

Etude expérimentale du comportement d'une tôle perforée aléatoirement en NiTi superélastique

C. Cellard^a, B. S. Shariat^b, G. Rio ^a, V. Grolleau^a, Y. Liu ^b, A. Colin ^a

a. Université Européenne de Bretagne, LIMATB, Rue de Saint Maudé - BP 92116, 56321 LORIENT cedex

b. University of Western Australia, School of Mechanical Engineering, CRAYLEY, Western Australia 6009 (AUSTRALIA)

Résumé :

Cette étude expérimentale présente la réponse complexe observée lors de la traction d'une plaque mince perforée en NiTi superélastique et d'épaisseur 0,1 mm. Les alliages NiTi quasi équiatomiques se déforment via les contraintes induites par la transformation de phase martensitique ($A \Leftrightarrow M$) et montrent un comportement mécanique pseudo-élastique au-delà d'une contrainte seuil. Lors de l'essai de traction, la présence de trous dans la plaque engendre une inhomogénéité des déformations mais aussi des déplacements hors plans qui s'apparentent à du flambement local. Un dispositif expérimental, constitué de deux pièces massives en verre, est réalisé pour permettre d'éviter ces déplacements hors plans tout en autorisant les mesures de champs optiques.

La présentation du travail aborde les aspects de conception et de validation du dispositif expérimental ainsi qu'un essai de traction d'une plaque trouée en NiTi superélastique avec mesure de champ optique.

Abstract :

This experimental study presents the complex response observed during the tensile test of a holey thin plate of 0.1 mm thickness superelastic NiTi. Near-equiatomic NiTi alloys deform via stress induced $A \Leftrightarrow M$ martensitic transformation and exhibit a pseudoelastic mechanical behaviour over a stress plateau. During the tensile test, the presence of holes induces not only inhomogeneous strains but also out-of-plane displacements which can be considered as local bending. An experimental device, made of two massive pieces of glass, is realized to avoid those out-of-plane displacements and allow the optical measurements.

This study discusses the different aspects of conception and validation of the experimental device and also a tensile test of a NiTi holey plate with optical measurement.

Mots clefs : Shape Memory Alloy, NiTi, Holey plate

1 Introduction

Les alliages à mémoire de forme présentent un comportement remarquable, différent des matériaux métalliques conventionnels. A la courbe de contrainte-déformation traditionnelle en traction vient s'ajouter un plateau de contrainte due à la transformation de phase martensitique ou la réorientation martensitique. Ce comportement unique a attiré l'attention de nombreux chercheurs pour comprendre les mécanismes et caractériser la réponse mécanique de ces matériaux. De nos jours, les alliages nickel-titane (NiTi) sont parmi les alliages à mémoire de forme (AMF) les plus utilisés et les plus prometteurs. En particulier ses propriétés spécifiques d'hyper-élasticité et de mémoire de forme alliées à sa bio-compatibilité en font un matériau de choix pour la technologie médicale [3]. Cependant, ces propriétés sont associées à une mauvaise usinabilité avec les outils de coupe traditionnels, ce qui complique l'obtention de géométries complexes. En pratique, seule des géométries simples : fils, plaques, tubes, sont actuellement assez bien maîtrisées : i.e. obtenues et dimensionnées. Les géométries plus

complexes, type matériaux dits "structurés" comme les mousses par exemple, constituent un domaine en développement.

Les applications industrielles des alliages NiTi peuvent faire également apparaître des conditions de chargement complexes. Dans ce contexte, ce travail porte sur l'étude d'une plaque perforée soumise à un chargement de traction. La présence de trous aléatoires induit une hétérogénéité des niveaux de déformations et de contraintes, entraînant ainsi des transformations de phase martensitique locales à différents niveaux de chargements. Le comportement du matériau devient alors complexe et hétérogène.

Outre l'intérêt de l'analyse des réponses en elle-mêmes, ces résultats expérimentaux ont pour objectif à terme de servir de base de validation pour un modèle numérique. L'utilisation de plaques fines se déformant dans son plan présentent alors des avantages. On peut accéder à l'aide d'une technique de corrélation d'images à la mesure des champs de déplacement en surface, que l'on peut raisonnablement supposer constant dans l'épaisseur. On dispose alors de la réponse cinématique complète locale et globale de la structure.

