

Mécanisme plan piloté par six fils en alliage à mémoire de forme : analyse numérique de l'actionnement hystérétique et multi-antagoniste

R. Boufayed^a, F. Chapelle^a, X. Balandraud^a, J.-F. Destrebecq^a

a. Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont,
Institut Pascal, 63000 Clermont-Ferrand, France

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudier numériquement, via un logiciel de calcul par éléments finis, un mécanisme plan à trois degrés de liberté indépendants piloté par six fils en alliage à mémoire de forme (AMF). Il s'agit d'exploiter la propriété de mémoire de forme simple-sens, qui est activée thermiquement. L'analyse se focalise sur deux aspects qui interagissent de manière complexe : l'impact de l'« histoire » du séquençage d'activation thermique, et le caractère « multi »-antagoniste de l'actionnement des fils. En effet, les AMF présentent une hystérésis de transformation dépendant du trajet thermomécanique suivi. Le problème est d'autant plus complexe quand on considère un système impliquant plus de deux fils AMF antagonistes, interagissant tous les uns avec les autres. L'influence de l'effet d'histoire a pu être mise en évidence et évaluée. Bien que le mécanisme étudié s'apparente géométriquement à un robot à (six) câbles, le caractère hystérétique et multi-antagoniste rend délicat la modélisation d'un tel système. La conception du modèle inverse du mécanisme n'a pas encore été abordée, mais des cas simples de positionnement ont été mis en œuvre de manière empirique.

Abstract :

The objective of this work is to study numerically a planar mechanism with three independent degrees of freedom driven by six shape memory alloy (SMA) wires, where thermal activation of the one-way memory effect is employed. A finite-element calculation software was used for this purpose. The analysis focuses on two aspects that interact in a complex way: the impact of the "history" of the thermal activation sequence, and the "multi"-antagonistic character of the wire activation. Indeed, the response of SMAs is characterized by a transformation hysteresis depending on the thermomechanical path followed. The problem is complex when considering a system with more than two antagonistic SMA wires, all interacting with each other. The influence of the history effect could be highlighted and evaluated. Although the studied mechanism is geometrically similar to a cable-driven robot with (six) cables, the hysteretic and multi-antagonistic nature of the system makes it difficult to model. The design of the inverse model of the mechanism has not been processed yet, but simple cases of positioning have been empirically implemented.

Mots clés : Alliages à Mémoire de Forme, architecture multi-antagoniste, architecture parallèle, actionneur, multi-ddl, éléments finis

1 Introduction

De nos jours, la miniaturisation des mécanismes est un but majeur à atteindre dans certaines applications d'ingénierie, par exemple pour le positionnement de précision. Les matériaux de type Alliages à Mémoire de Forme (AMF) présentent des avantages intéressants pour les actionneurs et architectures mécaniques actives, notamment grâce à leur mode d'actionnement simple par effet Joule [1-5]. Le mécanisme physique à la base des propriétés de ces matériaux est un changement de phase austénite-martensite, piloté par la contrainte et la température [6-8]. Les AMF possèdent aussi plusieurs propriétés mécaniques inédites pour des métaux : la présente étude se base sur l'exploitation de la propriété de mémoire de forme dite simple-sens, pour créer un mécanisme double-sens grâce à des systèmes adéquats de rappel antagoniste. L'objectif est d'étudier numériquement, via un logiciel de calcul par éléments finis, un mécanisme plan à trois degrés de liberté indépendants piloté par six fils AMF. L'analyse se focalise sur deux aspects interagissant de manière complexe : l'impact de l'« histoire » du séquençement d'activation thermique et le caractère « multi »-antagoniste de l'actionnement des fils. L'emplacement des fils AMF, de même que leur mode d'activation, influent sur les mouvements engendrés [9-11]. En effet, la réponse des AMF présente un fort caractère hystérétique dépendant du trajet thermomécanique suivi. Le problème est d'autant plus complexe quand on considère un système impliquant plus de deux fils AMF antagonistes, interagissant tous les uns avec les autres. Bien que le mécanisme étudié s'apparente géométriquement à un robot à câbles, le caractère hystérétique et multi-antagoniste rend délicat la modélisation d'un tel système. La présente étude fournit différents éléments de réponse à partir de simulations par éléments finis.

