

UTILISATION DE FILS EN ALLIAGE À MÉMOIRE DE FORME POUR LA CRÉATION DE PRÉCONTRAINTE DANS DES POUTRELLES EN BÉTON

Hanh TRAN, Aleksandra DEBSKA, Xavier BALANDRAUD, Jean-François DESTREBECQ

Clermont Université, Laboratoire de Mécaniques et Ingénieries, Université Blaise Pascal
& Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA), 63175 Aubière Cedex
Politechnika Krakowska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych,
31-155 Cracovie, Pologne

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 [1-2]. Ces propriétés ont pour origine physique une transformation austénite-martensite pilotée par la contrainte et la température. Les phases martensite et austénite sont présentes respectivement à basse et à haute température. Un AMF a la capacité de conserver la forme qui lui est donnée à l'état martensitique ; il revient à sa forme initiale si l'on provoque le retour à l'état austénitique par élévation de température (effet mémoire). Du fait de leurs propriétés exceptionnelles, les AMF ont trouvé des applications en ingénierie mécanique ou aérospatiale ainsi que dans le domaine médical.

Dans le domaine du Génie civil, certaines études visent à utiliser les propriétés de ces alliages pour créer des structures actives, capables d'ajuster leur comportement aux conditions de chargement par exemple [3]. L'effet d'amortissement lié à la pseudoélasticité a également pu être utilisé pour le contrôle des effets dynamiques [4-5] ou pour la protection sismique de ponts ou de bâtiments historiques [6-9]. L'usage des AMF en Génie civil reste néanmoins très limité, pour partie du fait de leur coût, mais également par manque de connaissance des mécanismes impliqués dans leur association à des matériaux

tel que le béton [10]. A ce jour, seules quelques études préliminaires permettent d'entrevoir l'intérêt d'exploiter les propriétés exceptionnelles de ces alliages en les associant au matériau béton sous la forme de renforts internes ou externes [11-13]. Des effets de confinement ont également été obtenus à l'aide de fils AMF enroulés sur des cylindres en béton [14-15]. Ces études ont démontré que l'association béton-AMF permet d'obtenir des gains significatifs en termes de résistance et de ductilité ou pour retarder la fissuration.

Dans la présente étude, des fils en nickel-titane sont utilisés comme renforts extérieurs pour créer des états de précontrainte dans des poutrelles en béton. Le but de l'étude est la mise en évidence de l'influence des propriétés de l'AMF utilisé sur les états de précontrainte obtenus. A cette fin, les températures de transformation austénite-martensite ont été choisies de manière à faciliter l'obtention de contraintes à température ambiante. Dans un premier temps, les fils sont caractérisés du point de vue de leur comportement thermomécanique. Dans un second temps, ils sont étirés à l'état martensitique avant d'être fixés à leurs extrémités sur les poutrelles en béton. Le nombre et la prédéformation des fils sont les paramètres de l'étude. L'activation thermique de l'effet mémoire provoque leur mise en tension, entraînant par réaction la mise en contrainte du béton. Le développement de l'état de précontrainte est évalué par mesure des déformations

induites dans chaque poutrelle. L'influence de l'étirement initial des fils à l'état martensitique et des températures de transformation est discutée dans la perspective de leur utilisation pour la création de précontraintes dans des composants en béton. On montre en particulier que l'état de précontrainte peut se trouver limité dans certains cas par une production de martensite dans les fils tendus lors du retour à la température ambiante.

2. CRÉATION DE FORCES À L'AIDE DE FILS EN ALLIAGE À MÉMOIRE DE FORME

2.1 Propriétés thermomécaniques des AMF

En fonction de la température, un même AMF peut présenter des propriétés mécaniques très différentes. Cette section rappelle brièvement les phénomènes physiques utilisés dans la présente étude pour créer des effets de précontrainte.

