
Création de structures à précontrainte adaptative à base d'alliages à mémoire de forme

A. Waibaye^{1,3}, X. Balandraud^{2,3}, J.F. Destrebecq^{1,3}

¹ Clermont Université, Université Blaise Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand

² Clermont Université, IFMA, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand

³ CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière

RÉSUMÉ. L'étude porte sur l'utilisation de fils en alliage à mémoire de forme (AMF) pour créer des systèmes mécaniques actifs. Il s'agit en pratique de contrôler l'état de contrainte ou de déformation d'une structure par activation thermique de l'effet mémoire de fils AMF connectés à la structure. Un point clé consiste à n'utiliser que des fils AMF classiques, i.e. à effet mémoire simple-sens, pour créer une activation à double-sens de la structure. Trois dispositifs sont développés et étudiés. Dans un premier temps, le cas simple de deux fils AMF placés en série est considéré. Le chauffage des fils est assuré par effet Joule. Ce dispositif permet d'analyser comment deux fils à effet mémoire simple-sens peuvent interagir pour permettre le pilotage double-sens d'un déplacement. Le cas d'une poutre console équipée de fils AMF est ensuite considéré. Il est montré qu'il est possible de contrôler en temps réel la flèche de la poutre par un chauffage sélectif des fils. Enfin, le cas d'une poutrelle sur deux appuis et soumise à une charge mobile est étudié. Une limitation en temps réel de la valeur de la flèche a été possible en utilisant un unique fil AMF précontraint. Cette étude montre que des AMF peuvent être utilisés pour contrôler l'état de déformation d'une structure ou d'adapter un état de précontrainte en fonction d'une variation de charge.

ABSTRACT. This study deals with the use of shape-memory alloy (SMA) wires to create active mechanical systems. The objective is to control the stress and strain state in the structure by thermal activation of the memory effect of the wires placed on the structure. A key-point is the use of classical SMA, i.e. with one-way memory effect, to create a two-way activation of the structure. Three devices have been developed. First, the simple case of two SMA wires placed in series was considered. The heating was performed by Joule effect. The demonstrator enabled us to analyse how two one-way SMA wires can interact to allow a two-way control in displacement. The case of a cantilever beam equipped with SMA wires was then considered. By selective heating of the wires, it was possible to control in real-time the deflection of the beam. Last, a supported beam subjected to a mobile load was studied. A unique SMA wire was used to limit the deflection of the beam during the load displacement. This study shows the ability to control the strain state in a structure or to adapt the prestress state as a function of the load variation by using shape memory alloys.

MOTS-CLÉS : alliage à mémoire de forme, structure active, précontrainte adaptative, recouvrement de déformation.

KEY WORDS: shape memory alloy, active structure, adaptive prestress, strain recovering.

1. Introduction

Les alliages à mémoire de forme (AMF) présentent des propriétés thermomécaniques particulières telles que la super-élasticité, l'effet mémoire et un fort pouvoir d'amortissement. Il existe différents types d'effet mémoire selon le traitement thermomécanique préalable de l'AMF. L'effet mémoire simple-sens, caractérisé par une seule géométrie mémorisée par le composant, existe pour tous les AMF. L'effet mémoire double-sens, caractérisé par deux géométries mémorisées par le composant, est plus délicat à obtenir et ne permet pas une utilisation durable de l'AMF (plasticité). D'une manière générale, la réponse d'un AMF est gouvernée par la contrainte mécanique et la température qui lui sont appliquées. Le phénomène physique à la base de ces propriétés est un changement de phase solide-solide. Les AMF ont trouvé des applications dans divers domaines tels que l'aéronautique, le biomédical et la robotique, et à un moindre niveau en génie civil [SON 2006]. En particulier, l'utilisation des AMF en tant qu'actionneurs mécaniques a été étudiée dans la littérature [HUA 02, SIL 07, SCI 11, SUN 13]. Dans la présente étude, on cherche à utiliser des fils d'AMF à effet mémoire simple-sens pour la création de structures actives capables de contrôler leur état de précontrainte et de déformation.

L'activation thermique de l'effet mémoire de fils d'AMF connectés à une structure permet de créer des forces dans celle-ci et de la déformer. Dans un premier temps, on montre qu'il est possible de créer des dispositifs ayant un fonctionnement à double-sens à l'aide de fils AMF simple-sens. Le principe consiste à utiliser plusieurs fils de manière à permettre une compensation de la déformation d'un fil par rapport à un autre. Plusieurs dispositifs sont conçus et étudiés dans le cadre de cette étude. Un premier démonstrateur, simplement constitué de deux fils AMF placés en série, permet de poser les bases pour les autres démonstrateurs. Un deuxième dispositif consiste en une poutre console équipée de fils d'AMF disposés en parallèle de manière à contrôler sa flexion. Enfin, un troisième dispositif consiste à contrôler la flèche d'une poutre soumise à une charge mobile au moyen d'un système de précontrainte ajustable à base de fils d'AMF. Dans ces deux derniers cas, un pilotage en temps réel permet le contrôle de la précontrainte et de la déformation. On montre ainsi la possibilité d'utiliser des fils AMF simple-sens pour créer une précontrainte active permettant de s'adapter à l'état de chargement de la structure, et ainsi limiter les contraintes ou les déformations à un niveau acceptable prédéfini (« précontrainte adaptative »).

