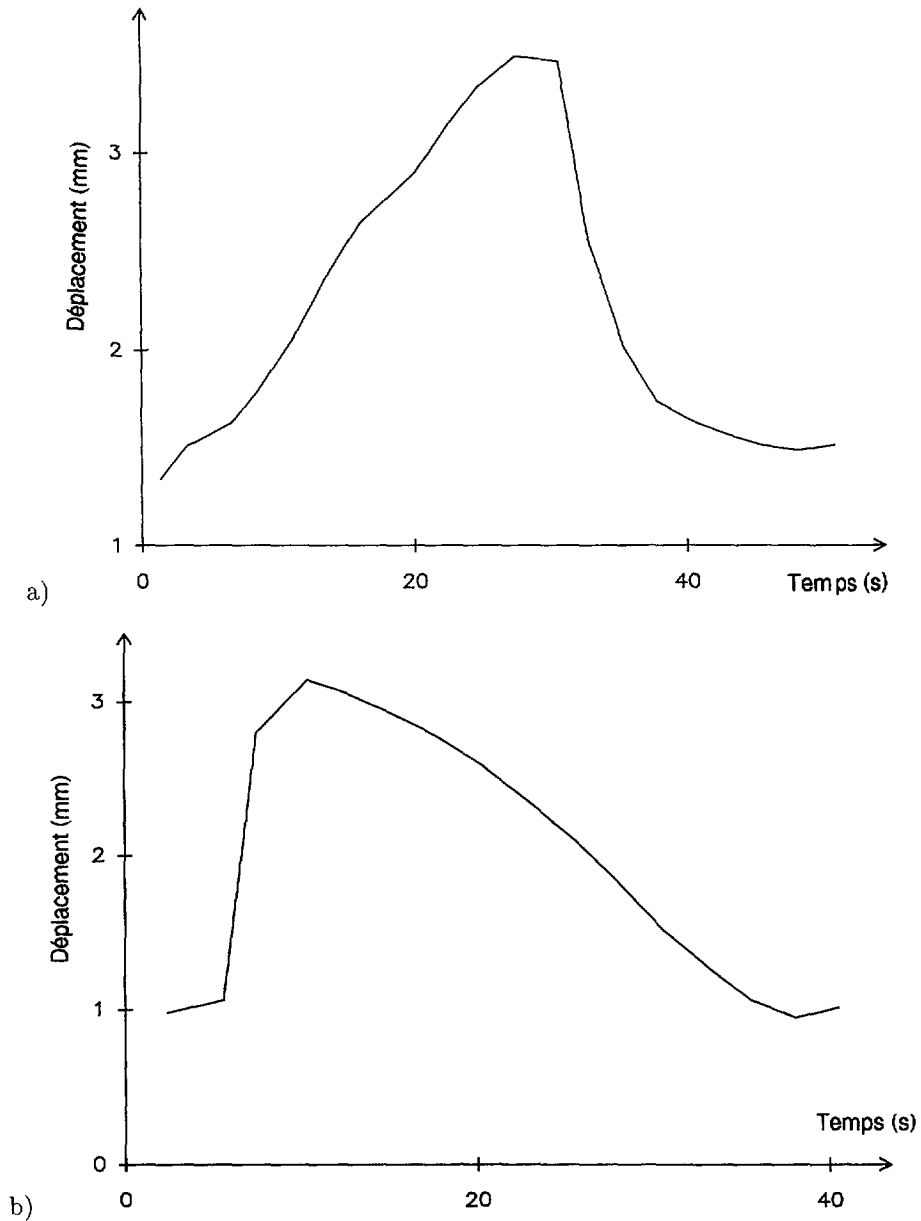


Fig. 11. — Comparaison de la dynamique des dispositifs à charnière déformable (a) et à élasticité distribuée (b).

[Comparison of the dynamic of the liable hinge devices (a) and of the distributed elasticity devices (b).]

Ces observations permettent d'estimer d'un point de vue qualitatif les caractéristiques de fonctionnement de tels dispositifs. Elles donnent cependant un bon aperçu des possibilités d'optimisation disponibles suivant le type d'application souhaitée (dynamique "rapide", larges

déformations, positionnement précis).

Ces données, issues des mesures présentées ci-dessus, sont importantes à plus d'un titre. En effet, elles vont permettre d'évaluer les conditions opératoires effectives, particulièrement au niveau du fil d'AMF qui pourront servir à la modélisation du comportement thermoélastique dynamique de l'actionneur [12].