Les propriétés macroscopiques des AMF trouvent leur origine dans un phénomène de transformation de phase solide-solide piloté par la contrainte et la température [1-2]. La phase mère est appelée *austénite* (notée *A* dans la suite). Elle est à symétrie cubique à corps centré dans tous les AMF connus. La phase produit est appelée *martensite* (notée *M* dans la suite). Sa symétrie cristalline dépend principalement de la composition de l'alliage. Du fait de la perte de symétrie durant la transformation $A \rightarrow M$, la martensite se présente sous la forme de plusieurs variantes (notées M_i dans la suite) qui correspondent au même cristal, mais orienté différemment dans l'espace par rapport au cristal d'austénite. Le déplacement des atomes durant la transformation $A \rightarrow M_i$ se traduit par une *déformation de transformation*. Quand les différentes variantes existent en proportion égale, la déformation macroscopique équivalente est pratiquement égale à zéro. On parle alors de *variantes de martensite auto-accommodées* [16].

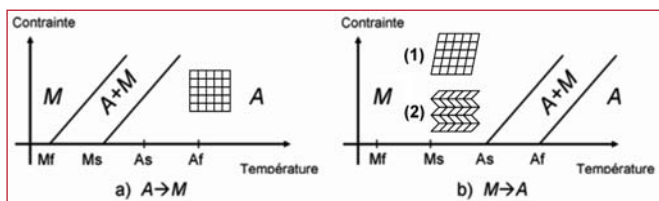


Figure 1. Diagrammes d'équilibre entre les phases austénite *A* et martensite *M* : (1) martensite orientée, (2) martensite auto-accommodée.

La Figure 1 présente les diagrammes de phase indiquant l'état du matériau en fonction de la température et de la contrainte. Le matériau peut être soit purement austénitique *A*, soit purement martensitique *M* (avec diverses proportions de variantes de martensite), soit un mélange des deux phases :

- A partir de l'austénite, la martensite peut être obtenue soit en diminuant la température, soit en appliquant une contrainte. Sur la Figure 1-a, les deux lignes inclinées correspondent au

début et à la fin de la transformation $A \rightarrow M$. On note *Ms* et *Mf* les températures de début et de fin de transformation à contrainte nulle. Notons que lors d'un refroidissement à contrainte nulle, la martensite obtenue est entièrement auto-accommodée : il n'y a donc pas de déformation macroscopique. En revanche, la martensite produite par un chargement mécanique n'est pas auto-accommodée : l'orientation des variantes sous l'effet de la contrainte s'accompagne d'une déformation importante.

- La Figure 1-b présente le diagramme de phase lorsque l'on part de l'état martensitique. L'étirement de la martensite à température constante se traduit par une modification des proportions de variantes de martensite, tout en gardant la proportion totale à 100%. On dit que la martensite « s'oriente » et la déformation obtenue est préservée lors de la décharge. On peut ainsi obtenir des formes macroscopiques différentes après déchargement. Le retour à l'état austénitique est obtenu par une élévation de température. A contrainte nulle, la transformation débute à la température *As* et se termine à la température *Af*. Le passage à l'état austénitique s'accompagne d'un retour du matériau à sa forme initiale. Cette propriété exceptionnelle, appelée « effet mémoire », est obtenue par simple activation thermique.

2.2 Création de forces par effet mémoire

Dans la présente étude, la création de forces permanentes à température ambiante ($\approx 20^\circ\text{C}$) a été rendue possible par le choix d'un fil d'AMF en nickel-titane tel que: $Mf < Ms < 20^\circ\text{C} < As < Af$. Un point clé concerne le chargement thermomécanique à appliquer pour créer une force dans un fil. La Figure 2 décrit les sept étapes de la procédure utilisée :

- Etapes (1) à (3) : chauffage ($T > Af$) pour mettre le fil en phase austénite, puis refroidissement ($T < Mf$) pour passer le fil en phase martensite, enfin retour à la température ambiante.
- Etapes (4) et (5) : étirement du fil pour provoquer une déformation par orientation de la martensite. On note ϵ_{mart} la déformation résiduelle après déchargement.
- Etape (6) : chauffage du fil à déformation bloquée ($T \gg Af$). L'effet mémoire qui accompagne le retour à l'état austénitique provoque l'apparition d'une contrainte de traction dans le fil. La contrainte obtenue dépend de la pré-déformation ϵ_{mart} .
- Etape (7) : retour à la température ambiante, toujours à déformation bloquée. La Figure 2-b illustre que deux cas