2 Modélisation du système mécanique

La Figure 1 présente le système mécanique plan étudié. Il est constitué d'une plateforme mobile supposée indéformable, reliée à six fils en AMF. Les liaisons sont supposées être des pivots. L'étude se focalise sur le déplacement du point effecteur E dans le plan (x, y) et sur la rotation de la plateforme mobile dans ce plan. Les paramètres des fils sont issus de travaux antérieurs, voir [12]. Les fils sont de longueur 100 mm et de diamètre 1 mm. Les quatre températures de transformation de phase *martensite-start*, *martensite-finish*, *austenite-start* et *austenite-finish* sont égales à -7°C , -25°C , 24°C et 36°C , respectivement. Classiquement dans les AMF, les transformations austénite \rightarrow martensite et martensite \rightarrow austénite ne se produisent pas aux mêmes températures : on parle d'« hystérésis » de transformation. La température ambiante est considérée à 15°C , c'est-à-dire entre les températures *martensite-start* et *austenite-start* : voir Figure 2-a. La température d'activation thermique utilisée durant l'étude est de 100°C . Cette température est atteignable en pratique par effet Joule. Pour initialiser l'état des fils AMF à température ambiante (étape 1), ils sont d'abord mis à l'état austénitique grâce à un passage initial à 100°C (étape 0). Les six fils sont ensuite précontraints de manière équivalente sur le système mécanique (étape 2), conduisant à une transformation partielle en martensite des fils sans mouvement de la plateforme. Il est à noter que, partant de cet état précontraint, l'augmentation et la diminution imposées de contrainte se traduiront par des comportements différents : voir traits en pointillés sur la Figure 2-b. L'augmentation de la contrainte entraînera la poursuite de la transformation en martensite, tandis que la diminution de la contrainte se traduira par

un retour élastique. Dans le système mécanique étudié, les six fils AMF interagissent mécaniquement tous les uns avec les autres. On peut parler de « multi »-antagonisme.

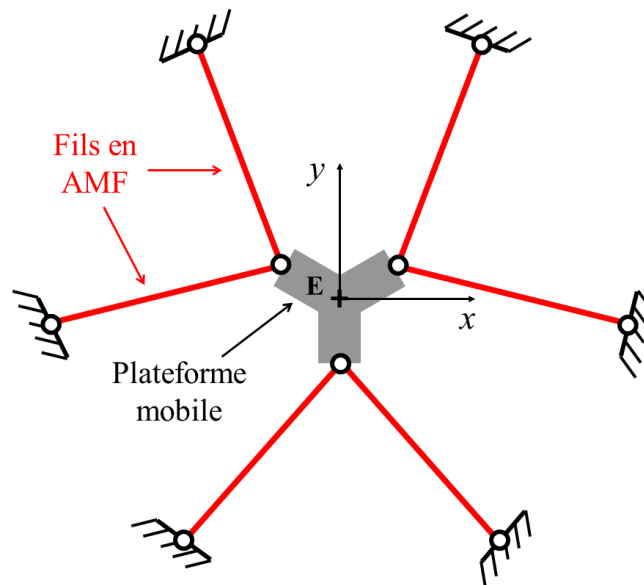


Fig. 1 : Système mécanique plan constitué d'une plateforme mobile et de six fils AMF reliés au bâti.

