

Influence de la courbure d'un fil en AMF sur son comportement en traction dans une perspective de confinement de composants en béton

H. TRAN, X. BALANDRAUD, J.F. DESTREBECQ

Clermont Université, Laboratoire de Mécanique et Ingénieries, Université Blaise Pascal & Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA), 63175 AUBIERE Cedex

Résumé :

L'étude porte le comportement à la traction d'un fil en alliage à mémoire de forme (AMF) préalablement enroulé sur un substrat de forme cylindrique. Cette étude s'inscrit dans la thématique de la création de précontraintes dans des composants en béton par confinement. Des essais de courbure-décourbure-traction sont réalisés sur des fils en Ni-Ti à l'état martensitique. L'influence de la courbure initiale sur la réponse des fils est analysée. Un modèle thermomécanique est adapté afin d'analyser les résultats expérimentaux. L'asymétrie traction-compression de la réponse de l'AMF est prise en compte dans le modèle. Les résultats montrent que l'existence d'une courbure initiale entraîne une diminution de la contrainte moyenne de traction dans le fil pour une déformation donnée.

Abstract :

The study deals with the tensile behaviour of a wire of shape memory alloy (SMA) which was previously wrapped around a cylindrical substrate. The study is a part of a project related to the creation of prestress states in concrete components by confinement. Curvature-decurvature-tension tests are carried out on Ni-Ti wires in a martensitic state. The influence of the curvature initially applied on the tensile responses of the wires is analyzed. A thermo-mechanical model is adapted to analyze the experimental results. The tension-compression asymmetry of the response of the SMA is included in the model. The results show that the existence of an initial curvature causes a decrease in the mean tensile stress in the wire for a given strain.

Mots clefs : alliages à mémoire de forme, modèle thermomécanique, courbure, autocontraintes

1 Introduction

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux actifs qui présentent des propriétés thermomécaniques particulières telles que la pseudoélasticité et l'effet mémoire [1]. Ces propriétés ont pour origine physique une transformation de phases solide-solide pilotée par la contrainte et la température. Les phases « mère » et « produit » sont appelées austénite et martensite, respectivement. Du fait de leurs propriétés exceptionnelles, les AMF ont trouvé des applications dans plusieurs domaines tels que l'ingénierie mécanique ou le domaine médical. Dans le domaine du Génie Civil, des études ont visé à utiliser les AMF comme renforts externes ou internes de composants en béton ou pour créer des structures actives, capables d'ajuster leur comportement aux conditions de chargement. En particulier, l'effet mémoire a été utilisé pour la création de précontraintes dans des poutrelles en béton renforcées par des fils en Ni-Ti [2]. Des effets de confinement ont également pu être obtenus à l'aide de fils en Ni-Ti enroulés sur des cylindres en béton [3]. Ces études ont montré que l'association béton/AMF permet d'obtenir des gains significatifs en termes de résistance et de ductilité ou pour retarder la fissuration. Les études montrent toutefois que l'interaction béton/AMF peut être complexe. Ainsi, dans le cas des cylindres en béton, l'effet de confinement obtenu est fortement influencé par la courbure imposée au fil d'AMF par le substrat béton [3].

Dans ce contexte, le but de la présente étude est d'étudier l'influence d'une courbure préalable sur le comportement en traction de fils d'AMF à l'état martensitique. Dans un premier temps, une étude

expérimentale est menée sur des fils en Ni-Ti. Les fils utilisés sont à l'état martensitique durant les essais réalisés à température ambiante. Dans un second temps, une adaptation du modèle de Leclercq et L'excellent [4] est réalisée afin d'analyser les résultats expérimentaux. Le modèle proposé intègre le comportement asymétrique traction/compression de l'AMF. Grâce à ce modèle, l'évolution des contraintes dans la section du fil est ensuite modélisée en détail. L'analyse vise à éclaircir certains aspects de l'interaction complexe entre l'AMF et la courbure imposée par le substrat béton.

