

Identification de paramètres de comportement d'un alliage à mémoire de forme

R. ECHCHORFI ^a, N. BOURGEOIS ^b, F. MERAGHNI ^a, E.PATOOR ^a

^aLEM3-UMR 7239 CNRS, Arts et Métiers ParisTech, 4 Rue Augustin Fresnel 57078 METZ,

^bLEM3-UMR 7239 CNRS, Université Paul Verlaine Metz, Ile du Saulcy. 57045 METZ,

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'identifier les paramètres d'une loi de comportement d'un alliage à mémoire de forme NiTi. Le modèle utilisé est un modèle phénoménologique à trois variables internes développé par Chemisky-Patoor (2009). Il tient compte à la fois de la transformation martensitique et du maillage. Dans un premier temps, une analyse de sensibilité du comportement thermomécanique du NiTi aux paramètres du modèle a été effectuée. Elle a permis de comprendre l'influence des différents paramètres sur le comportement et de cerner leurs domaines d'intervention. Sur la base de cette analyse de sensibilité, les paramètres du comportement superélastique seront ensuite identifiés à partir d'essais en chargement uniaxial à deux températures différentes en utilisant une méthode d'identification inverse.

Abstract:

The aim of the work is to identify the constitutive law parameters of a NiTi shape memory alloy. The model is a phenomenological model with three internal variables recently developed by Chemisky-Patoor (2009). It may capture both austenite-martensite transformation and twinning. Firstly, a sensitivity analysis of the thermomechanical behavior of NiTi to the model parameters was performed. It helped to understand the influence of various parameters on the behavior and to identify their domains of intervention. Based on this sensitivity analysis, the parameters of superelastic behavior will then be identified from uniaxial tests at two different temperatures using an inverse identification method

Mots clefs : alliages à mémoire de forme, NiTi, transformation martensitique, éléments finis, loi de comportement, modèle, analyse de sensibilité.

1. Introduction

Parmi les matériaux métalliques, les Alliages à Mémoire de Forme (AMF) sont des alliages possédant plusieurs propriétés particulières : la capacité de retrouver la forme initiale et d'y retourner après une déformation, la possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque sa température varie autour d'une température critique. À cette propriété originale s'ajoutent d'autres propriétés mécaniques telles que la superélasticité permettant des allongements, sans déformation permanente, supérieurs à ceux des métaux conventionnels. Ces propriétés des alliages à mémoire de forme sont liées à l'existence d'une transformation de phase à l'état solide appelée transformation martensitique. Cette transformation gère à la fois les hétérogénéités à l'échelle locale [1] et le comportement macroscopique des AMF [2-3]. Par conséquent, le comportement du matériau dépend très fortement de son état microstructural : fraction volumique et orientation des variantes de martensite formées.

Le modèle utilisé dans cette étude prend en compte, non seulement la transformation martensitique mais aussi le mécanisme d'accommodation des macles [4], très important dans les NiTi. L'objectif du travail est d'analyser la sensibilité du comportement thermomécanique aux paramètres du modèle et d'étudier leur effet sur les observables accessibles à travers des essais thermomécaniques. En effet, l'analyse de sensibilité permet de comprendre le rôle de chacun des paramètres de la loi de

comportement, et de déterminer les limites des domaines de leur intervention au cours de sollicitations thermomécaniques simples.

2. Modélisation phénoménologique du comportement thermomécanique

Le modèle utilisé est fondé sur les travaux de Peultier et al. [5, 6, 7]. Il a été modifié et étendu par Chemisky [4]. Ce modèle est de type macroscopique phénoménologique, il considère une relation directe entre les variables internes et la déformation macroscopique de transformation. Ces variables internes sont une moyenne du champ des variables caractéristiques de l'évolution de la microstructure du matériau (fraction volumique des variantes, déformations locales de transformation et d'accommodation des macles). Cette approche convient parfaitement lorsque les modèles rhéologiques sont exploités dans les calculs de structures. Le faible nombre de variables internes implique un temps de calcul sensiblement moins élevé que pour des modèles plus complexes.

Dans ce modèle les constantes élastiques et thermiques sont supposées identiques dans les phases martensitique et austénitique, et le champ de température uniforme. La décomposition de la déformation totale du VER E_{ij}^{tot} peut s'écrire ainsi :

$$E_{ij}^{tot} = E_{ij}^{el} + E_{ij}^T + E_{ij}^{Twin} + E_{ij}^{Th}$$

La déformation macroscopique notée E_{ij}^{Twin} résulte du mécanisme d'accommodation des macles. Ce mécanisme de déformation s'ajoute au mécanisme de transformation de phase, mais ne se produit que lorsque la déformation de transformation E_{ij}^T est faible. Ces déformations sont complémentaires, dans le sens où lorsque l'une est observée, l'autre ne l'est pas ou seulement de façon marginale. E_{ij}^{Th} est la déformation thermique.