2. Création de systèmes actifs double-sens à l'aide de fils à effet mémoire simple-sens

Le comportement mécanique des AMF est gouverné par la contrainte et la température. Les phases « haute température » et « basse température » sont nommées respectivement *austénite* (A) et *martensite* (M). La figure 1-a présente la réponse d'un AMF initialement austénitique sollicité en traction isotherme uniaxiale. La transformation martensitique débute lorsque la contrainte entre dans le domaine de transformation de phase A→M. Sur le diagramme contrainte-déformation, cette transformation correspond à la droite d'inclinaison $\alpha < E$, où E est le module d'Young à l'état austénitique. Le déchargement s'effectue selon une droite sensiblement parallèle à la droite élastique initiale. Il s'ensuit que la relation contrainte-déformation s'écrit de la manière suivante dans le cas uniaxial

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{tr} \quad [1]$$

ε_{tr} est la déformation de transformation résultant de la formation de martensite orientée (c'est-à-dire la martensite créée par la contrainte, par opposition à la martensite « auto-accommodante » qui est créée par variation de température et qui n'est pas associée à une déformation). ε_{tr} est conservée en cas de déchargement à température constante si la température de début de transformation M→A est plus haute que la température ambiante [DES 10]. Par contre, elle s'annule progressivement si l'on élève la température. Le matériau retrouve alors sa forme initiale, ce qui correspond à l'effet mémoire de forme « simple sens ».

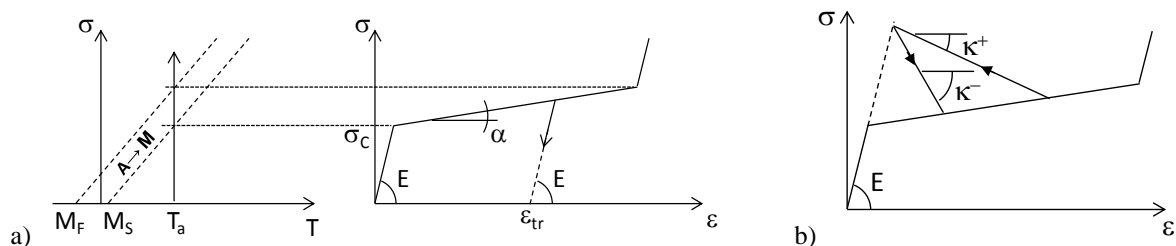
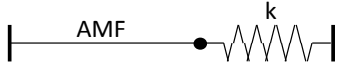
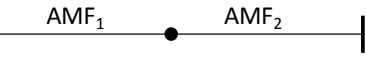
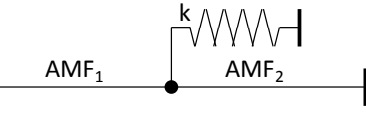


Figure 1. Représentation schématique du comportement d'un AMF en traction uniaxiale, a) comportement isotherme, b) comportement dans un système actif soumis à un cycle chauffage-refroidissement.

On cherche à créer des systèmes actifs « double sens » à l'aide de fils d'AMF à effet mémoire « simple sens ». Pour cela, les fils sont montés en opposition avec un autre composant capable de produire un effort de rappel (voir tableau 1), avant d'être pré-étirés pour les mettre dans un état de martensite orientée. Dans le cas (1), la force de rappel est produite par un composant élastique schématisé par un ressort. Le chauffage de l'AMF cause son raccourcissement par effet mémoire, ce qui entraîne une augmentation de la force dans le fil et le ressort ainsi que le déplacement du point milieu. Au refroidissement, l'AMF revient à son état de martensite orientée et le point milieu retrouve sa position initiale sous l'effet de la force restituée par le ressort. Dans le cas (2), la force de rappel est produite par un autre fil d'AMF placé en opposition. En chauffant le fil gauche, on annule sa déformation martensitique qui vient s'ajouter par compensation à celle du fil droit. En chauffant et refroidissant alternativement les deux fils, on provoque ainsi le déplacement alterné du point milieu ainsi qu'une variation cyclique de la force dans le système. Enfin, le cas (3) est une généralisation des deux systèmes précédents.