Les plaques perforées sont également représentatives de l'étude en 2D de structures poreuses. Des études ont tenté de modéliser le comportement des AMF poreux [1, 2, 4, 6, 7]. D'une manière générale, leurs modèles ont pour but de prédire la réponse globale d'un AMF poreux en compression en fonction de la fraction volumique de leur porosité. Ces derniers sont essentiellement basés sur des techniques de moyenne micromécaniques [1, 2, 4, 7] ou sur l'hypothèse d'une distribution périodique de pores [6, 7]. Dans le premier cas, le matériau est considéré comme un milieu composite constitué d'une matrice et de pores distribués aléatoirement. Les variations locales de la déformation et de la contrainte ne peuvent pas être étudiées. Dans le deuxième cas, au contraire, les pores ont une distribution périodique et régulière. Cette structure, bien que non représentative d'un AMF poreux, permet de réduire les analyses numériques à l'étude d'une cellule unitaire avec les conditions aux limites appropriées [7].

Dans notre cas, la méthodologie retenue est de valider précisément un modèle numérique via l'expérimentation 2D, puis d'étendre l'investigation au 3D, via ce modèle numérique. Le travail présenté s'insère donc dans la première phase de cette démarche.

2 Echantillons étudiés

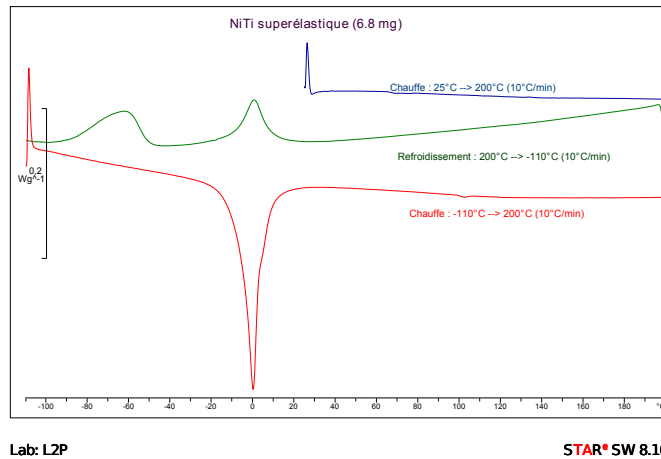
2.1 Matériau

L'alliage NiTi superélastique étudié est quasi-équiatomique (cf.table.1). Les températures caractéristiques de transition de phase ont été obtenues par calorimétrie différentielle à balayage. Un échantillon de 6.8 mg a été analysé avec une machine Mettler Toledo DSC822e. La plage de température est fixée entre -110°C et 200°C avec une vitesse de chauffe et de refroidissement de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. L'azote est utilisé pour les basses températures. Le cycle de température est le suivant : 1) Cycle de chauffe de 25°C jusqu'à 200°C , 2) Cycle de refroidissement de 200°C jusqu'à -110°C , 3) Cycle de chauffe de -110°C jusqu'à 200°C .

La fig.1a présente la courbe obtenue. Durant le cycle de chauffe, une seule température de transition est observée à 0°C et correspond à la transformation de phase austénitique ($M \rightarrow A$). Durant le cycle de refroidissement, deux températures de transitions sont détectées. La première, à 0°C , correspond à la transformation austénite-phase R ($A \rightarrow R$). La seconde, à -62°C , correspond à la transformation phase R-martensite ($R \rightarrow M$).

Afin de caractériser le comportement du matériau, un essai de traction cyclique a été effectué sur une éprouvette de 0.1 mm d'épaisseur et de zone utile 30 mm x 3.95 mm. Une machine INSTRON 5566A équipée d'une cellule de force de 10 kN est employée. La précision du déplacement de la traverse est de ± 0.02 mm et la précision de la cellule de force est de ± 0.25 % par rapport à la valeur lue.

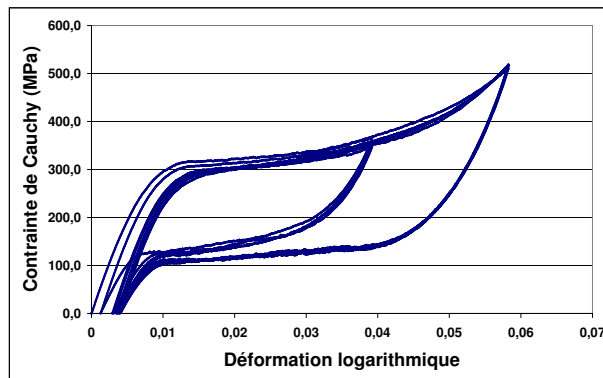
Avant l'essai, l'échantillon est placé dans de l'eau bouillante afin que la phase soit purement austénitique (cf.table.1). L'expérience est réalisée dans une salle climatisée et maintenue à une température constante de 23.5°C . Afin de ne pas modifier la microstructure durant l'essai, la vitesse de déformation est fixée à 5.10^{-5} s^{-1} et deux buses, contenant de l'air comprimé à température ambiante, sont utilisées afin de refroidir l'échantillon. Le cycle de chargement est le suivant :



