

Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement mécanique de matériaux architecturés en Nickel-Titane

G. MACHADO^a, H. LOUCHE^a, T. DO^b, D. FAVIER^b, Y. LIU^c

a. Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil LMGC, Université Montpellier 2, CNRS, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France

b. Université de Grenoble Alpes/CNRS, Laboratoire 3SR, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

c. University of Western Australia, Perth, Australia

Résumé :

L'objectif de cette étude s'inscrit dans la perspective de développer une nouvelle classe innovante de matériaux combinant les propriétés remarquables et intrinsèques des alliages à mémoire de forme en Nickel-Titane avec des topologies particulières offertes par les matériaux « architecturés ». Ces structures sont constituées de tubes superélastiques à parois minces soudés par résistance électrique, de manière à créer des structures cellulaires régulières. Ces architectures permettent ainsi d'imaginer de nombreuses solutions innovantes pour optimiser les produits, par une démarche de conception de mésostructures. Le comportement superélastique de deux matériaux architecturés simples (démonstrateurs), sur la base de tubes identiques mais avec deux topologies différentes, est modélisé par la méthode des éléments finis. Les grandes transformations sont prises en compte et les comportements prédits sont comparés par simulation numérique des cas de chargements complexes, en explorant l'influence du comportement du matériau constitutif de base sur l'efficacité de certaines propriétés mécaniques des matériaux cellulaires conçus. Les paramètres du modèle de comportement sont identifiés sur la base d'essais de traction effectués sur des échantillons découpés dans les tubes. Les résultats de la modélisation sont comparés avec des essais de compression radiale réalisés sur les deux démonstrateurs fabriqués.

Abstract :

The aim of the study is to create architected materials constituted of NiTi tubes combining the intrinsic and novel properties of Nickel-Titanium shape memory alloys with purposely engineered topologies. By joining thin-wall superelastic tubes by means of electrical resistance welding, we create regular cellular materials. The superelastic behaviors of two simple architected materials based on identical tubes but with two topologies are modeled using finite element approaches. Large transformations are taken into account and predicted behaviors are compared by simulating complex loading, exploring the influence of the constitutive material behavior on effective mechanical properties of cellular materials. The parameters of the constitutive equations are identified on tensile tests performed on small dog-bone shaped specimens machined from the tubes by spark cutting. The results of the modeling are at last compared with compression tests performed on these simple architected NiTi materials.

Mots clefs : Alliages à Mémoire de Forme, NiTi, matériaux architecturés.

1 Introduction

Les alliages à mémoire de forme (AMF) et leurs propriétés de mémoire de forme et de superélasticité ont maintenant trouvé de véritables applications dans des secteurs industriels actuellement largement liés au médical mais s'étendant progressivement à d'autres domaines. L'effet mémoire concerne la possibilité de recouvrer une déformation assez importante par une augmentation modérée de la température. La superélasticité se réfère au comportement mécanique observé dans des intervalles de températures dites hautes, conduisant à des déformations « renversables » avec hystérésis lors du relâchement de l'effort, qualitativement très proche des comportements des élastomères. Néanmoins dans le cas des AMF massifs

tels que des fils, les amplitudes des déformations renversables pour les deux phénomènes précédents sont typiquement de l'ordre de 5 à 10% en traction, ce qui est tout à fait exceptionnel pour des métaux. Parmi ces alliages, les alliages à base de Nickel et de Titane [1] constituent sans aucun conteste l'immense majorité. Ainsi, les AMF et plus particulièrement les alliages Ni-Ti ne sont donc plus les alliages « exotiques et miraculeux » cantonnés à des curiosités de laboratoire. Ils font partie des matériaux à disposition de l'ingénieur pour développer des applications, avec des fonctionnalités particulières qui les prédisposent à des utilisations dans le domaine des applications biomédicales et des actionneurs. Des recherches et des applications apparaissent chaque jour, tant dans le domaine de l'aéronautique que plus récemment dans des industries plus traditionnelles telles l'automobile [2].