Les variables internes considérées dans cette formulation sont donc :

- la fraction volumique de martensite f
- la déformation moyenne de transformation de la martensite ε_{ij}^T avec $E_{ij}^T = f \varepsilon_{ij}^T$
- la déformation moyenne d'accommodation des macles ε_{ij}^{Twin} avec $E_{ij}^{Twin} = f^{FA} \varepsilon_{ij}^{Twin}$

f^{FA} est la fraction volumique de martensite formée autoaccommodée.

Les trois forces thermodynamiques A_k associées respectivement aux variables internes V_k (f , ε_{ij}^T , ε_{ij}^{Twin}) sont définies à partir de l'expression de l'énergie libre de Gibbs ΔG [4-5]:

$$A_k = \frac{\partial \Delta G}{\partial V_k}$$

- la force motrice de transformation, liée à la variable f :

$$A_f = \frac{\partial \Delta G}{\partial f} = B(T - T_0) - \Sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^T + \frac{1}{2} H_\varepsilon^T \varepsilon_{ij}^T \varepsilon_{ij}^T + H_f f$$

B représente la variation de l'entropie autour de T_0 , H_f correspond au pseudo - écrouissage de transformation, alors que H_ε^T est le pseudo - écrouissage de réorientation. T est la température de l'essai et T_0 la température d'équilibre de la transformation.

- la force motrice d'orientation, liée à la déformation de transformation ε_{ij}^T :

$$A_{\varepsilon_{ij}^T} = \frac{\partial \Delta G}{\partial \varepsilon_{ij}^T} = -f \Sigma_{ij}^D + f H_\varepsilon^T \varepsilon_{ij}^T$$

Σ_{ij}^D est le déviateur des contraintes.

- la force d'accommodation des macles, liée à la variable ε_{ij}^{Twin} ,

$$A_{\varepsilon_{ij}^{Twin}} = \frac{\partial \Delta G}{\partial \varepsilon_{ij}^{Twin}} = -f^{FA} \Sigma_{ij}^D + f^{FA} H_{Twin}^T \varepsilon_{ij}^{Twin}$$

H^{Twin} est le pseudo - écrouissage d'accommodation des macles.

Ces trois forces motrices sont reliées ensuite aux processus dissipatifs pour permettre la description de l'évolution des variables internes.

3. Analyse de sensibilité

Pour effectuer l'analyse de sensibilité du modèle, un sous-programme UMAT d'implémentation de la loi de comportement dans le code de calcul par éléments finis Abaqus implicite est utilisé. Pour cette analyse, il est seulement nécessaire de simuler le comportement d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER) du matériau, représenté ici par un cube de côté 1 mm. Entre les différents calculs, seules les conditions aux limites en déplacement et en température varient.