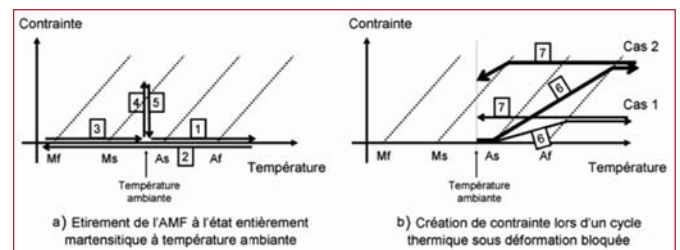


Figure 2. Procédure pour la création d'une force dans un fil par activation thermique de l'effet mémoire.

sont possibles. Dans le cas 2, une production partielle de martensite provoque une chute de la contrainte dans le fil en fin de refroidissement. Le niveau de la force finale peut donc être différent suivant les conditions d'essais.

NB : les étapes (1) à (5) correspondent à la préparation des fils avant leur mise en place sur les poutrelles ; les étapes (6) et (7) simulent la réaction des fils fixés aux poutrelles durant l'activation de l'effet mémoire.

3. CARACTÉRISATION DES FILS D'AMF UTILISÉS

Les fils d'AMF utilisés sont de composition $Ni_{50.8}-Ti_{49.2}$, (% at.) et de diamètre 1 mm. Les températures de transformation sont $A_s = 23^\circ C$, $A_f = 28^\circ C$, $M_s = -10^\circ C$ et $M_f = -25^\circ C$. Les tests de caractérisation sont faits sur des fils de longueur 150 mm à l'aide d'une machine de traction MTS $\pm 15kN$. La température ambiante est de $19^\circ C \pm 1.5^\circ C$. L'objectif est de déterminer la relation entre la pré-déformation ϵ_{mart} obtenue à la fin de l'étape 5 (voir Section 2.2) et la force créée dans le fil. Plus exactement, deux forces sont mesurées durant l'essai :

- la force maximale obtenue à chaud lorsque le fil est totalement revenu à l'état austénitique (fin de l'étape 6). On note cette valeur F_{aust} .
- la force finale obtenue après retour à température ambiante (fin de l'étape 7). On note cette valeur F_{res} .

La Figure 3 présente les valeurs obtenues pour F_{aust} et F_{res} en fonction de ϵ_{mart} . On observe que F_{aust} augmente avec ϵ_{mart} . On observe également une perte de force ($F_{res} < F_{aust}$) après refroidissement (fin de l'étape 7) lorsque ϵ_{mart} dépasse une certaine valeur. Cet effet était attendu compte tenu de la Figure 2-b (cas 2) ; toutefois la constance de F_{res} est un résultat intéressant non évident a priori. Un essai de traction permet d'obtenir le module d'Young du fil à l'état austénitique : $E = 62.9$ GPa.

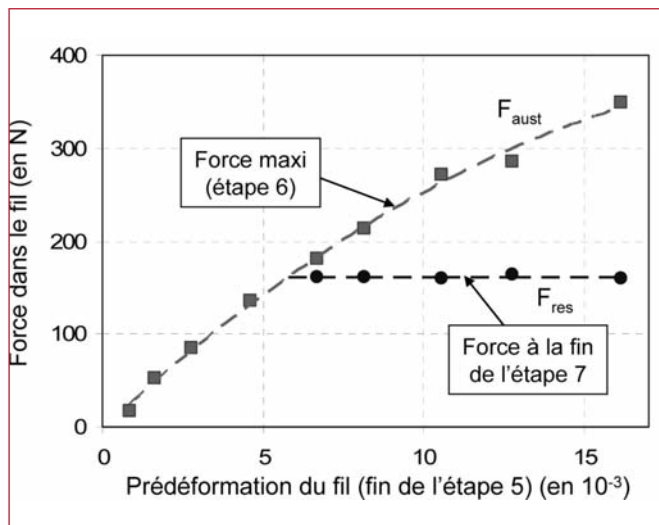


Figure 3. Force maximale F_{aust} et force finale F_{res} en fonction de la prédéformation ϵ_{mart} du fil à l'état martensitique.