En parallèle, l'ingénieur assiste au développement de nouveaux matériaux qui tentent de répondre à des besoins de multifonctionnalités (mécaniques, thermiques, acoustique, absorption d'énergie, ...) par d'autres solutions que celles utilisées habituellement par le métallurgiste, le polymériste, i.e. travailler sur la microstructure du matériau (précipités, taille de grains ou des chaînes,...) ou celles utilisées par le mécanicien, i.e. travailler sur la structure du produit à créer. Ces « nouveaux matériaux » sont qualifiés de « matériaux architecturés » en ce sens qu'ils rajoutent des degrés de liberté par une architecture située à une échelle intermédiaire ou mésostructure, située entre celle de l'application et l'échelle de la microstructure du matériau constitutif [3]. Les matériaux architecturés à base d'AMF de type Nickel-Titane existent déjà. Cependant, le développement de tels matériaux architecturés à base d'AMF vers de réelles applications reste encore timide et doit être poussé d'avantage. Ainsi, plusieurs travaux de recherche ont été mis en œuvre dans ce sens ces dernières années, par exemple des mousses de NiTi pour réaliser des implants osseux, des dispositifs d'absorption d'énergie [4, 5, 6]. Un autre exemple concerne la conception de structures en nids d'abeille en NiTi [7] ayant comme applications potentielles des structures amortissantes et des âmes de structures sandwich [8] à partir de tôles ondulées. Ainsi, notre étude s'inscrit dans ces recherches actuelles de créer des matériaux architecturés à partir de matériaux bien connus. Plus précisément, la conception des matériaux architecturés NiTi que nous envisageons est fondée sur l'abondante activité de recherche concernant les alliages NiTi ainsi que sur le savoir-faire industriel concernant en particulier les tubes de NiTi, constituants élémentaires des matériaux architecturés envisagés.

2 Caractérisation expérimentale

2.1 Compression diamétrale d'un seul tube

Des tronçons de longueur 5 mm des tubes (diamètre extérieur 5,74 mm, épaisseur 0,31 mm), constituants élémentaires des structures d'assemblages de tubes envisagées, ont été étudiés lors d'essais de compression diamétrale. Ces tubes obtenus par une succession d'étirage à froid-recuit ont subi après le dernière passe d'étirage un traitement de vieillissement-précipitation à 350°C pendant 1h. La Figure 1(a) montre la réponse mécanique globale lors des cycles de chargement avec une boucle d'hystérésis représentant les états successifs de force-déplacement d'un seul tube soumis à une déformation diamétrale cyclique. Notons que le matériau présente un effet classique de stabilisation des cycles après quelques cycles, le comportement entre la première charge et les autres charges étant un peu différent. La Figure 1(b) montre la réponse des tests à différentes vitesses de déformation. On notera que, dans les limites testées, il n'y a pas une dépendance de la vitesse de déformation. Cependant, afin de ne pas modifier la microstructure localement durant l'essai, la vitesse de déplacement est fixée à 0.01 mm/s.

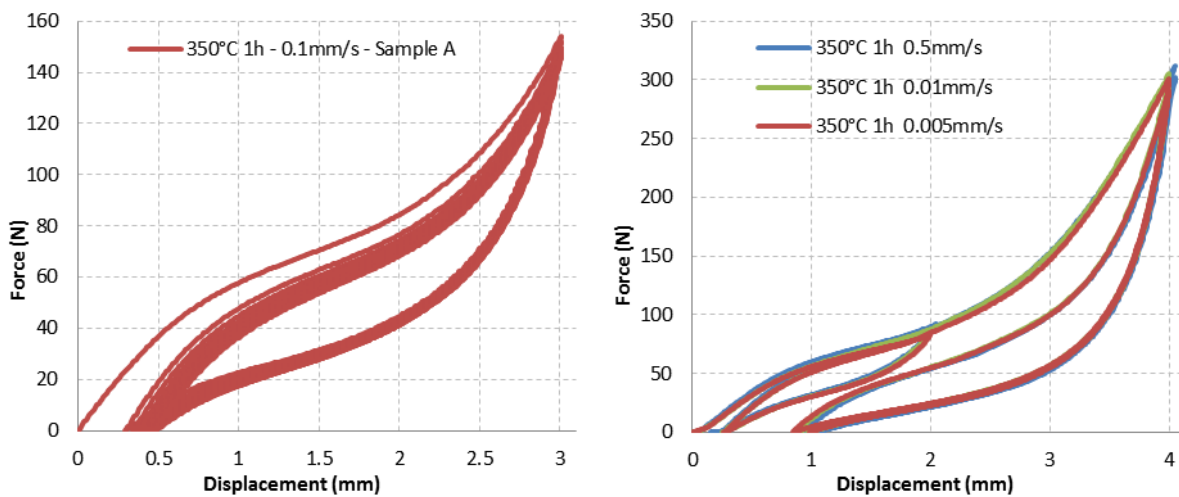


FIG. 1 - Essais de compression diamétrale. (a) boucle d'hystérésis représentant les états successifs de force-déplacement global ; (b) test de l'influence de la vitesse de déformation.