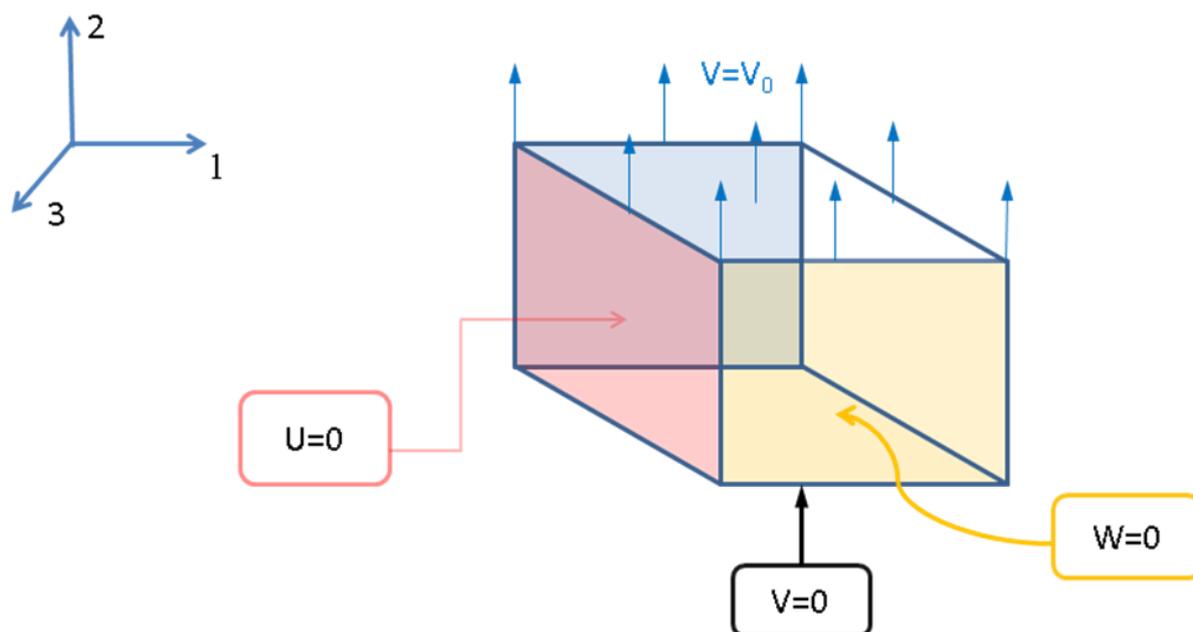


FIG. 1 – Conditions aux limites.

U , V et W représentent respectivement les déplacements dans les directions 1, 2 et 3.

Trois types de simulation ont été réalisés :

- Simulation du comportement superélastique en traction ou compression simple à une température constante T_{se} supérieure à la température de transformation A_f .
- Essai de réorientation : refroidissement à partir d'une température initiale de 120°C jusqu'à une température T_r sensiblement inférieure à M_s puis chargement en traction.
- Essai de traction - compression : cycle de charge décharge à la température constante T_{se} .

Pour tous les résultats présentés, les températures de transformation de l'alliage sont respectivement $M_s = 20^\circ\text{C}$ et $A_f = 60^\circ\text{C}$. Rappelons que M_s est la température de début de transformation dans le sens austénite – martensite, et que A_f est la température de fin de transformation austénite – martensite. Les températures d'essai choisies pour les essais simulés sont $T_{se} = 90^\circ\text{C}$ et $T_r = -60^\circ\text{C}$.

Globalement, le modèle requiert seize paramètres liés au matériau. Pour treize de ces seize paramètres, cinq simulations différentes ont été menées. Les cinq valeurs du paramètre sont appelées respectivement : $Pmin$, $Préf$, $Pmax$, $Val1$, $Val2$ (voir tableau 1). Les valeurs intermédiaires $Val1$, $Val2$ sont respectivement dans les intervalles $[Pmin, Préf]$ et $[Préf, Pmax]$.

L'analyse de sensibilité a été menée sur un AMF NiTi dont les caractéristiques nominales sont présentées dans le tableau 1. Les paramètres matériau utilisés pour le comportement du NiTi et introduits dans le sous-programme UMAT sont :

E le module de Young en MPa, et ν le coefficient de Poisson,

α le coefficient de dilatation thermique en $^{\circ}\text{C}^{-1}$,

$\varepsilon^{\text{Ttracmax}}$ la déformation de transformation maximale en traction,

$\varepsilon^{\text{TFAttrac}}$ la déformation de transformation maximale en traction à partir de martensite formée auto-accommodée,

$\varepsilon^{\text{Tcompmax}}$ la déformation de transformation maximale en compression,

b_d la pente de transformation directe en traction dans le diagramme (σ, T) en $\text{MPa}/^{\circ}\text{C}$,

b_r la pente de transformation inverse en traction dans le diagramme (σ, T) en $\text{MPa}/^{\circ}\text{C}$,

M_s la température de début de transformation austénite \rightarrow martensite en $^{\circ}\text{C}$,

A_f la température de fin de transformation austénite \rightarrow martensite en $^{\circ}\text{C}$,

r_f le coefficient définissant l'amplitude des boucles internes (pour des chargements partiels),

$F^{\varepsilon T}$ la contrainte limite de début de réorientation en MPa,

H^f le pseudo - écrouissage de transformation en MPa,

$H^{\varepsilon T}$ le pseudo - écrouissage de réorientation en MPa,

H^{twin} le pseudo - écrouissage d'accommodation des macles en MPa,

H^s qui est associé au décalage des températures de retour austénitique de la martensite orientée et exprimé en MPa.

	MIN	Val1	référence	Val2	MAX
E	25 000	40 000	70 000	85 000	100 000
ν	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
α	10^{-6}	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}
$\varepsilon^{\text{Ttracmax}}$	0,01	0,025	0,05	0,075	0,1
$\varepsilon^{\text{TFAttrac}}$	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08
$\varepsilon^{\text{Tcompmax}}$	0,008	0,02	0,04	0,06	0,08
b_d	2	3,5	5	7,5	10
b_r	2,4	4,2	6	9	12
Ms			20		
Af			60		
r_f			0,6		
$F^{\varepsilon T}$	10	50	100	500	1000
H^f	0,1	1	4	50	100
$H^{\varepsilon T}$	100	500	1 000	5 000	10 000
H^{twin}	10^2	10^3	$4,0 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^5$	10^6
H^s	0,1	10	50	500	1 000

Tableau 1 – Valeurs des paramètres matériau exploitées dans l'analyse de sensibilité

La figure 2 montre l'influence du paramètre H_f , appelé pseudo écouissage de transformation, et qui représente la pente du plateau de transformation martensitique, sur une courbe contrainte-déformation en traction simple.