2 Etude expérimentale

On utilise des fils en AMF de composition Ni_{50,8}-Ti_{49,2} (% at.), de longueur 150 mm et de diamètre $d = 1$ mm. Les températures de transformation sont $A_s = 23^\circ\text{C}$, $A_f = 28^\circ\text{C}$, $M_s = -10^\circ\text{C}$, $M_f = -25^\circ\text{C}$.

Les essais sont réalisés selon la procédure suivante :

- Enroulement des fils et mise à l'état martensitique à température ambiante – L'opération s'effectue en plusieurs étapes. Tout d'abord, les fils sont placés dans des rainures circulaires usinées en surface d'un bloc en aluminium, chaque rainure ayant un rayon déterminé. Le bloc est ensuite chauffé à une température de $+80^\circ\text{C}$ (supérieure à A_f) afin que les fils passent à l'état austénitique. Puis il est refroidi à une température de -30°C (inférieure à M_f) afin d'amener les fils à l'état martensitique. Enfin, le bloc est ramené à température ambiante ($19^\circ\text{C} \pm 1.5^\circ\text{C}$). Chaque fil reste à l'état martensitique (car $A_s = 23^\circ\text{C}$) dans l'état de *courbure initiale* imposée par le rayon de la rainure.
- Extraction des fils des rainures du bloc en aluminium – Lorsque l'on sort les fils des rainures, ils ne se redressent pas complètement. On mesure la *courbure résiduelle* de chaque fil en configuration relâchée.
- Redressement des fils et étirement – Les fils sont ensuite redressés avant d'être testés à l'aide d'une machine de traction uniaxiale MTS. Chaque fil est étiré à un niveau de déformation $\varepsilon_f = 0.39\%$ qui correspond au seuil de début d'orientation de la martensite. On mesure la contrainte moyenne σ_f qu'il faut appliquer au fil pour atteindre ce niveau de déformation.

Dix séries d'essais sont réalisées. Chaque série correspond à une valeur de la courbure initiale et est répétée trois fois. Les résultats obtenus sont présentés dans la Section 4. L'influence de la courbure initiale sur le comportement du fil en AMF sera notamment discutée.

3 Modèle thermomécanique

Dans cette section, un modèle de loi de comportement uniaxial de l'AMF à l'état martensitique est présenté. Il prend en compte l'asymétrie traction/compression du comportement. Ce modèle est ensuite appliqué à la modélisation du comportement d'une section du fil et à la simulation des essais réalisés.

3.1 Modèle de comportement en traction-compression

Le modèle développé est basé sur une adaptation du modèle de Leclercq et L'excellent [4,5]. Il est défini pour le cas de traction-compression simple et il intègre l'asymétrie traction/compression en se basant sur les résultats de [6-9]. Trois paramètres de fraction volumique de martensite sont considérés : Z_{tra} , Z_{com} , et Z_{iso} . Ces trois grandeurs définissent respectivement la martensite orientée en traction, la martensite orientée en compression et la martensite autoaccommodée. A tout instant, l'AMF reste entièrement à l'état martensitique. On a donc tout au long d'un essai :

$$Z_{tra} + Z_{com} + Z_{iso} = 1 \quad (1)$$

La Figure 1 donne la représentation du modèle sous la forme d'un diagramme contrainte-déformation. La formulation de chaque branche du modèle a été linéarisée pour faciliter sa mise en œuvre. Sur la droite de pente E_0 passant par l'origine du repère, l'AMF est à l'état martensitique autoaccommodé ($Z_{tra} = Z_{com} = 0$). L'orientation de la martensite se produit lors du chargement mécanique. Dans le demi-plan situé à gauche de la droite passant par l'origine, Z_{com} est non nul. A droite, c'est Z_{tra} qui est non nul. Le modèle intègre différents paramètres, dont plusieurs modules constants (E_0 , C_1 , C_3 , G_1 et G_2) et des variables dépendant de l'état d'orientation de la martensite (C_2 , C_4 , ε_{sup} et ε_{inf}). L'asymétrie traction/compression du comportement de l'AMF est prise en compte à travers un rapport entre les seuils d'orientation $\sigma_{tra}^0 > 0$ et $\sigma_{com}^0 < 0$ [7,9] (voir Figure 1). Ce modèle est utilisé dans la section suivante pour analyser la réponse d'un fil de section circulaire lorsque l'on fait varier sa courbure.