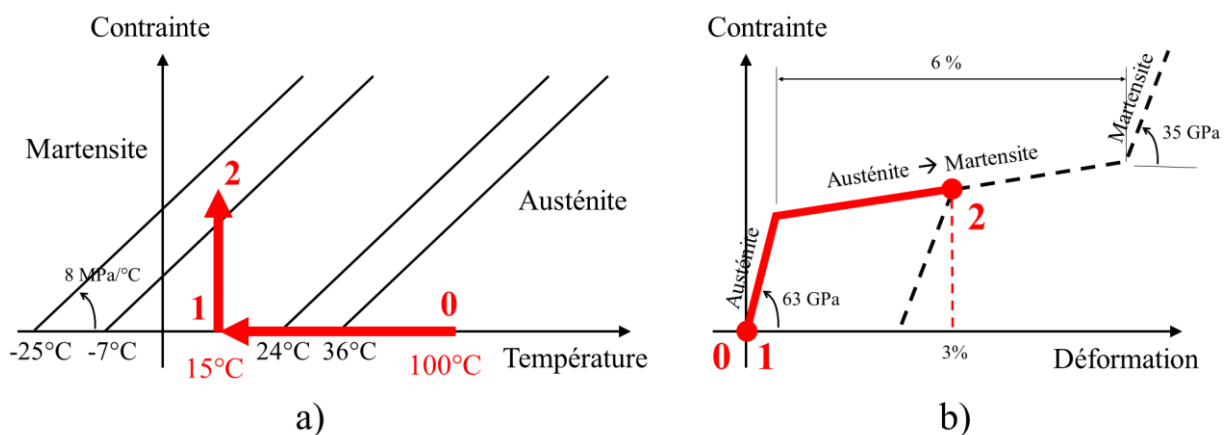


Fig. 2 : a) Diagramme d'état simplifié de l'AMF considéré, b) courbe contrainte-déformation depuis l'état austénitique. Le point 2 correspond à l'état de précontrainte initial des fils AMF positionnés dans le système mécanique.

Un modèle par éléments finis a été développé sous le logiciel Ansys V19. L'objectif est de simuler le mouvement de la plateforme mobile lors d'une séquence d'actionnement thermique des six fils AMF. Le modèle d'Auricchio [13] est utilisé pour le comportement de l'AMF en employant les éléments BEAM188 et l'option MEFM pour appliquer l'effet mémoire de forme. Les calculs sont réalisés sur la configuration déformée du système (hypothèse des « grands déplacements »). La Figure 3-a illustre le mouvement de corps rigide de la plateforme mobile. Trois grandeurs seront extraites à chaque étape de la séquence d'activation thermique : les déplacements U_x et U_y du point E et la rotation θ de la plateforme. La Figure 3-b montre un exemple de mouvement en vraie grandeur issue de l'activation à 100°C de certains fils AMF en étape 3. Il est à noter que le chauffage des fils à 100°C ne garantit pas forcément leur retour complet à l'état austénitique. En effet, l'augmentation de la contrainte s'accompagne d'un décalage de la plage thermique de transformation de phase.