2.2 Compression des empilements

Différentes configurations géométriques d'empilement ont été envisagées, à savoir deux types de structure avec des cellules de base respectivement hexagonales et carrées comme le montrent les Figures 2 et 3. Des démonstrateurs réalisés avec, respectivement, 3 et 4 tubes soudés sous atmosphère contrôlée (argon hydrogéné) ont été fabriqués [9]. Un grand effort a été entrepris, visant à contrôler l'uniformité des surfaces en contact entre les différents tubes de manière à minimiser les défauts géométriques de la cellule de base et garantir la reproductibilité des résultats. Des essais de compression ont été réalisés sur les deux types de démonstrateur (échantillons « carrés » et « triangles »). Différentes informations expérimentales ont été acquises durant ces essais : la réponse mécanique globale lors des cycles de chargement avec des boucles internes et les champs 2D de déplacement obtenus par corrélation d'images. Le cycle de chargement est le suivant : charge jusqu'à des déplacements successifs de 1, 2 et 3 mm, entrecoupés par des décharges à force nulle.

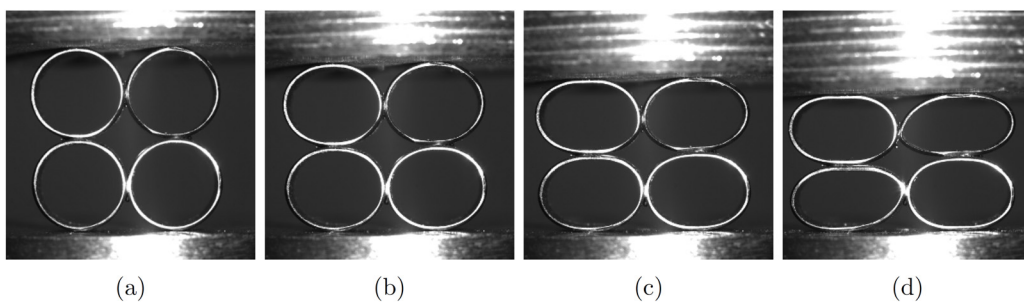


FIG. 2 - Images de l'échantillon « carré » sous compression, pour un déplacement imposé : (a) $d = 0$ mm, (b) $d = 1$ mm, (c) $d = 2$ mm, (d) $d = 3$ mm.

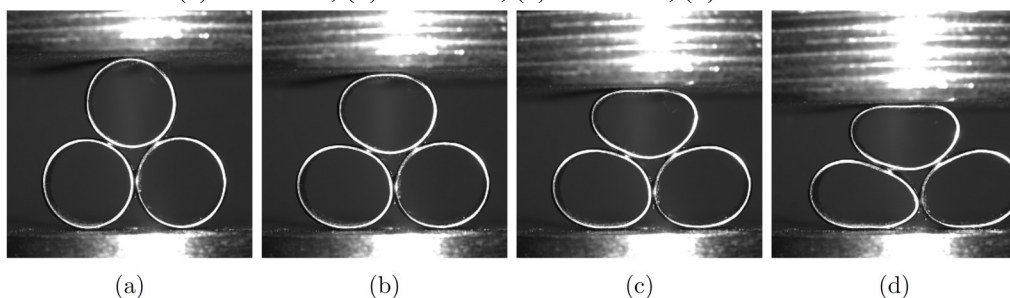


FIG. 3 - Images de l'échantillon « triangle » sous compression, pour un déplacement imposé : (a) $d = 0$ mm, (b) $d = 1$ mm, (c) $d = 2$ mm, (d) $d = 3$ mm.

La Figure 4 met bien en évidence le comportement mécanique attendu : dans les deux cas une souplesse importante de ces matériaux architecturés avec un niveau de déformation globale de l'ordre de 18% avant endommagement, une bonne réversibilité caractérisée par de faibles déformations résiduelles et une bonne capacité d'amortissement.