Tableau 1. Principes des systèmes étudiés, avec modules au chauffage (κ^+) et au refroidissement (κ^-).

| | | |
|-----|---|--|
| (1) |  | $\kappa^+ = \kappa^- = -\frac{k L_f}{A}$ |
| (2) |  | $\kappa^+ = -\alpha \quad \kappa^- = -E$ |
| (3) |  | $\kappa^+ = -\left(\alpha + \frac{k L_f}{A}\right) \quad \kappa^- = -\left(E + \frac{k L_f}{A}\right)$ |

L'analyse de ces modèles élémentaires conduit à l'évolution représentée sur la figure 1-b de l'état mécanique du fil « moteur » pour un cycle de chauffage-refroidissement. La réponse mécanique du fil s'écrit dans ce cas :

- au chauffage :
$$\Delta\sigma = \kappa^+ \Delta\varepsilon \quad [2]$$
- au refroidissement :
$$\Delta\sigma = \kappa^- \Delta\varepsilon \quad [3]$$

où $\Delta\sigma$ et $\Delta\varepsilon$ sont les incréments de contrainte et de déformation respectivement, et où κ^+ et κ^- sont les rigidités lors d'un cycle chauffage-refroidissement (voir figure 1-b). Le tableau 1 donne les expressions de κ^+ et κ^- pour les trois systèmes mis en œuvre dans ce qui suit.

3. Premier démonstrateur utilisant deux fils AMF en séries

3.1 Principe du dispositif

Le dispositif est présenté sur la figure 2-a. Il est constitué de deux fils AMF simple-sens placés en série, ce qui correspond au cas 2 du tableau 1. Un capteur de force est placé entre les deux fils. Ce capteur est monté de manière à accompagner le déplacement du « point milieu » causé par les allongements/contractions des deux fils. Un capteur de déplacement LVDT permet de mesurer ce déplacement. Les fils sont initialement austénitiques. Aux deux extrémités du dispositif, un système de vis permet d'imposer l'écartement des ancrages afin de provoquer une prédéformation des deux fils afin de les mettre dans un état de martensite orientée.

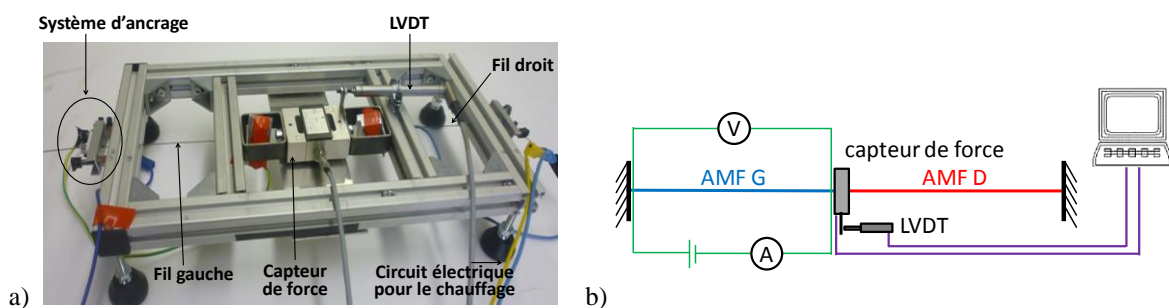


Figure 2. Premier dispositif : a) photo du dispositif réalisé, b) schéma de principe du dispositif avec son instrumentation.

Le fonctionnement du système est basé sur le retour provoqué de l'un des fils à sa longueur initiale. Ceci est obtenu en activant l'effet mémoire par chauffage du fil. Sous l'effet de l'élévation de température, le fil revient à son état initial austénitique, ce qui provoque le retour à sa forme – c'est-à-dire sa longueur – initiale. Cette contraction provoquée est compensée par un allongement du second fil qui « récupère » ainsi la déformation de transformation annulée par l'élévation de température dans le premier fil. En répétant cette procédure de manière cyclique entre les deux fils, on provoque le déplacement alterné du point milieu. Il est à noter que le chauffage des fils est effectué par effet Joule (figure 2-b). Un voltmètre et un ampèremètre permettent de mesurer la tension et l'intensité du courant électrique dans le fil chauffé. Les capteurs de force et de déplacement permettent de suivre l'évolution de la force de traction dans les fils et du déplacement du point milieu.