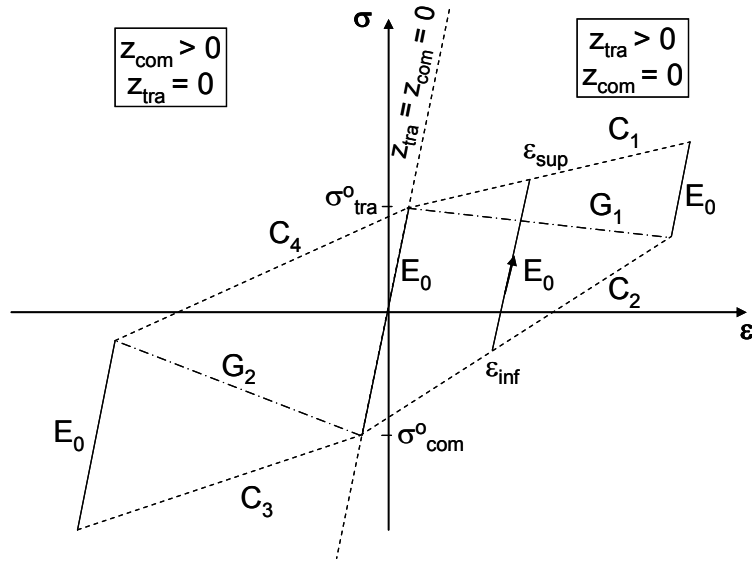


FIG. 1 – Diagramme contrainte-déformation linéarisé de l'AMF à l'état martensitique.

3.2 Application à une section de fil en AMF

Le modèle élaboré dans la section précédente est appliqué à la modélisation d'une section du fil courbé. En pratique pour le calcul, la section est discrétisée en n bandes élémentaires de hauteurs dy (voir Figure 2).

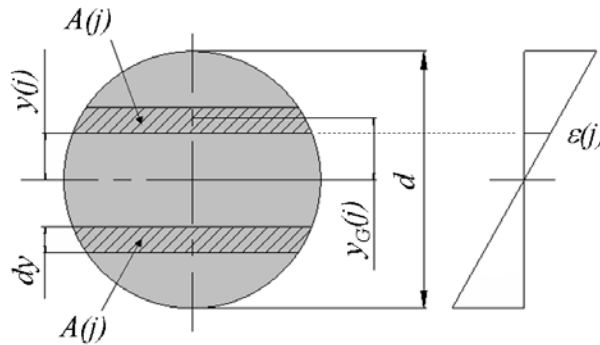


FIG. 2 – Discrétisation de la section du fil.

La déformation d'un point situé à la base d'une bande j est donnée par :

$$\varepsilon(j) = y(j) \times \theta \tag{2}$$

où θ est la courbure du fil et où $y(j)$ est la distance entre le centre de la section et le point considéré. La part du moment de flexion équilibrée par la bande j est donnée par :

$$dM(j) = y_G(j) \times A(j) \times \frac{\sigma(j) + \sigma(j+1)}{2} \tag{3}$$

où :

- $y_G(j)$ est la distance entre le centre de la section et le centre de la bande j ;
- $\sigma(j)$ et $\sigma(j+1)$ sont les contraintes en bas et en haut de la bande j . La relation entre la contrainte et la déformation est faite *via* le modèle présenté dans la section 3.1 ;
- $A(j)$ est l'aire de la bande j :

$$\left\{ \begin{array}{l} A(j) = \left\{ \varphi(j) - \varphi(j+1) + \frac{\sin [2 \varphi(j+1)]}{2} - \frac{\sin [2 \varphi(j)]}{2} \right\} \times \frac{d^2}{4} \\ \text{avec } \varphi(.) = \arccos \left(\frac{2 y(.)}{d} \right) \end{array} \right. \tag{4}$$

Le moment de flexion total est ensuite obtenu par sommation sur toutes les bandes :

$$M = \sum_{j=1}^n dM(j) \quad (5)$$

Ces équations sont combinées avec les équations du modèle de comportement du matériau pour déterminer l'évolution de la distribution des contraintes et des variables internes Z_{tra} et Z_{com} dans la section du fil, en fonction de la courbure imposée.