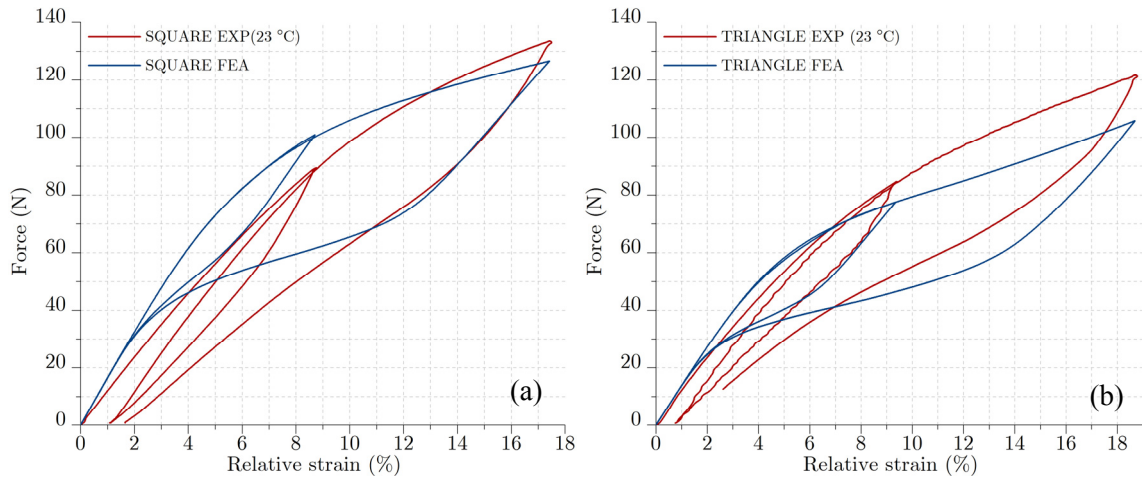


FIG. 4 – Réponse force-déplacement globale mesurée et simulée des démonstrateurs réalisés : (a) structure à quatre tubes ; (b) structure à trois tubes.

3 Modélisation du comportement mécanique

La modélisation a été réalisée en utilisant la loi de comportement thermomécanique [10] déjà implantée via une UMAT dans le logiciel de simulation par éléments finis Abaqus. L'identification des 10 paramètres du modèle (pour une température d'essai donnée) est faite uniquement à partir des résultats d'un essai de traction uniaxiale. La Figure 5 présente la courbe contrainte-déformation théorique avec les paramètres à identifier et la courbe obtenue expérimentalement par corrélation d'images en moyennant la déformation dans la zone utile de l'échantillon. Cette dernière est typique d'un comportement superélastique observable sur un alliage NiTi. Il est important de noter par la suite que : les déformations résiduelles ne sont pas prises en compte dans la modélisation ; même si le comportement de ces matériaux présente une dissymétrie traction-compression, une modélisation symétrique ($\sigma_{cL}^S = \sigma_{tL}^S$) a été adoptée par souci de simplification.

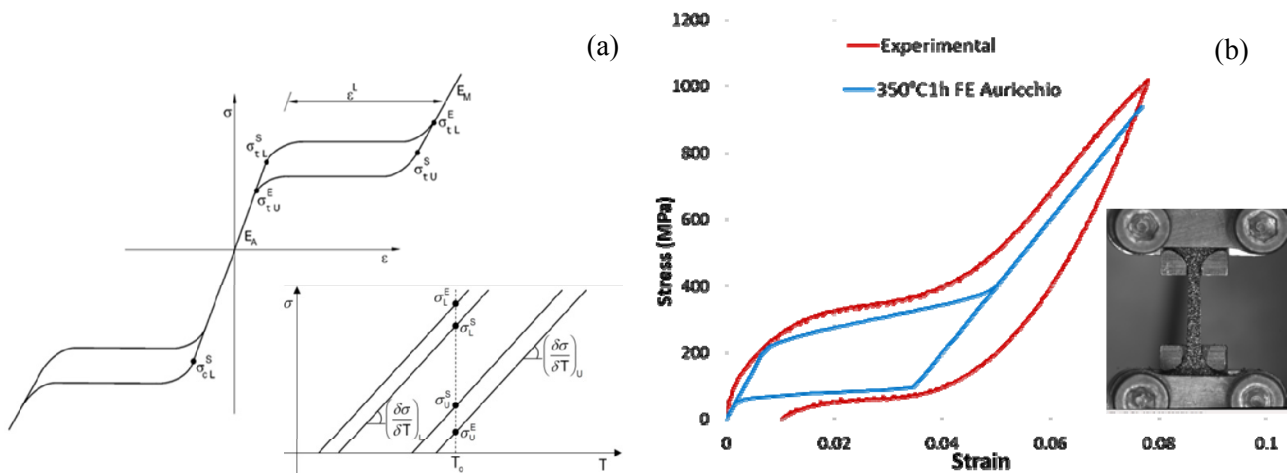


FIG. 5 – Identification du modèle EF sur un essai de traction simple. (a) Paramètres identifiés $E_A=30$ GPa, $E_M=30$ GPa, $\nu_A=\nu_M=0.33$, $\epsilon^L=0.03$, $(\delta\sigma/\delta T)_L=(\delta\sigma/\delta T)_U=6.7$ MPa/°C, $\sigma_{tL}^S=200$ MPa, $\sigma_{tL}^E=400$ MPa, $T_0=22^\circ\text{C}$, $\sigma_{tU}^S=100$ MPa, $\sigma_{tU}^E=50$ MPa, $\sigma_{cL}^S = \sigma_{tL}^S$. (b) Confrontation expérience-modélisation EF.