3.2 Comportement observé

La figure 3-a montre l'évolution de la force F dans les fils en fonction du déplacement ΔL du point milieu pour deux cycles de fonctionnement. La figure 3-b montre l'évolution de F et de ΔL au cours de ces deux cycles. Au chauffage du fil de gauche (du point A au point B), celui-ci revient à l'état austénitique : la martensite orientée présente initialement se transforme en austénite. On voit sur la figure que ceci s'accompagne d'une augmentation de la force dans les fils. En effet, le fil de gauche se raccourcit pour revenir à sa forme initiale (effet mémoire). On voit effectivement sur la figure 3-a que le point milieu se déplace vers la gauche (de la position 0 à la position -2.8 mm). La longueur totale des deux fils étant constante, ceci se traduit par un allongement du fil de droite qui poursuit donc sa transformation en martensite orientée. Au retour à température ambiante du fil de gauche (point B au point C), on observe une diminution de la force dans les fils et un déplacement du point milieu vers la droite dû à une reformation de martensite orientée dans le fil de gauche sous l'effet de cette force. On note toutefois que le système ne revient pas à la position initiale : un déplacement résiduel est obtenu (point C à -1,38 mm). Un comportement symétrique est ensuite observé lors du chauffage puis du retour à l'ambiante du fil de droite. Le même schéma se reproduit pour le deuxième cycle (trait pointillé sur la figure 3-a). Ce comportement donne une courbe en « ailes de papillon », avec un léger écart entre le premier cycle (trait plein) et le second cycle (trait pointillé). On observe également que les deux ailes ne sont pas parfaitement symétriques (positions extrêmes : -2.8 mm et +2.2 mm).

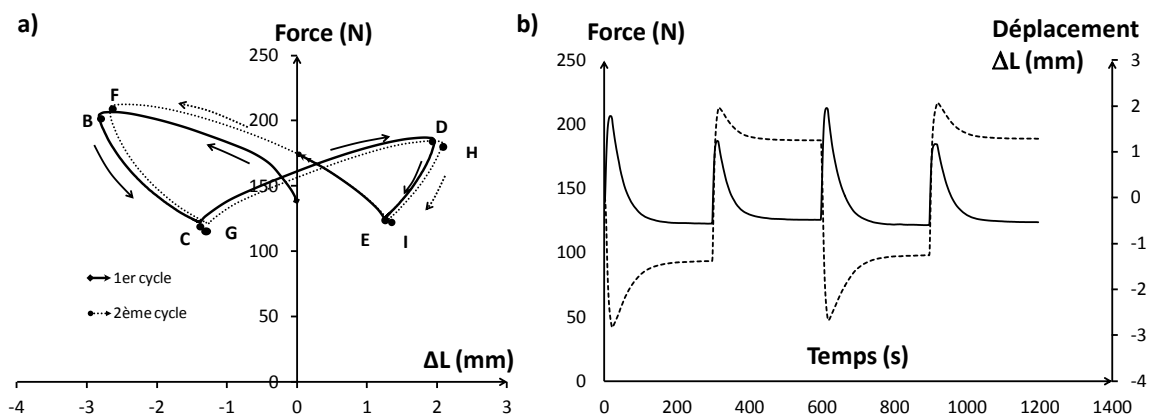


Figure 3. Comportement du premier dispositif : a) force de traction F dans les fils en fonction du déplacement ΔL du point milieu, b) évolutions de la force (trait plein) et du déplacement du point milieu (trait pointillé) au cours des deux cycles chauffage-refroidissement.

4. Deuxième dispositif constitué d'une poutre-console couplée à deux paires de fils d'AMF

4.1 Description du dispositif

La figure 4-a montre le dispositif comprenant deux paires de fils AMF simple-sens placés en parallèle avec une poutre-console en acier à section rectangulaire. Les fils sont placés par paire dans chaque plan principal d'inertie de la barre, de façon symétrique et équidistante par rapport à sa ligne moyenne. Comme pour le premier dispositif, les fils initialement austénitiques sont d'abord précontraints de manière à les transformer partiellement en martensite orientée. Une force transversale peut être appliquée à l'extrémité de la poutre par un système fil-poulie-masse. Un capteur de déplacement LVDT permet de mesurer la flèche de la poutre à son extrémité.

Dans un premier temps, de manière similaire au premier dispositif, on procède à des cycles de chauffage-refroidissement des paires de fils de manière alternée. Le fil chauffé se raccourcit du fait de son retour à l'état

austénitique (effet mémoire). Ceci provoque la flexion de la barre et l'étirement du fil antagoniste qui récupère ainsi la déformation martensitique annulée dans le fil chauffé. Au refroidissement, la barre fléchit et le fil resté martensitique exerce une force de rappel sur le premier fil, ce qui ramène le système vers son état initial. Ce mode de fonctionnement correspond au cas 3 du tableau 1. Un comportement cyclique est obtenu en répétant cette procédure de manière alternée entre les deux fils antagonistes.