La Figure 3 présente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation pour deux points de la section du fil : le point le plus « haut » (trait plein) et le point le plus « bas » (trait pointillé). A l'état initial (1), le fil d'AMF est droit et à l'état martensitique autoaccommodé. A l'état (2), le fil est dans l'état de déformation imposé par le rayon de courbure de la rainure. A l'état (3), il est redressé et ramené à un état de déformation nulle. A l'état (4), il est étiré jusqu'au seuil d'orientation. La Figure 3 montre la dissymétrie de la distribution des contraintes dans le fil : à l'état final (4), le point « haut » est moins contraint que le point « bas ». Le modèle est ensuite utilisé pour analyser les résultats des essais.

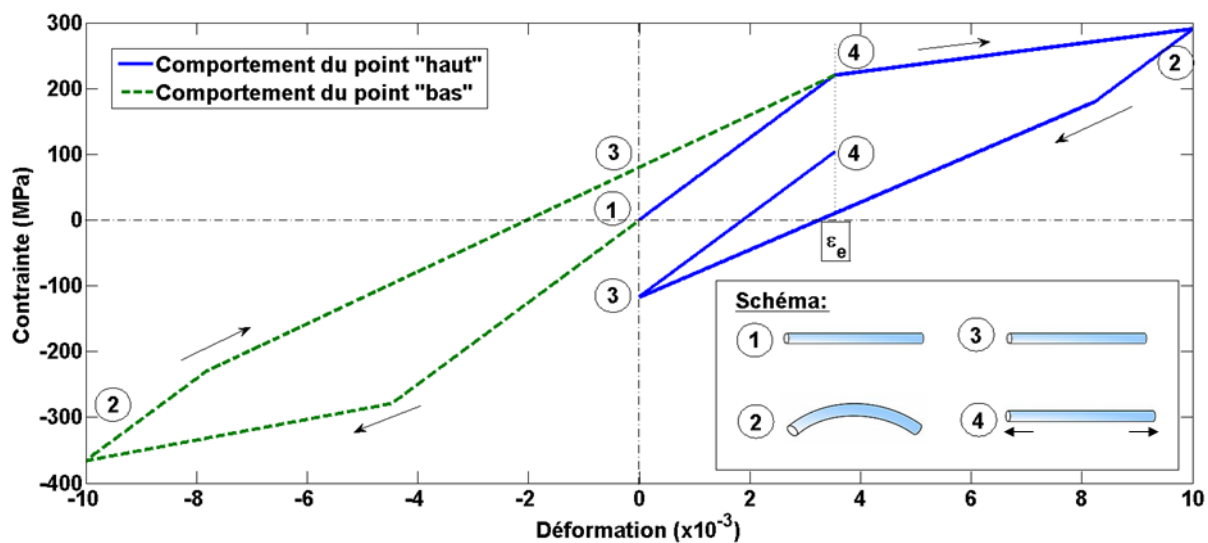


FIG. 3 – Comportement du point « haut » et du point « bas » dans une section de fil en cours d'essai.

4 Discussion

Cette section présente l'interprétation des résultats des essais à partir d'une comparaison entre expérimentation et modélisation. La distribution des variables dans la section du fil ainsi que l'influence de la courbure initiale sur le comportement du fil sont discutées.

4.1 Analyse des résultats dans une section de fil en AMF

La Figure 4 présente la distribution des déformations, des contraintes et des fractions de martensite orientée (Z_{tra} et Z_{com}) pour trois étapes de l'essai.