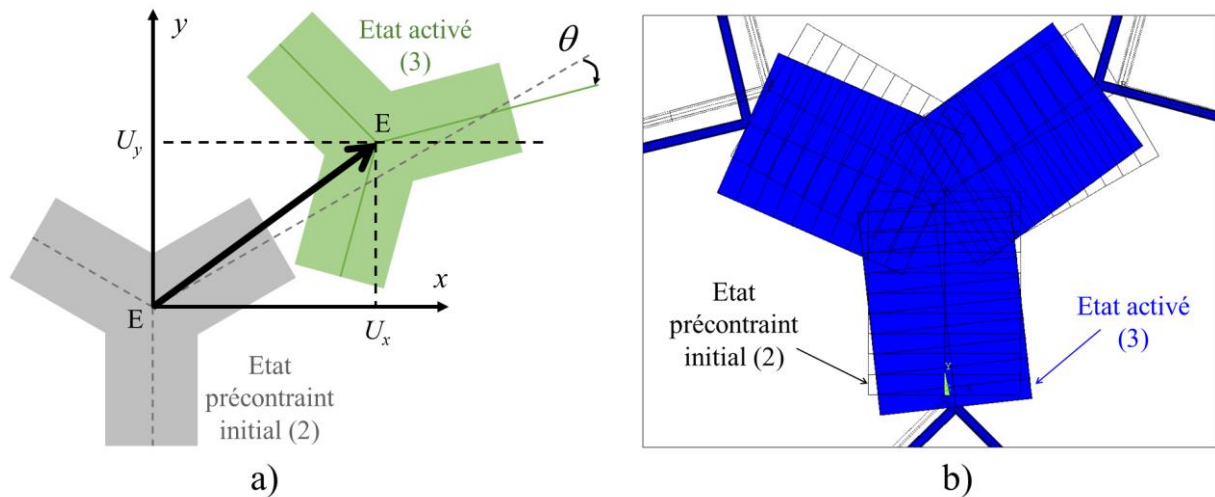


Fig. 3 : a) Définition du mouvement plan de la plateforme mobile, b) exemple de résultat de calcul par éléments finis.

3 Résultats et analyse

Les états intermédiaires de température entre 15°C (température ambiante) et 100°C (température choisie pour l'état activé) ne sont pas présentés dans ce document. Seuls les états 15°C et 100°C sont ici considérés. Compte tenu du nombre de fils, il y a donc 64 configurations possibles : depuis la configuration « aucun fil chauffé » à la configuration « tous les fils chauffés ». Deux limitations doivent être prises en compte : *i*- la séquence d'actionnement thermique doit éviter le passage en compression des fils, afin de ne pas avoir de situations de flambage. Même si ces situations n'empêchent pas systématiquement le mécanisme de fonctionner, il est délicat de prédire correctement l'état fléchi d'un fil AMF qui aura ensuite à retravailler en traction ; *ii*- il faut éviter des états de contraintes trop élevés pouvant entraîner une plastification des fils AMF (650 MPa pour l'AMF considéré dans cette étude), ce qui signifie en pratique qu'il faut limiter l'intensité ou le nombre des activations thermiques simultanées.

La prise en compte des deux limitations *i* et *ii* ci-dessus permet de définir les séquences acceptables d'actionnement thermique des fils AMF. En partant de l'étape 2 avec un pré-étirement des fils de 3% (voir Figure 2-b), l'espace de travail « discret » (c'est-à-dire pour les 64 possibilités d'activation thermique en étape 3) du mécanisme a été déterminé : la Figure 4-a montre les valeurs (U_x , U_y , θ) obtenues. On peut compter que le nombre de points de cet espace de travail discret est inférieur à 64 du fait des deux limitations *i* et *j*. La Figure 4-b montre la projection de cet espace de travail discret dans le plan (U_x , U_y). L'influence de l'effet d'histoire dans le séquençage thermique a pu également être mise en évidence : en appliquant les 64 configurations d'activation thermique en étape 4 à partir d'une des configurations en étape 3, les valeurs (U_x , U_y , θ) obtenues sont différentes. La Figure 5 illustre cet effet : la position de départ en étape 3 « attire » les nouvelles positions de l'étape 4. Sur cette base, des cas simples de positionnement de l'effecteur ont été mis en œuvre de manière empirique grâce à des chauffages intermédiaires (non présentés ici).