Lab: L2P

STAR® SW 8.10

(a)



(b)

FIGURE 1 – a) Calorimétrie différentielle à balayage de l’alliage NiTi superélastique [-110°C ; 200°C], b) Traction cyclique NiTi superélastique

- Charge jusqu’à un déplacement de 1.2 mm (soit une élongation de 4%) puis décharge de la force,
- Charge jusqu’à un déplacement de 1.8 mm (soit une élongation de 6%) puis décharge de la force,

La fig.1b présente la courbe contrainte-déformation obtenue. Cette dernière est typique d’un comportement superélastique observable sur un NiTi. La contrainte plateau est d’environ 325 MPa. 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 table.1 récapitule les températures de transition de phase ainsi que la composition chimique et les propriétés mécaniques de l’alliage NiTi superélastique.

TABLE 1 – Propriétés mécaniques, composition chimique et températures de transition de phase du NiTi superélastique

σ_P [MPa]	Ni [wt-%]	Ti [wt-%]	A \rightarrow R [°C]	R \rightarrow M [°C]	M \rightarrow A [°C]
325	55.89	44.1	0	-62	0

2.2 Spécifications géométriques

L'étude porte sur une plaque perforée parallélépipédique de dimensions 110 mm x 25 mm x 0.1 mm. La position et le diamètre des trous sont aléatoires. Afin de s'assurer de la reproductibilité des trous sur les éprouvettes, une matrice a été générée (cf.fig.2a et table.2). Deux contraintes doivent être respectées :

- L'espace entre les différents trous doit être suffisamment grand pour ne pas engendrer de fissuration prématurée de l'éprouvette lors de l'essai de traction,
- La localisation des trous doit être située entre 20 et 80 mm des bords tractionnés de l'éprouvette afin de pouvoir effectuer les mesures optiques.

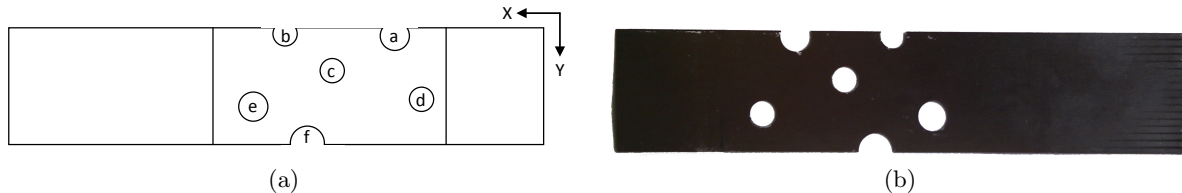


FIGURE 2 – a) Matrice de perçage des trous, b) Eprouvette après électroérosion

TABLE 2 – Position et diamètre des différents trous

Point	X (mm)	Y (mm)	Diamètre (mm)
a	34.5	1.5	6
b	53.5	1.5	5
c	44	10	5
d	28	16.5	5
e	61.25	17.25	6
f	50	24	7

2.3 Préparation de l'échantillon

Les alliages NiTi étant des matériaux difficiles à usiner, le perçage des trous s'effectue en deux étapes :

- Préperçage de trous de 2.5 mm de diamètre, à l'aide d'une fraise en carbure monobloc et d'une perceuse à colonne, afin de pouvoir passer le fil de la machine à électroérosion. La vitesse de rotation est de 5000 tours/min et l'avance est manuelle,
- Usinage des différents trous à l'aide de la machine à électroérosion Charmilles Robofil 300. Afin d'éviter la flexion de l'éprouvette due à la pression de l'eau, fixée à 1 bar, un dispositif de maintien de l'échantillon a été mis en place. Ce dernier est constitué de deux plaques en aluminium contenant une poche ainsi que la matrice des différents trous.

Afin de limiter le risque d'initiation de fissure après le découpage par électroérosion, un papier de verre constitué de grains fins est utilisé afin de lisser l'état de surface des différents trous. La fig.2b montre le résultat obtenu.

3 Conception du dispositif expérimental et traction d'une plaque trouée en NiTi superélastique

Afin de réaliser un essai de traction sur une plaque mince, un dispositif expérimental a été mis en place. En effet, lorsque l'on tire sur l'éprouvette, ici en acier, une torsion ainsi que des déformations hors plans apparaissent très rapidement. La fig.3a montre par exemple le résultat obtenu sur une éprouvette en acier de 0.15 mm d'épaisseur.