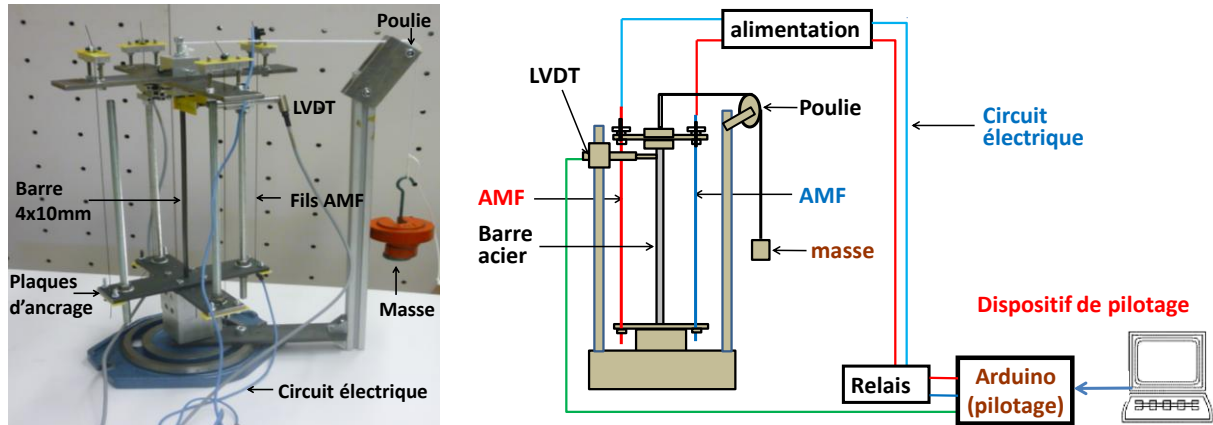


Figure 4. Deuxième dispositif : a) photo et b) schéma de principe du dispositif avec son système de pilotage.

Une fois le dispositif mis au point, on lui adjoint un système de pilotage (figure 4-b). Ce système utilise un processeur programmable Arduino connecté à un relais qui commande l'alimentation électrique des fils. Le système est programmé pour vérifier en permanence le déplacement de l'extrémité de la poutre console à l'aide du capteur LVDT. La décision d'alimenter les fils d'AMF électriquement pour activer l'effet mémoire par effet Joule dépend de la comparaison de la flèche actuelle à une consigne fixe ou variable préalablement définie. On peut ainsi, soit imposer à la flèche de suivre une trajectoire prescrite, soit imposer qu'elle reste dans une plage préalablement définie quelque soit l'intensité du chargement mécanique variable.

4.2 Mise en œuvre et discussion

Pour l'analyse de son fonctionnement, le dispositif est mis en œuvre en deux étapes. Dans un premier temps, il est utilisé sans le système de pilotage. Trois configurations de chargement sont considérées : 0 N, 5 N et 10 N appliqué dans le plan de symétrie de la poutre selon sa plus grande inertie. Une seule paire de fils AMF (noté fils 1 et 2 dans la suite) sont activés de manière à faire varier la flèche de la poutre dans ce plan.

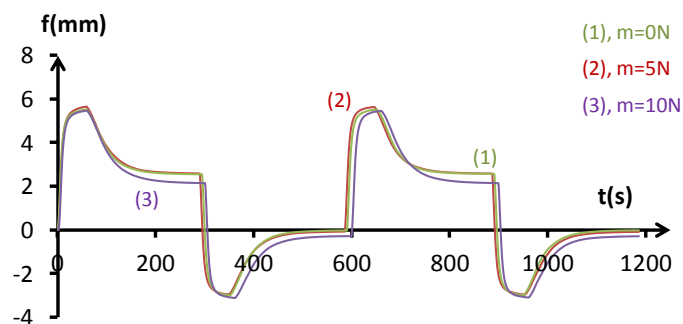


Figure 5. Comportement du deuxième dispositif - évolution de la flèche pour deux cycles de chauffage-refroidissement : (1) sans charge, (2) avec une charge de 5 N, (3) avec une charge de 10 N (flèche mesurée à partir de la position initiale sous charge avant activation thermique de l'effet mémoire).

La figure 5 présente l'évolution de la flèche en fonction du temps pour les trois niveaux de chargement. Dans chaque cas, la flèche est mesurée à partir de la position initiale sous charge avant activation thermique de l'effet mémoire dans les fils d'AMF. En l'absence de charge ($m = 0N$), le comportement observé durant le premier cycle de chauffage-refroidissement est le suivant. La flèche évolue de 0 à 5.5 mm lors du chauffage du fil 1. Cette évolution de flèche est provoquée par la transformation inverse ($M \rightarrow A$) dans le fil 1 ; elle s'accompagne de la poursuite de la transformation directe ($A \rightarrow M$) dans le fil 2 du fait de son étirement provoqué par la rotation de

l'extrémité de la poutre-console. Au retour à température ambiante du fil 1, la flèche diminue et revient à la valeur 2,54 mm. Cette diminution de la flèche s'accompagne d'un retour partiel du fil 1 en martensite orientée sous l'effet du rappel élastique exercé par la barre. La deuxième partie du cycle correspond au chauffage du fil 2 qui provoque une flèche de -2,98 mm, avec cette fois un transfert de la déformation martensitique du fil 2 vers le fil 1. Le retour à température ambiante provoque cette fois l'annulation de la flèche et un retour partiel du fil 2 en martensite orientée. Le même comportement se répète au cours du deuxième cycle. On observe également que la réponse du dispositif n'est pas modifiée par la présence d'une charge ($m = 5\text{N}$ ou $m = 10\text{N}$). Cette première étape démontre la possibilité de créer un dispositif de précontrainte adaptative, pouvant être activé de manière répétitive par activation thermique alternée de l'effet mémoire dans les fils d'AMF.