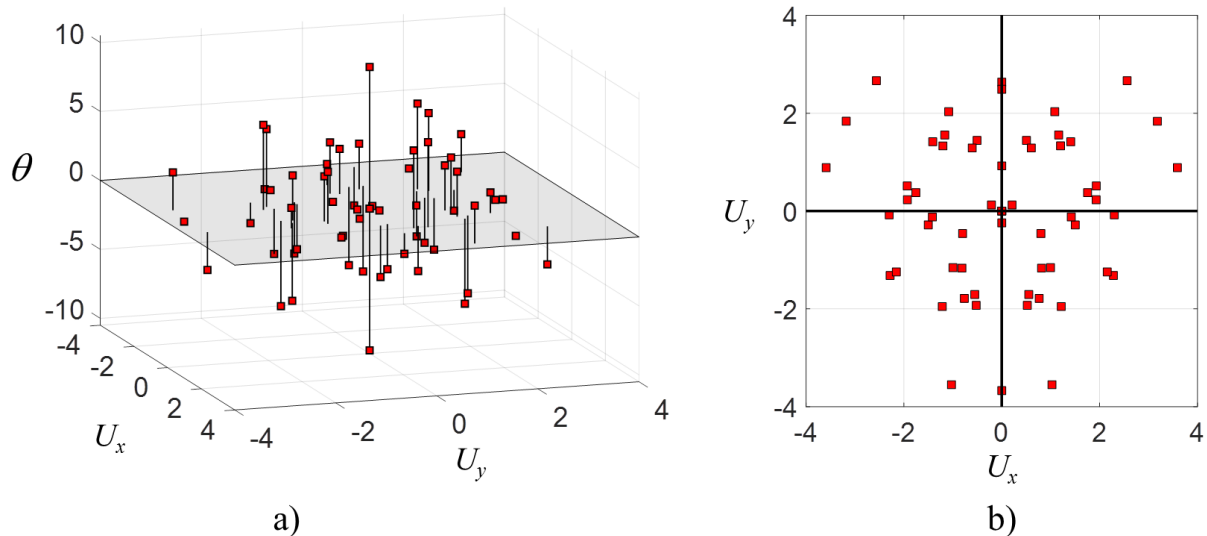


Fig. 4 : Espace de travail discret obtenu en étape 3 pour les 64 configurations d'activation thermique : a) déplacements U_x et U_y du point E en mm et rotation θ en degré de la plateforme, b) idem en projection dans le plan (U_x, U_y) .

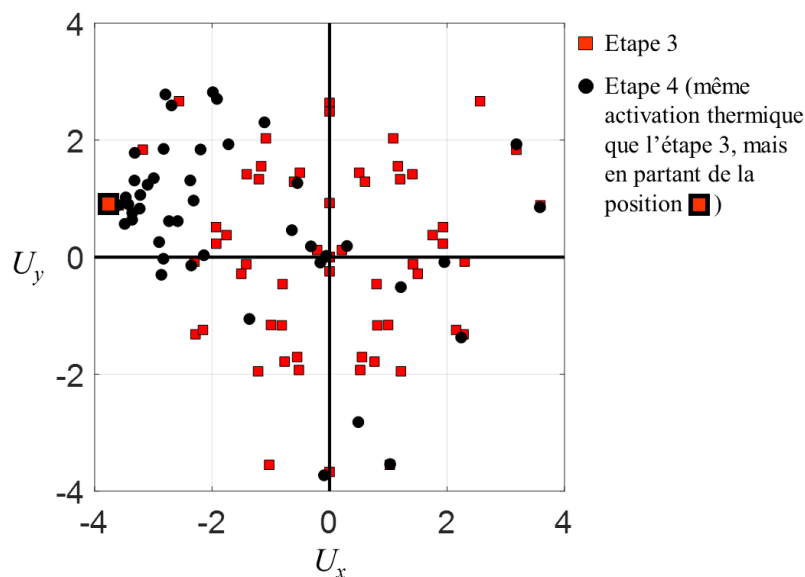


Fig. 5 : Illustration de l'effet d'histoire : déplacements U_x et U_y du point E (en mm) pour les 64 configurations d'activation thermique en étape 3 et en étape 4.