- Dans l'état courbé (Figure 4a), la zone de la section proche du centre du fil est restée à l'état de martensite autoaccommodée ($Z_{tra} = Z_{com} = 0$). Une réorientation de la martensite s'est produite ailleurs : $Z_{tra} > 0$ en haut et $Z_{comp} > 0$ en bas. L'asymétrie observée pour la distribution de la contrainte dans la section résulte de l'asymétrie compression-traction du modèle.
- Dans l'état décourbé et redressé (déformations ramenées à zéro, Figure 4b), on observe qu'il existe des contraintes non nulles dans le fil. Ces contraintes créent un moment. On observe que les zones contraintes correspondent à des fractions volumiques Z_{tra} et Z_{com} non nulles.
- Après traction (déformation positive uniforme dans la section, Figure 4c), on observe une distribution de la contrainte de traction non homogène dans la section du fil. Ceci est dû au fait qu'il existe une partie de la section de fil où Z_{tra} est non nul.

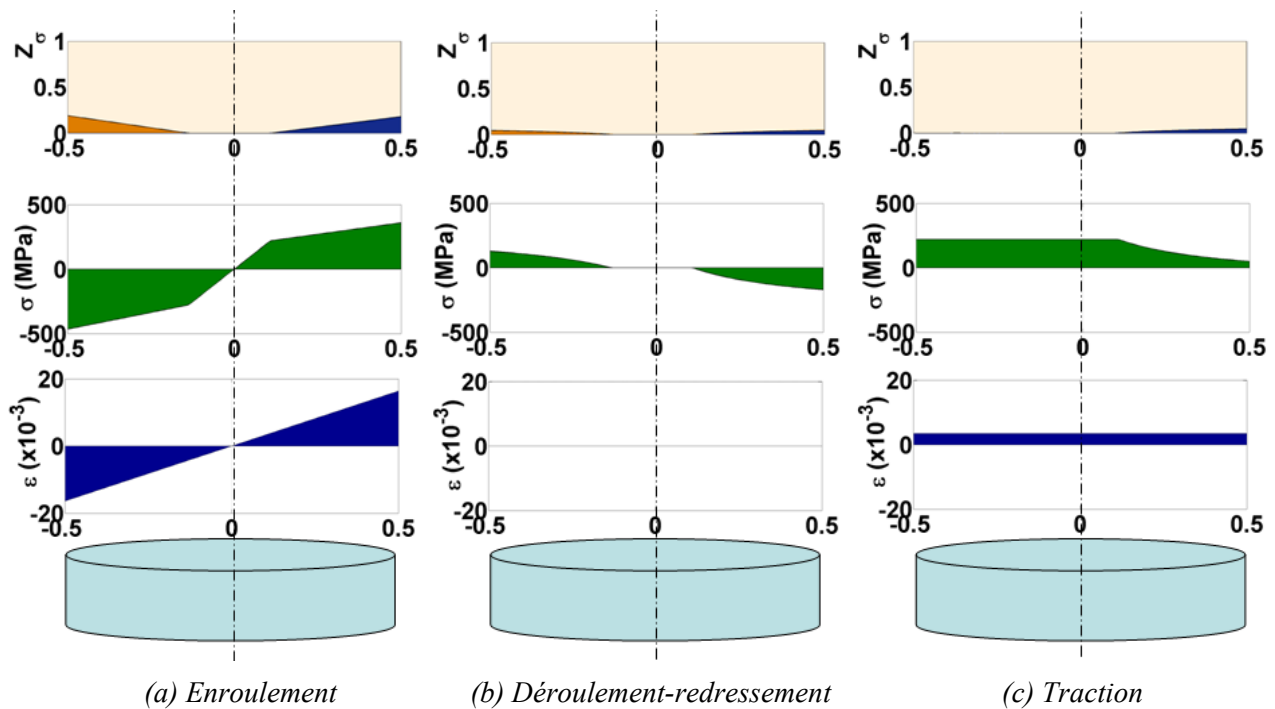


FIG. 4 – Distributions de la déformation, de la contrainte et des fractions volumiques de martensite dans une section du fil à différentes étapes de l'essai : étapes (2), (3) et (4) de la Figure 3.