4. CRÉATION DE PRÉCONTRAINTES DANS LES POUTRELLES EN BÉTON

4.1 Préparation des poutrelles

Trois poutrelles en béton courant de dimension 48x60x520 mm sont préparées pour les essais. Compte tenu de la dimension des poutrelles, la taille des granulats est limitée à 8 mm. Les poutrelles sont conservées 28 jours dans leur moule sous film plastique, puis dans l'ambiance du laboratoire après décoffrage jusqu'aux essais réalisés entre 6 et 10 semaines après la fabrication des poutrelles. Chaque poutrelle est équipée de deux jauges extensométriques de longueur 30 mm collées à mi-travée selon l'axe longitudinal sur ses faces supérieure et inférieure. Le module d'élasticité du béton est déterminé au moment des essais à partir de mesures de déformation des poutrelles testées en flexion trois points : $E_c = 19,9 \pm 1,7$ GPa.

Un dispositif mécanique constitué d'un double étrier collé au béton et de contreplaques est disposé aux extrémités de chaque poutrelle ; ce dispositif est destiné à fixer fermement les fils AMF sur la poutrelle avant réalisation de l'essai. Chaque poutrelle est destinée à recevoir 4, 8 ou 12 fils AMF (Figure 4). Les fils sont préparés selon la procédure suivante avant d'être fixés aux poutrelles :

- Mise des fils à l'état martensitique auto-accommodé – pour cela, les fils sont chauffés à une température de $+50^\circ C$ (supérieure à A_f), puis refroidis à une température de $-30^\circ C$ (inférieure à M_f) : Figure 2-a, étapes 1 à 3.
- Étirement des fils à température ambiante (inférieure à A_s) pour obtenir après déchargement une prédéformation dans un état martensitique orienté : Figure 2-a, étapes 4 et 5.

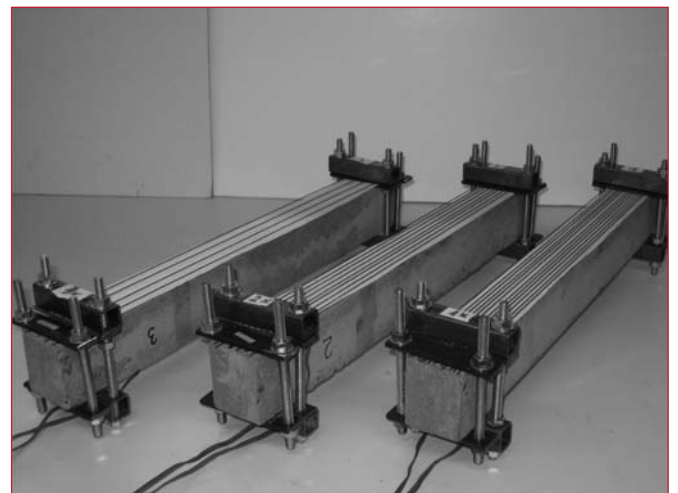


Figure 4. Vue des trois poutrelles en béton équipées de fils en AMF.

Six séries d'essais comprenant chacune les trois poutrelles sont réalisées. Chaque série correspond à une valeur fixée de la prédéformation ϵ_{mart} à l'état martensitique. Les valeurs retenues sont données dans le Tableau 1 pour chacune des six séries.

série :	1	2	3	4	5	6
$\epsilon_{\text{mart}} (10^{-3}) :$	1,6	2,6	4,0	6,0	8,2	10,2

Tableau 1. Prédéformation des fils AMF à l'état martensitique pour les six séries d'essais.