Dans un deuxième temps, le dispositif est mis en œuvre avec le système de pilotage. Il s'agit cette fois de suivre une consigne en déplacement en présence d'une charge constante. En pratique, le système de pilotage mesure en temps réel l'écart entre la flèche actuelle et la flèche variable prescrite (consigne C). En fonction de cet écart, il sélectionne le fil à chauffer de manière à activer l'effet mémoire dans ce fil afin de réduire cet écart en provoquant une variation du moment fléchissant dans la barre. A titre d'illustration, on considère ici uniquement un cas de flexion droite avec une seule paire de fils AMF à activer.

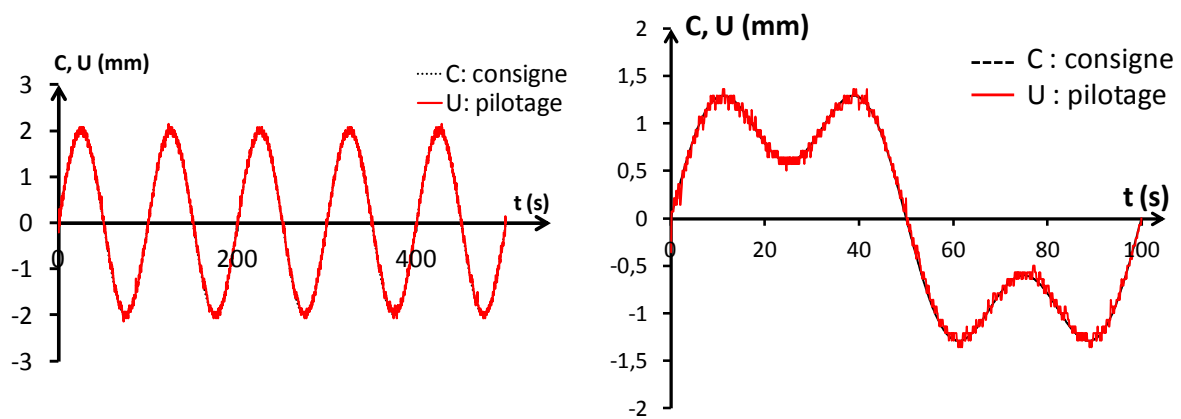


Figure 6. Résultats obtenus avec le deuxième dispositif avec pilotage de la flèche en temps réel, pour deux consignes périodiques différentes imposées.

La figure 6 présente les résultats obtenus pour le contrôle de la flèche à l'extrémité de la barre pour deux consignes périodiques U différentes. On observe la parfaite coïncidence entre la flèche prescrite C et la flèche U réalisée par le pilotage. Cette flèche suit la consigne avec une très bonne précision, de l'ordre de $\pm 0,02$ mm. Ce deuxième dispositif démontre la possibilité de piloter l'état mécanique d'une structure en contrôlant un dispositif de précontrainte adaptative fondé sur l'activation thermique l'effet mémoire dans des composants en AMF.

5. Troisième dispositif : poutrelle avec précontrainte adaptative

5.1 Description du dispositif

Il s'agit maintenant d'utiliser les principes mis au point dans les sections précédentes pour créer une structure à précontrainte adaptative capable d'autoréguler son état mécanique. La figure 7 présente le dispositif expérimental réalisé. Il s'agit d'une poutrelle métallique isostatique équipée de câbles en acier prolongés de fils d'AMF excentrés pour créer une sollicitation de précontrainte. La poutrelle est un profilé en alliage d'aluminium de section $30 \times 30 \text{ mm}^2$. La distance entre les deux appuis est de 2700 mm. Les câbles en acier couvrent les $5/6^{\text{ème}}$ de la portée. Une charge verticale mobile est appliquée à la poutrelle, ce qui provoque une flèche mesurée à mi-portée à l'aide d'un capteur LVDT. Comme précédemment, les fils AMF sont initialement austénitiques. La mise en précontrainte initiale est réalisée en déplaçant l'ancrage des fils de manière à les étirer et à les transformer partiellement en martensite orienter avant de débiter les essais. Il est à noter que la déformation de la poutrelle durant cette phase de pré-étirement des fils AMF doit être prise en compte. Le modèle (1) du tableau 1 est utilisé pour connaître le niveau de pré-étirement dans les fils AMF à partir de la connaissance de la flèche à mi-travée. Le système de pilotage mis au point à la section précédente est utilisé pour le contrôle de la structure.