4.2 Contrainte finale en fonction de la courbure initiale

La Figure 5a présente la contrainte σ_f (contrainte moyenne dans le fil à la fin de l'essai de traction, voir section 2) en fonction de la courbure initiale (courbure imposée par le rayon de la rainure). La modélisation est en accord avec les mesures. On observe que la courbure initiale a pour effet de diminuer la contrainte moyenne finale σ_f obtenue. Pour un fil non préalablement enroulé, la contrainte σ_f vaut 220 MPa. La réduction de σ_f est très faible pour une courbure initiale inférieure à 8 m^{-1} . La perte atteint 30% pour une courbure initiale de 33 m^{-1} . La courbure initiale influe donc de manière significative sur le niveau de la contrainte moyenne (réduction) ; la Figure 4c montre que ce phénomène résulte d'un état d'orientation résiduelle en traction de la martensite dans une partie de la section du fil.

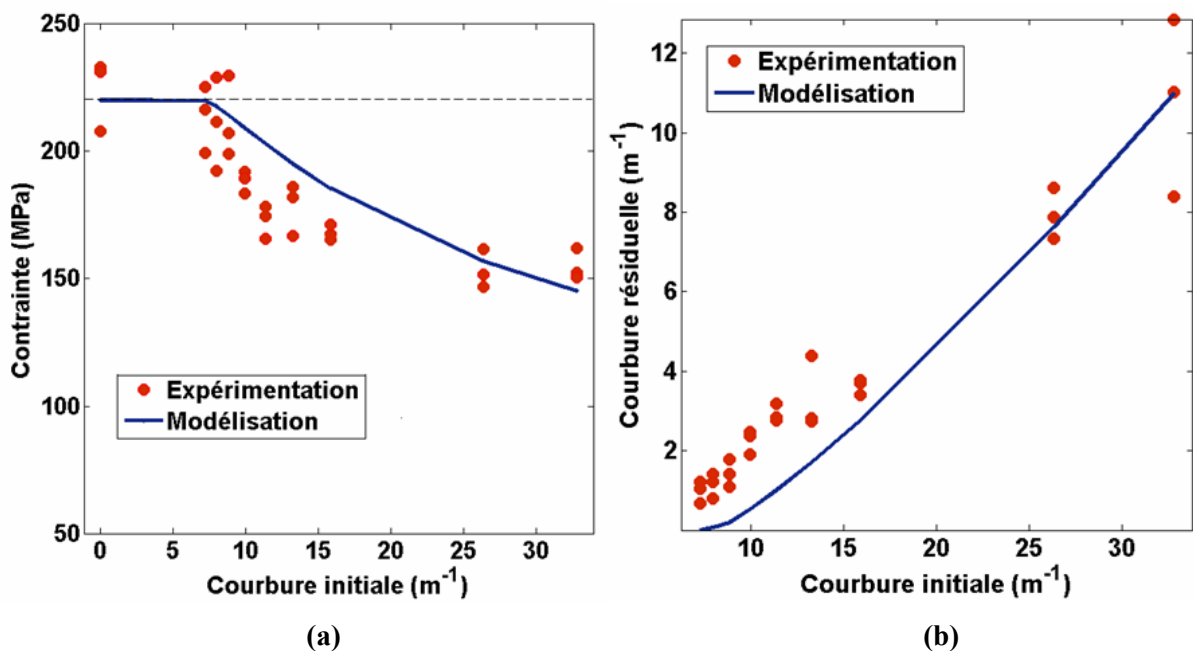


FIG. 5 – Influence de la courbure initiale sur le comportement du fil en AMF : (a) influence sur la contrainte finale (b) influence sur la courbure résiduelle en configuration relâchée.