4.2 Réalisation des essais

Chaque série d'essai débute par la préparation des fils AMF selon la procédure indiquée précédemment. Les fils à l'état martensitique pré-déformé sont ensuite fixés sur chacune des trois poutrelles (4, 8 ou 12 fils). Les poutrelles sont placées dans une enceinte thermique régulée. La température est élevée jusqu'à 60°C à raison de +1,6°C/min. puis ramenée à température ambiante à 0,8°C/min. L'élévation de température au-delà de A_f provoque le retour des fils à l'état austénitique. Cette transformation en déformation gênée provoque l'apparition d'une force de traction dans les fils qui agit comme une force de précontrainte et provoque la déformation de la poutrelle.

Les déformations mesurées en cours d'essai sont présentées à la Figure 5 pour les trois poutrelles de la série 4 ($\epsilon_{\text{mart}} = 6.10^{-3}$). Pour chaque poutrelle, la ligne continue représente la déformation longitudinale mesurée à mi-travée sur la face équipée de fils AMF, la ligne pointillée représente la déformation sur la face opposée. Partant d'une déformation initiale nulle, on observe que la déformation augmente en valeur absolue à partir de +27°C environ puis se stabilise au-delà de +58°C environ. Cette déformation résulte de la mise en traction progressive des fils due à l'activation thermique de l'effet mémoire (retour progressif de l'état martensitique orienté à l'état austénitique). La pente observée au refroidissement résulte de la contraction thermique du fil à l'état austénitique.

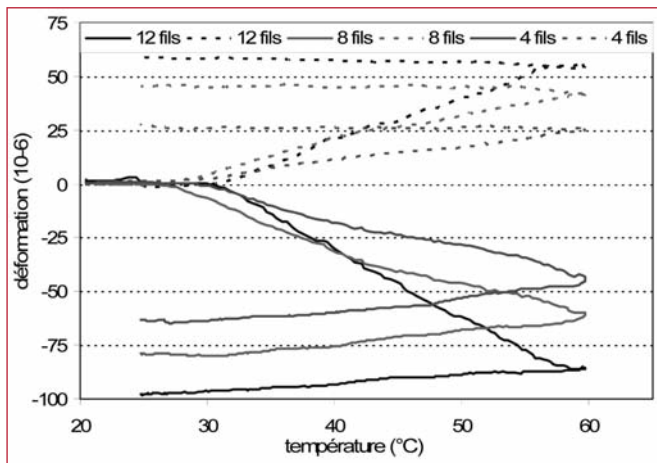


Figure 5. Evolution des déformations en fonction de la température pour les trois poutrelles de la série 4.

4.3 Interprétation des résultats

En s'aidant des équations classiques de la théorie des poutres, il est facile de déduire l'évolution des forces de traction dans les fils AMF à partir des déformations mesurées au cours des essais. Les valeurs obtenues en fonction du temps sont tracées à titre d'exemple sur la Figure 6 pour les trois poutrelles de la série 4. Chacune des courbes présentées peut être analysée

selon trois phases. La phase initiale à force nulle correspond au temps nécessaire pour atteindre la température A_s de début de transformation de la martensite en austénite. La phase ascendante qui lui fait suite (jusqu'à 1800 s) correspond à l'activation thermique de l'effet mémoire. Durant cette phase, le retour progressif à l'état austénitique s'accompagne d'une annulation de la prédéformation donnée aux fils AMF dans l'état martensitique. Cette transformation s'effectuant en déformation bloquée, il en résulte une mise en traction progressive des fils. Enfin, la troisième phase (au-delà de 1800 s) correspond à la durée de la phase de refroidissement des fils revenus à l'état austénitique. Le plateau légèrement ascendant observé durant cette phase correspond au gain complémentaire de force qui résulte de la contraction thermique des fils austénitiques durant cette phase de refroidissement. La valeur finale de la force correspond à la force totale de précontrainte exercée sur chaque poutrelle par les fils AMF après retour à la température ambiante.