La modélisation de la compression des démonstrateurs a été effectuée en déformation plane, en utilisant des éléments quadratiques avec intégration complète. Les confrontations modèle-expériences sont présentées aussi dans la Figure 4. La comparaison modèle-expériences est cohérente vis-à-vis de la simplicité de la loi constitutive. Il faut noter que dans toutes les simulations numériques les déformations résiduelles ne sont pas prises en compte par le modèle adopté. La réponse prédite par le modèle EF est plus rigide que celle obtenue lors de l'expérience au début du chargement. Ce comportement est encore plus marqué pour la structure à quatre tubes, comme montre la Figure 4(a). Dans les deux cas de structures, les boucles d'hystérésis sont légèrement surestimées par le modèle. Par ailleurs, l'effet des liaisons soudées doit être pris en compte dans la modélisation, et la faible valeur de E_A est certainement due à l'intervention de la transformation A-R induite mécaniquement dans cet alliage à la température de l'essai. Cependant, la comparaison de la réponse globale (force-déplacement) reste satisfaisante dans les deux cas.

4 Conclusion

Ce papier présente des résultats expérimentaux et de modélisation du comportement, en compression diamétrale, d'un matériau architecturé conçu à partir d'empilements de tubes en AMF NiTi soudés. Lors du déchargement, pratiquement tous les échantillons ont pu récupérer leur forme initiale dans la plage de chargement utilisée. Les courbes force-déplacement présentent un comportement superélastique avec des boucles d'hystérésis, liées à la transformation de phase réversible austénite-martensite. Cette étude révèle que le soudage par résistance est une technique possible de liaison pour obtenir des matériaux architecturés en NiTi avec une faible densité et une grande superélasticité. Le travail se poursuit pour améliorer la qualité des liaisons soudées, par le biais de l'étude de reproductibilité et sensibilité des paramètres de soudage, et pour la prise en charge plus réaliste de ces liaisons dans la modélisation éléments finis. D'autres empilements sont envisagés avec des tubes NiTi d'autres diamètres et épaisseurs, ou bien avec d'autres matériaux. La prochaine étape concernera l'amélioration de la modélisation éléments finis, de manière à optimiser et produire une structure plus conséquente en taille et complexité géométrique des empilements.

Références

- [1] Otsuka K., and Ren X., 2005, "Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys," *Progress in Materials Science*, **50**(5), pp. 511–678.
- [2] Dimitris C. Lagoudas, 2008, *ShapeMemory Alloys*, Springer US, New York, NY.
- [3] Bouaziz O., Bréchet Y., and Embury J. D., 2008, "Heterogeneous and Architected Materials: A Possible Strategy for Design of Structural Materials," *Advanced Engineering Materials*, **10**(1-2), pp. 24–36.
- [4] Bansiddhi A., Sargeant T., Stupp S., and Dunand D., 2008, "Porous NiTi for bone implants: A review," *Acta Biomaterialia*, **4**(4), pp. 773–782.
- [5] Aydoğmuş T., and Bor Ş., 2009, "Processing of porous TiNi alloys using magnesium as space holder," *Journal of Alloys and Compounds*, **478**(1-2), pp. 705–710.
- [6] Grummon D. S., Shaw J. a., and Gremillet A., 2003, "Low-density open-cell foams in the NiTi system," *Applied Physics Letters*, **82**(16), p. 2727.
- [7] Shaw J. A., Grummon D. S., and Foltz J., 2007, "Superelastic NiTi honeycombs : fabrication and experiments," *Smart Mater. Struct.*, **16**.
- [8] Okabe Y., Minakuchi S., Shiraishi N., and Murakami K., 2008, "Smart Honeycomb Sandwich Panels With Damage Detection," *Advanced Composite Materials*, **17**, pp. 41–56.
- [9] Delobelle V., Delobelle P., Liu Y., Favier D., and Louche H., 2013, "Resistance welding of NiTi shape memory alloy tubes," *Journal of Materials Processing Technology*, **213**(7), pp. 1139–1145.

- [10] Auricchio F., and Taylor R. L., 1997, "Shape-memory alloys : modelling and numerical simulations the finite-strain superelastic behavior," *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, **7825**(96), pp. 175–194.