4.3 Courbure résiduelle

Le modèle est maintenant appliqué pour déterminer la courbure résiduelle d'un fil en AMF après sortie de sa rainure du bloc en aluminium, en configuration relâchée (voir section 2). Cette courbure résiduelle est causée par l'existence d'autocontraintes due à un état d'orientation de la martensite non uniforme dans la section du fil. Cet état d'autocontrainte résulte de la redistribution des contraintes dans la section du fil au cours du processus de décourbure, jusqu'à l'obtention d'un moment résultant nul (Eq. 5). Dix séries de trois essais ont été réalisés pour mesurer la courbure résiduelle du fil en AMF en fonction de la courbure initiale. La Figure 5b présente les valeurs simulées et expérimentales de la courbure résiduelle en fonction de la courbure initiale. Malgré la dispersion, un assez bon accord est obtenu entre modèle et expérimentation.

5 Conclusion

L'étude a montré l'influence d'une courbure initiale imposée à un fil en Ni-Ti à l'état martensitique sur son comportement ultérieur en traction. Un modèle de comportement en traction-compression a été développé pour analyser cet effet. Ce modèle intègre l'asymétrie traction/compression ; l'état thermomécanique actuel est pris en compte par trois variables internes quantifiant les fractions volumiques de martensite. Il permet de simuler la réponse du fil à une histoire de sollicitation donnée, et notamment d'accéder à l'évolution des contraintes, des déformations et des fractions de martensite dans une section du fil au cours d'essais de courbure-décourbure-traction. Les données numériques issues du modèle ont été confirmées par les résultats des essais réalisés. Ces résultats montrent que le comportement du fil à la traction ne dépend pas seulement des propriétés du matériau, mais aussi de la courbure initiale imposée au fil. Notamment, l'existence d'une courbure initiale entraîne une diminution de la contrainte moyenne de traction dans le fil pour une déformation donnée. Pour le fil de 1 mm utilisé, la diminution observée atteint 30% pour une courbure initiale de 33 m^{-1} . Elle s'avère en revanche négligeable si la courbure initiale est inférieure à 8 m^{-1} .

La perspective de ce travail est l'utilisation de fils d'AMF pour le confinement de composants en béton. Les résultats obtenus ici permettent de mieux comprendre l'interaction complexe béton/AMF observée dans une étude antérieure [3]. L'influence de la courbure du fil sur son comportement thermomécanique est un point clé pour l'application visée. Un champ d'application possible se situe dans la thématique du renforcement actif des structures en béton.

References

- [1] K. Otsuka, C. M. Wayman, Shape memory materials, Cambridge University Press, Cambridge 2002.
- [2] H. Tran, A. Debska, X. Balandraud, J.F. Destrebecq, Utilisation de fils en alliage à mémoire de forme pour la création de précontraintes dans des poutrelles en béton, Annales du bâtiments et des travaux publics, No 5, 26-31, 2010.
- [3] J.F. Destrebecq, X. Balandraud, Interaction between concrete cylinders and shape-memory wires in the achievement of active confinement, in Materials with Complex Behaviour, Vol. 3, Part 1, 19-34, Springer, Advanced Structured Materials, 2010.
- [4] S. Leclercq, C. LExcellent, A general macroscopic description of the thermo-mechanical behaviour of shape memory alloys, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 44(6), 953-957, 1996.
- [5] H. Tran, X. Balandraud, J.F. Destrebecq, Recovery stresses in SMA wires for civil engineering applications: experimental analysis and thermomechanical modelling, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, accepted, 2011.
- [6] Y. Liu, Z. Xie, J.V. Humbeeck, L. Delaey, Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys, Acta Materialia, Vol. 46, No. 12, pp. 4325-4338, 1998.
- [7] F. Thiebeaud, C. LExcellent, M. Collet, E. Foltete, Implementation of a model taking into account the asymmetry between tension and compression, the temperature effects in a finite element code for shape memory alloys structures calculations, Computational Materials Science 41, 208-221, 2007.
- [8] M.F.-X Wagner, G. Eggeler, Stress and strain states in a pseudoelastic wire subjected to bending rotation, Mechanics of Materials 38, 1012-1025, 2006.
- [9] J. Rejzner, C. LExcellent, B. Raniecki, Pseudoelastic behaviour of shape memory alloys beams under pure bending : experiments and modelling, International Journal of Mechanical Sciences 44, 665-686, 2002.