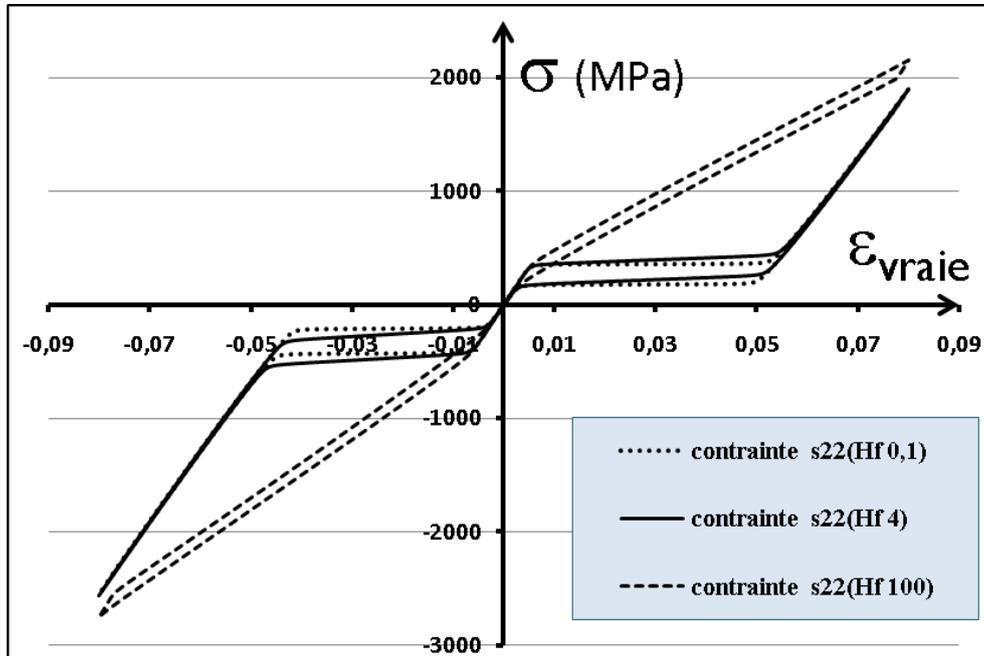


FIG. 2 – Courbes de contrainte-déformation simulées pour un essai de charge-décharge en traction-compression séquentielle. Sensibilité au paramètre de pseudo-écrouissage de transformation H_f .

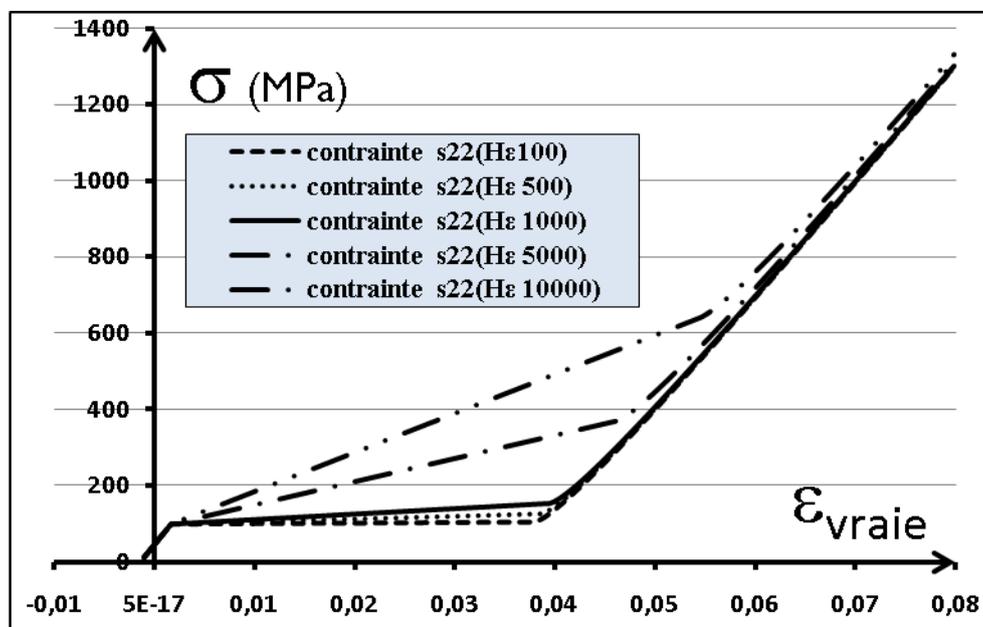


FIG. 3 – Courbes de contrainte-déformation simulées pour un essai de réorientation à une température de -60°C . Sensibilité au paramètre de pseudo-écrouissage de réorientation H^{eT} .