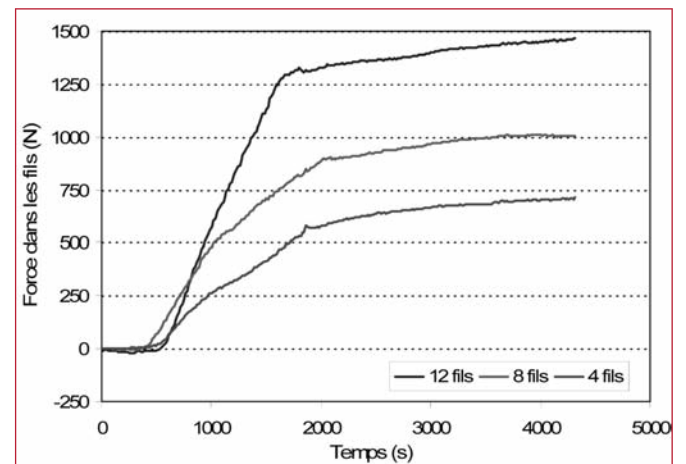


Figure 6. Evolution de la force totale de traction dans les fils pour les trois poutrelles de la série 4.

La Figure 7 compare l'évolution des forces totales de traction pour les six poutrelles à 12 fils des séries 1 à 6. On observe que pour les poutrelles des séries 1 à 4, qui correspondent à des prédéformations ϵ_{mart} croissantes comprises entre $1,6.10^{-3}$ et 6.10^{-3} , la force finale de traction croît avec la valeur de la prédéformation donnée aux fils à l'état martensitique. Pour les poutrelles des séries 5 et 6, correspondant à des prédéformations ϵ_{mart} égales à $8,2.10^{-3}$ et $10,2.10^{-3}$, l'effort de traction diminue durant la phase de refroidissement pour tendre vers une valeur finale de 1400 N environ proche de celle atteinte pour la poutrelle de la série 4. Ce résultat peut être rapproché de la relation de comportement des fils présentée à la Figure 3. On observe sur cette figure, qu'au-delà d'une prédéformation égale à 6.10^{-3} environ, la force F_{aust} induite dans le fil par activation thermique de l'effet mémoire décroît pour atteindre la valeur de palier F_{res} lorsque le fil revient à température ambiante. Comme le montre le cas 2 sur la Figure 2-b, ce phé-

nomène résulte d'une production de martensite sous contrainte lorsque la température de transformation est atteinte au refroidissement. Cette température augmentant avec la contrainte dans l'AMF, ce phénomène se produit dès que la force dans le fil dépasse la valeur de palier à température ambiante.

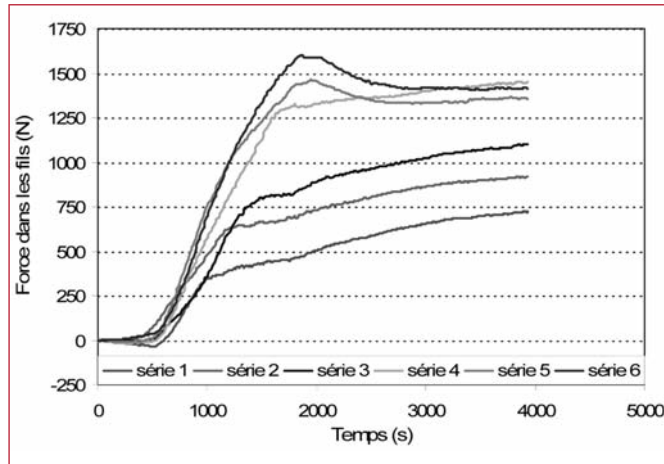


Figure 7. Evolution de la force totale de traction pour les poutrelles à 12 fils.

L'effet de précontrainte créé à l'aide des fils AMF peut être mis en évidence par la courbure des poutrelles déduites des déformations longitudinales mesurées sur les faces supérieure et inférieure de chaque poutrelle testée. Les valeurs finales obtenues après retour à la température ambiante sont présentées sur la Figure 8 pour les trois types de poutrelles. On observe que l'effet de précontrainte augmente de manière quasi-linéaire avec la prédéformation ϵ_{mart} des fils tant que celle-ci ne dépasse pas 6.10^{-3} . Au-delà de cette valeur, l'augmentation de la prédéformation n'a plus d'influence sur la courbure obtenue qui se trouve plafonnée pour chacune des poutrelles du fait de la production partielle de martensite qui limite la force de précontrainte dans les fils au refroidissement.