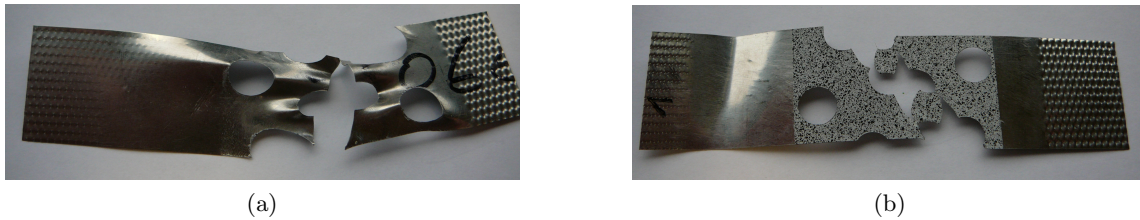


FIGURE 3 – Essai de traction sur une éprouvette mince en acier : a) sans le dispositif ; b) avec le dispositif

Afin de maintenir l'éprouvette plane durant l'essai, tout en permettant l'utilisation de mesures optiques, un dispositif expérimental a été conçu (cf.fig.4). Il est constitué de deux plaques massives en verre, de dimensions 90 x 60 x 8 mm, maintenues et bridées par deux pièces en aluminium. Le bridage s'effectue par le serrage de quatre vis qui sont en contact avec deux pièces rainurées en acier et recouvertes de caoutchouc sur une face. Afin que l'éprouvette puisse coulisser dans le dispositif, des cales d'épaisseur identique à l'éprouvette sont mises en place entre les deux plaques de verre. La force de glissement est inférieure à 1N (mesurée hors essai de traction). Afin de valider le dispositif, un essai de traction a été réalisé sur une autre éprouvette en acier de 0.15 mm d'épaisseur. La fig.3b montre le résultat obtenu. On constate que l'échantillon reste plan. Le dispositif expérimental est ainsi validé.

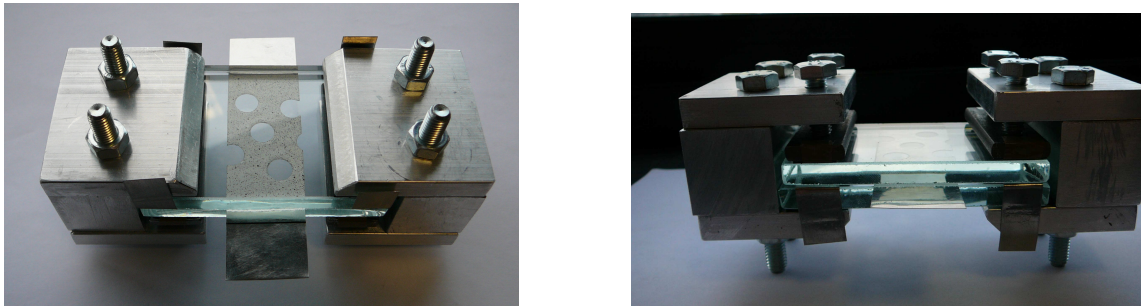


FIGURE 4 – Dispositif expérimental de maintien de l'éprouvette plane

A l'aide d'un modèle d'élasto-hystérésis [5, 8] identifié approximativement à l'aide de la courbe de traction (cf.fig.1b) et de données bibliographiques, une première modélisation de l'essai de traction a été mise en place avec une longueur utile de 60 mm. Cela nous permet d'évaluer la contrainte à ne pas dépasser afin d'éviter une plastification trop sévère du matériau. La simulation fournit alors une contrainte maximale de 340 MPa au bord des trous.

L'essai de traction doit être effectué à une vitesse de déformation de 10^{-5}s^{-1} . Le déplacement maximal étant faible, 1.27 mm (cf.fig.5), l'essai est piloté en chargement avec une vitesse de 84.4 N/min. L'essai de traction est effectué en trois cycles :

- Chargement jusqu'à une charge de 279 N suivi d'une décharge,
- Chargement jusqu'à une charge de 380 N suivi d'une décharge,
- Chargement jusqu'à une charge de 558 N suivi d'une décharge,

La précharge appliquée est de 53N. Une mesure optique est mise en place via l'utilisation de deux caméras et du logiciel Aramis en 3D. La cartographie du champ de déformation tout au long de l'essai est alors accessible. La fig.6 montre la répartition de la déformation maximale lors de la pleine charge à 558N. Ces dernières sont maximales au bord des trous et n'excèdent pas 8%.