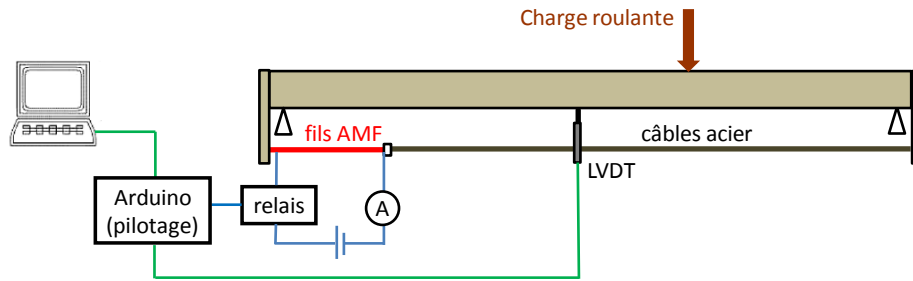


Figure 7. Troisième dispositif : poutrelle avec système de pilotage de la précontrainte adaptative.

Deux types d'essais sont réalisés :

- tout d'abord, on applique simplement un cycle de chauffage et retour à l'ambiante des fils d'AM, sans utiliser le système de pilotage. Deux cas sont traités : sans charge, et avec une charge fixe de 25 N puis de 50 N à mi-portée ;
- ensuite, on considère le cas d'une charge de 40 N se déplaçant sur la poutrelle à vitesse constante. Trois passages sont successivement effectués. Au premier passage, on déplace la charge mobile sans activer le système de chauffage des fils d'AMF : on obtient ainsi une courbe de référence pour l'évolution de la flèche à mi-portée en fonction de la position de la charge mobile. Ceci permet de connaître la valeur de la flèche maximale à mi-travée sous précontrainte constante (-5,5 mm). Pour les deux autres passages de la charge sur la poutrelle, on impose une valeur limite de flèche à ne pas dépasser à mi-travée (-3 mm dans le cas illustré ci-dessous). Le contrôle de la flèche se fait à l'aide du système de pilotage qui adapte automatiquement le niveau de précontrainte par activation thermique de l'effet mémoire dans les fils d'AMF, en fonction de la flèche actuelle mesuré par le capteur LVDT à mi-portée.

5.2 Résultats et discussion

La figure 8-a montre l'évolution de la flèche mesurée à mi-travée lors du cycle de chauffage-refroidissement des fils d'AMF, dans trois configurations : sans charge extérieure, puis avec une charge de 25 N ou une charge de 50 N placée à mi-portée. Dans les deux cas, la flèche est donnée à partir de la position après application de la charge, avant l'activation thermique de l'effet mémoire des fils AMF.

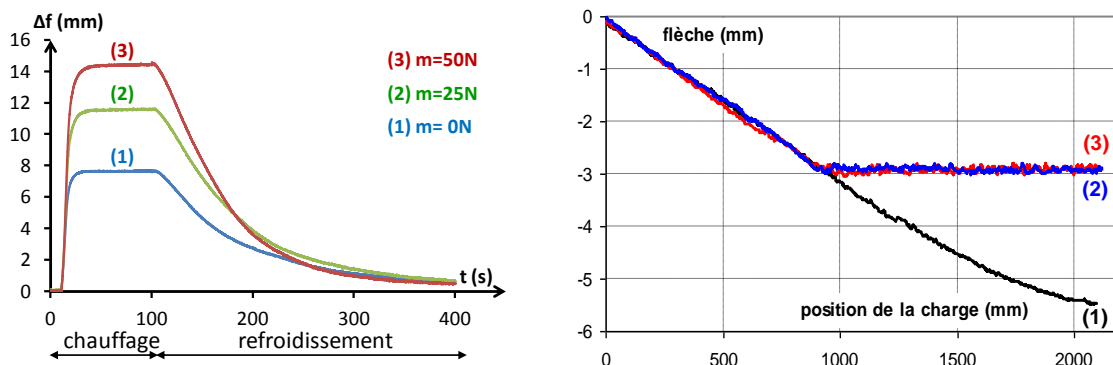


Figure 8. Résultats obtenus avec le troisième dispositif : a) variation de la flèche à mi-portée au chauffage et retour à l'ambiante des fils AMF, b) variation de la flèche à mi-portée en présence d'une charge mobile sur la poutrelle. Pour la courbe (1), il n'y a pas de contrôle de la flèche. Pour les courbes (2) et (3), le système limite la variation de la flèche à -3 mm.