4 Conclusion

Un mécanisme plan à trois degrés de liberté indépendants pilotés par six fils AMF a pu être étudié numériquement via un logiciel de calcul par éléments finis intégrant le modèle d'Auricchio. L'analyse a permis de visualiser l'interaction complexe entre les fils. Le caractère multi-antagoniste de l'actionnement des fils et l'impact de l'histoire du séquençage d'activation thermique ont pu être mis en évidence. Le mécanisme étudié s'apparente à un robot à câbles mais sa modélisation est délicate du fait de ce caractère hystérétique et multi-antagoniste. La conception du modèle inverse du mécanisme est en cours de développement, de même qu'un premier démonstrateur physique (voir la Figure 6 qui présente la CAO du système conçu).

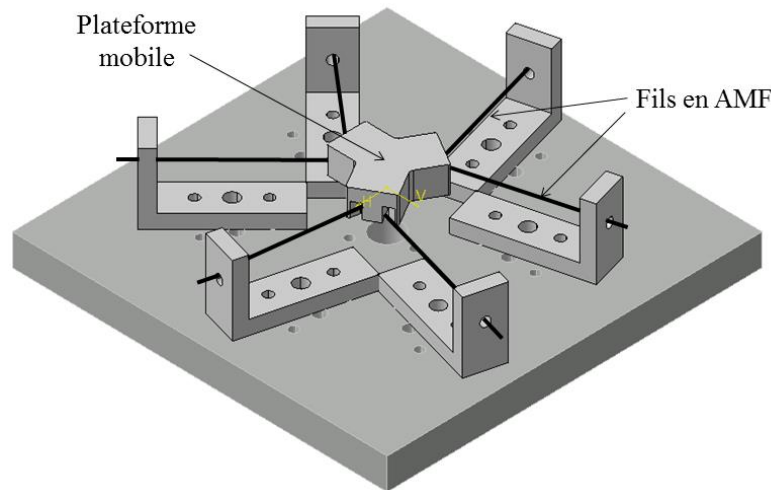


Fig. 6 : Conception d'un démonstrateur permettant de valider les résultats numériques (en développement).

Références

- [1] H. Yuan, J.C. Fauroux, F. Chapelle, X. Balandraud, A review of rotary actuators based on shape memory alloys, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 28 (2017) 1863–1885
- [2] A. Mekaouche, F. Chapelle, X. Balandraud, A compliant mechanism with variable stiffness achieved by rotary actuators and shape-memory alloy, *Meccanica* 53 (2018) 2555-2571
- [3] H. Yuan, F. Chapelle, J.C. Fauroux, X. Balandraud, Concept for a 3D-printed soft rotary actuator driven by a shape-memory alloy, *Smart Materials and Structures* 27 (2018) 055005
- [4] J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Material & Design* 56 (2014) 1078–1113
- [5] J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, Designing shape memory alloy linear actuators: a review, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 28 (2017) 1699–1718
- [6] K. Otsuka, C.M. Wayman, *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999
- [7] D.C. Lagoudas, *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*, Springer Science, New York, 2010
- [8] C. LExcellent, *Shape-Memory Alloys Handbook*, Wiley, Hoboken, NJ, 2013
- [9] E.A. Peraza-Hernandez, D.J. Hartl, R.J. Malak, Design and numerical analysis of an SMA mesh-based self-folding sheet, *Smart Materials and Structures* 22 (2013) 094008
- [10] H. Rodrigue, W. Wang, B. Bhandari, M.W. Han, S.H. Ahn, SMA-based smart soft composite structure capable of multiple modes of actuation, *Composites Part B-Engineering* 82 (2015) 152–158
- [11] D. Hwang, T. Higuchi, A planar wobble motor with a XY compliant mechanism driven by shape memory alloy, *IEEE ASME Transaction on Mechatronics* 21 (2016) 302–315
- [12] H. Tran, X. Balandraud, J.F. Destrebecq, Improvement of the mechanical performances of concrete cylinders confined actively or passively by means of SMA wires, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15 (2015) 292–299
- [13] F. Auricchio, A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy, *International Journal of Plasticity* 17 (2001) 971–990