Cependant, malgré la cohérence des résultats obtenus, des interrogations expérimentales subsistent. La plus importante est l'effet du verre sur la mesure optique. En effet, comme nous effectuons une mesure en 3D, le verre diffracte et peut induire des erreurs sur la valeur du champ de déformation mesuré. Une expérience doit être mise en place pour quantifier ces erreurs. Cependant, en l'état actuel, les résultats montrent qu'il n'y a pas de déplacements hors plans ce qui était le but recherché.

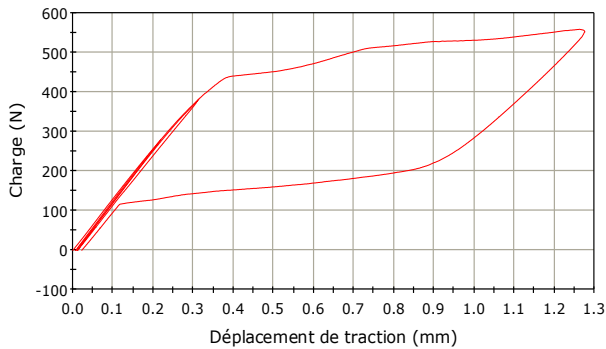


FIGURE 5 – Cycle de chargement de l'essai de traction de la plaque trouée

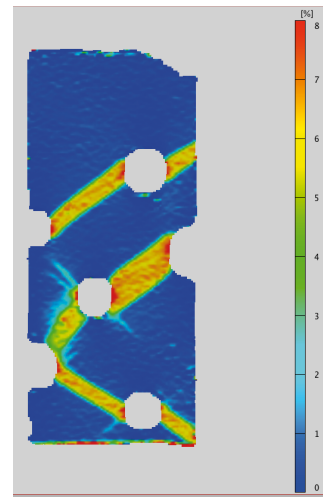


FIGURE 6 – Champ de déformation maximale à pleine charge

4 Conclusion

Un dispositif expérimental a été conçu afin de pouvoir effectuer des essais de traction sur une plaque mince perforée tout en autorisant des mesures optiques. Ce dernier a tout d'abord été validé sur une plaque en acier de 0.15 mm d'épaisseur. Un essai de traction avec mesure de champ optique a été mené sur une plaque perforée aléatoirement en alliage NiTi superélastique. Afin de dimensionner le cycle de chargement, une première modélisation du comportement a été effectuée à l'aide d'une courbe de traction et d'une formulation d'élasto-hystérésis. La comparaison expérimentale-numérique est cohérente et montre une déformation maximale de 8% autour des trous. Cependant, l'incertitude expérimentale due à la diffraction du verre doit être évaluée et si possible supprimée.

Références

- [1] Entchev P. and Lagoudas D. Modeling porous shape memory alloys using micromechanical averaging techniques. *Mech. Mater.*, 34(1), 1–24, 2002.
- [2] Entchev P. and Lagoudas D. Modeling of transformation-induced plasticity and its effect on the behavior of porous shape memory alloys. part ii : porous sma response. *Mech. Mater.*, 36(9), 893–913, 2004.
- [3] Machraoui A., Grewe P., and Fischer A. *Koronarstenting-Werkstoff-technik, Pathomorphologie, Therapie*. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 2001.
- [4] Nemat-Nasser S., Su Y., Guo W.-G., and Issacs J. Experimental characterization and micromechanical modeling of superelastic response of a porous niti shape-memory alloy. *J. Mech. Phys. Solids*, 53(10), 893–913, 2005.
- [5] Orgéas L. *Etude expérimentale et numérique du comportement thermo-mécanique d'un alliage à mémoire de forme industriel NiTi*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1997.
- [6] Panico M. and Brinson L. Computational modeling of porous shape memory alloys. *Int. J. Solids Struct.*, 45(21), 5613–5626, 2008.
- [7] Qidwai M., Entchev P., Lagoudas D., and DeGiorgi V. Modeling of thermomechanical behavior of porous shape memory alloys. *Int. J. Solids Struct.*, 38(48-49), 8653–8671, 2001.
- [8] Rio G., Favier D., and Liu Y. Elastohysteresis model implemented in the finite element software herezh++. In Sittner P., Heller L., and Paidar V., editors, *ESOMAT 2009 The 8th European Symposium on Martensitic Transformations*, number 08005. EDP Sciences (www.esomat.org), december 2009.