En l'absence de charge, on observe que le chauffage provoque une augmentation de la flèche due au raccourcissement des fils. Ceci crée une variation de l'état de contrainte dans la poutrelle. Au retour à la température ambiante, de la martensite réapparaît dans les fils sous l'effet de la force de rappel élastique exercée par la poutrelle déformée. La progression est assez lente et dépend des conditions de refroidissement (échange avec l'air par convection dans le cas présent). On observe que la flèche s'annule au retour à l'ambiante. Lorsque l'on applique une charge fixe de 25N à mi-portée, on observe qu'au chauffage des fils, la structure subit une variation de flèche plus importante de 10 mm. La différence avec le cas précédent sans charge est due à une quantité plus importante de martensite avant de démarrer la phase de chauffage (à la mise en place de la charge,

une augmentation du moment se produit dans la poutrelle, ce qui provoque une augmentation de la force dans les fils, d'où un complément d'étirement qui augmente la quantité de martensite orientée dans les fils d'AMF). Il y a donc plus de martensite à transformer en austénite dans le cas avec la charge de 25 N, donc plus de déformation à « récupérer » lors du chauffage de l'AMF. Ce phénomène est amplifié dans le cas de la charge de 50 N. Au retour à la température ambiante, on retrouve la phase d'annulation progressive de la flèche, comme dans le cas sans charge.

La figure 9-b présente l'évolution de la flèche à mi-portée de la structure précontrainte en fonction de la position de la charge mobile de 40 N (du fait de la symétrie, seule la moitié de la poutre est représentée). Pour la courbe (1), il n'y a pas de contrôle de la flèche (pas d'utilisation du système de chauffage des fils d'AMF) : on observe que la flèche augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur maximale de -5,49 mm lorsque la charge passe à mi-portée. La même figure montre également la réponse de la structure lorsque le système de pilotage est activé, avec une limitation de la flèche maximale à mi-travée fixée à -3 mm. On observe que le respect de cette consigne est bien assuré par le système de pilotage. Le dispositif arrive donc à autoréguler en temps réel la déformation de la poutrelle.

6. Conclusion

L'étude réalisée a permis de montrer la possibilité de créer des systèmes de précontrainte adaptative à base de fils d'AMF à effet mémoire simple-sens. Les trois dispositifs développés ont permis de mettre en évidence les mécanismes essentiels qui régissent leurs comportements. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Pour le cas de deux fils en séries, le déplacement du point milieu est obtenu par activation thermique de l'effet mémoire de manière alternée entre les deux fils d'AMF. Ce déplacement s'accompagne d'une évolution de la force dans les fils. On constate une conservation de la quantité totale de martensite orientée. Cette propriété importante constitue la base des systèmes actifs à effet double-sens.
- Dans le cas de la poutre-console associée aux fils en parallèle, la déformation de la structure est provoquée par activation thermique de l'effet mémoire dans les fils d'AMF. Cette déformation se produit même si la structure supporte un chargement extérieur. Le système de pilotage a permis de faire exécuter à la structure des trajectoires conformes à des consignes de formes diverses. Ces consignes peuvent être exécutées par la structure même si une charge lui est appliquée.
- Finalement, l'application de ces principes au cas d'une poutrelle a montré la possibilité de créer un dispositif de précontrainte adaptative basé sur l'utilisation de fils d'AMF à effet mémoire simple-sens. Dans ce cas, c'est le couple de rappel élastique exercé par la poutrelle déformée qui permet de maintenir la quantité de martensite orienté nécessaire au fonctionnement du système. Le dispositif de pilotage, basé sur le contrôle de la flèche à mi-portée, permet à la structure de s'autocontrôler en ajustant la précontrainte en temps réel de manière à respecter une flèche limite préalablement définie.

7. Bibliographie

- [DES 10] DESTREBECQ J.F., BALANDRAUD X., « Interaction between concrete cylinders and shape-memory wires in the achievement of active confinement », in *Advanced Structured Materials, vol.3, Materials with Complex Behaviour*, Berlin Heidelberg, Springer Ed., August 2010, p.19-34.
- [HUA 02] HUANG W., « On the selection of shape memory alloys for actuators », *Materials and Design*, vol.23, 2002, p.11-19.
- [SCI 11] SCIRE MAMMANO G., DRAGONI E., « Increasing stroke and output force of linear shape memory actuators by elastic compensation », *Mechatronics*, vol.21, 2011, p.570-580.
- [SIL 07] SILVA D., « Beam shape feedback control by means of a shape memory actuator », *Materials and Design*, vol.28, 2007, p.1592-1596.
- [SON 06] SONG G., MA N., LI H.N., « Applications of shape memory alloys in civil structures », *Engineering Structures*, vol.28, 2006, p.1266-1274.
- [SUN 13] SUN L., HUANG W. M., DING Z., ZHAO Y., « Stimulus-responsive shape memory materials: a review », *Materials and Design*, vol.33, 2012, p.577-640.