5. Conclusion

Une nouvelle méthode de fabrication d'actionneurs de très petites dimensions associant des fils d'AMF et des structures SPL a été présentée dans cet article.

Fondée sur un principe de stéréolithographie, cette méthode est bien adaptée aux techniques collectives, même si les premiers prototypes ont été fabriqués à l'unité. L'opération d'assemblage, bien que réalisée "à la main" lors de la mise en œuvre des structures test, est certainement automatisable, conférant ainsi à la fabrication un caractère "industriel" favorable à son développement. Enfin, la maîtrise des propriétés thermomécaniques des AMF et le savoir-faire des fabricants de résines photosensibles impliquant la stabilité des produits dans le temps et l'espace assurent la fiabilité des dispositifs ainsi réalisés.

Des déplacements de plus de 5 mm ont été mesurés lors des expériences menées sur des structures linéiques construites par association série de modules élémentaires. Les mesures ont montré que des déplacement en bout de structure de l'ordre de 15 à 20 % de la longueur totale du composant étaient accessibles avec une fiabilité satisfaisante.

Les possibilités d'asservissement de position grâce à un capteur extérieur ont été testées avec succès. L'intégration du capteur dans la structure permettra de réaliser un objet autonome en termes de contrôle de déplacements.

À partir du montage du banc, on envisage dans un premier temps les applications concernant la réalisation de cathéters ou d'endoscopes à tête active, dont l'extrémité sera constituée d'un composant tel que présenté précédemment, composé de structures montées en série et "actionnables" de telle sorte que le cathéter ou l'endoscope puissent suivre les méandres du conduit ou de la cavité objet de l'inspection. Les applications touchent ici l'analyse non destructive (imagerie biomédicale, inspection et surveillance de conduits en sites hostiles ou microconduits). On considérera ainsi l'actionneur comme élément de base pour la construction de microrobots articulés à plusieurs degrés de liberté.

La fabrication de préhenseurs associant différents actionneurs AMF-SPL est actuellement en cours d'étude. L'objectif est la mise en œuvre d'un outil efficace destiné à des opérations de micro-assemblage et à la manipulation d'objets de très grande fragilité ou de formes très compliquées.

Bibliographie

- [1] Patoor E. et Berveiller M., Technologie des alliages à mémoire de forme, *Traité des Nouvelles Technologies, Série Matériaux* (Éditions Hermès, 1994).
- [2] Bergamasco M., Dario P. and Salsedo F., Shape memory alloy microactuators, *Sens. Actuators A* **21-23** (1990) 253-257.
- [3] Kuribayashi K., Millimeter-sized joint actuator using a shape memory alloy, *Sens. Actuators A* **20** (1989) 57-64.

- [4] Walker J.A., Gabriel K.J. and Mehregany M., Thin film processing of TiNi shape memory alloy, *Sens. Actuators A* **21-23** (1990) 243-246.
- [5] Bush J.D. and Johnson A.D., Shape memory properties in TiNi sputter deposited film, *J. Appl. Phys.* **68** (1990) 6224-6228.
- [6] André J.C. et Corbel S., *Stéréophotolithographie Laser* (Polytechnica, Ed., Paris, 1994).
- [7] Zissi S., Bertsch A., Ballandras S., Corbel S., Jezequel J.Y., Belin C., Lougnot D.J. et André J.C., Limites de la stéréophotolithographie pour des applications microtechniques, 3^{ème} Assises Européennes du Prototypage Rapide (Paris, 5 et 6 oct. 94).
- [8] André J.C., Le Méhauté A. et de Witte O., Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle, brevet français 84 11 241 (enregistré le 16.07.1984).
- [9] Bull H.W., Apparatus for production of three dimensional objects by stereophotolithography, US patent 4 575 330 (filed 08.08.1984).
- [10] Chassaing J., Jézéquel J.Y., Corbel S. et André J.C., Métallisation résolue dans l'espace induite par laser, 4^{ème} Assises Européennes du Prototypage Rapide (Paris, 1995).
- [11] Lisbõa O. and Jen C.K., An optical-fiber bending sensor using two-mode fibers with an off-center core, *Smart Mater. Struct.* **3** (1994) 164-170.
- [12] Tanaka K., Nishimura F., Hayashi T., Tobushi H. and LExcellent C., Phenomenological analysis on subloops and cyclic behaviour in shape memory alloys under mechanical and/or thermal loads, *Mechan. Mater.* **19** (1995) 281-292.