La figure 3 montre l'influence du paramètre H^{eT} , associé au pseudo écouissage de réorientation. Ce paramètre agit directement sur la pente du plateau de réorientation et aussi sur le point de fin de

transformation lors d'un essai de traction à basse température (essai dit de réorientation). A cette température le matériau est martensitique. La martensite qui s'est formée lors du refroidissement du matériau, qui est au départ autoaccomodée (déformation moyenne nulle), s'oriente peu à peu sous l'effet de la sollicitation mécanique appliquée.

Il est difficile de présenter dans cet article l'ensemble des courbes qui permettraient de visualiser individuellement l'influence de chaque paramètre. D'autre part, cette analyse n'est pas suffisante, car elle ne permet pas d'étudier les éventuelles dépendances entre les paramètres et donc de connaître par avance leur identifiabilité réelle. C'est uniquement le résultat final de cette analyse de courbes qui est donné rapidement. Les paramètres (E , ν , $\varepsilon^{Tracmax}$, b_d , b_r , H^f) interviennent dans la description du comportement superélastique. Ils sont identifiables à partir des courbes de charge-décharge avec transformation complète de l'AMF, en traction uniaxiale. Les alliages à mémoire de forme NiTi présente un comportement dissymétrique en traction et compression. Pour identifier le paramètre $\varepsilon^{Tcompmax}$ un essai de compression est nécessaire. Les paramètres (F^{ε^T} , H^{ε^T} , $H^{\varepsilon^{Twin}}$, ε^{TFAtac}) gèrent le comportement en réorientation, ils sont identifiables sur un essai de traction à basse température (sur martensite autoaccomodée). Le paramètre r_f intervient sur le comportement du matériau lors de chargements partiels. Des chargements de ce type sont donc nécessaires pour identifier ce paramètre. Les températures de transformation sont mesurables par DSC (Differential Scanning Calometry).

4. Conclusion

L'analyse de sensibilité a été effectuée en simulant d'une part des essais mécaniques monotones ou séquentiels à différentes températures, d'autre part des essais de refroidissement sans contrainte suivi d'un chargement en traction, pour étudier les effets de la réorientation de la martensite. Une analyse fine des effets des différents paramètres de la loi de comportement est effectuée. Cette analyse de sensibilité a permis de comprendre l'influence de chaque paramètre et de lui associer un sens physique. Les paramètres identifiables à partir d'essais simples sont hiérarchisés. Par exemple, les paramètres (E , ν , $\varepsilon^{Tracmax}$, b_d , b_r , H^f), associés au comportement superélastique, sont identifiables à partir de deux essais de traction uniaxiale à deux températures différentes. Un travail en cours a pour objectif de développer un algorithme d'identification inverse en vue de déterminer simultanément un grand nombre de paramètres à partir d'un nombre réduit d'essais.

References

- [1] Merzouki T., Collard C., Bourgeois N., Ben Zineb T. et Meraghni F., Coupling between measured kinematic fields and multicrystal SMA finite element calculations, *Mechanics of Materials*, 42, 72-95, 2010.
- [2] Patoor E. et Berveiller M., Les alliages à mémoire de forme. Hermès, 1990.
- [3] Patoor E. et Berveiller M., Technologie des alliages à mémoire de forme. Hermès, 1994.
- [4] Chemisky Y., Modélisation du comportement macroscopique des alliages à mémoire de forme - Application aux matériaux composites, Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine de Metz, 2009.
- [5] Peultier, B., Alliages à mémoire de forme : modélisation et calcul de structures. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz, 2005.
- [6] Peultier, B., Ben Zineb, T. et Patoor, E., Macroscopic constitutive law of shape memory alloy thermomechanical behaviour. Application to structure computation by FEM, *Mechanics of Materials*, 38, 510-524, 2006.
- [7] Peultier, B., Ben Zineb, T. et Patoor, E., A simplified micromechanical constitutive law adapted to the design of shape memory applications by finite element methods, *Mat. Science & Eng. A*, 481-482, 384-388, 2008.