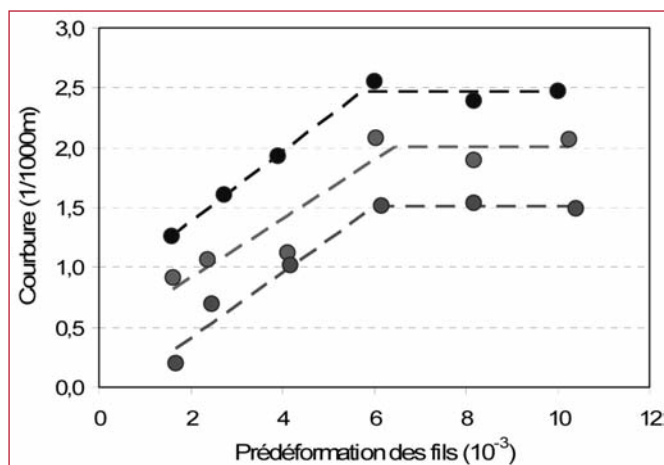


Figure 8. Courbure induite dans les poutrelles par l'effet de précontrainte.

Ce résultat souligne l'influence des températures de transformation sur la force effective de précontrainte. Un choix inapproprié peut entraîner une perte instantanée par production partielle de martensite au refroidissement. Des pertes diffé-

rées de même nature peuvent également survenir si le composant se trouve exposé à une baisse excessive de température au cours de son existence (cas des ouvrages extérieurs notamment). On voit ainsi que le choix des températures de transformation est déterminant pour limiter les pertes et assurer la permanence de la précontrainte créée par effet mémoire.

5. CONCLUSION

La présente étude a montré la possibilité d'induire des états de précontrainte dans des poutrelles en béton à l'aide de fils d'AMF en nickel-titane. La procédure consiste à étirer les fils à l'état martensitique avant de les fixer solidement sur les poutrelles. L'effet mémoire est activé par élévation de la température au-delà de la température de transformation A_f de manière à provoquer le retour des fils à l'état austénitique. Cette transformation en déformation gênée provoque l'apparition d'une force de traction dans les fils qui agit comme une force de précontrainte. Cette force a pu être évaluée à partir des déformations induites dans chaque poutrelle testée. Les essais réalisés ont permis de décrire le processus de développement de cette force de précontrainte durant la phase d'activation de l'effet mémoire. L'intensité de la force obtenue dépend du nombre de fils et de la prédéformation donnée aux fils à l'état martensitique. Il a été mis en évidence que la force finale de précontrainte après retour à température ambiante est bornée par la valeur obtenue pour une prédéformation égale à 6.10^{-3} . Cet effet résulte d'une production partielle de martensite qui limite la force de précontrainte dans les fils lors du refroidissement. L'examen de la relation entre la prédéformation et la courbure induite à température ambiante par l'effet de précontrainte indique que cet effet résulte des propriétés thermomécaniques de l'alliage constituant les fils, mais qu'il n'est pas affecté par le nombre des fils fixés à la poutrelle. Ces résultats montrent que le choix des températures de transformation est un point clé pour assurer la permanence de la précontrainte et éviter les pertes en cas de baisse de température. Si le coût élevé des alliages Nickel-Titane peut sembler a priori un obstacle à leur utilisation pour la création de précontraintes dans des composants en béton, l'activation de l'effet mémoire par simple élévation de température constitue un avantage par rapport aux procédés classiques de précontrainte. Il existe par ailleurs des AMF à base fer avec des performances moindres que celles des Nickel-Titane, mais de coût plus adapté à des applications industrielles. Un champ possible d'application pourrait être l'utilisation d'AMF comme méthode alternative de précontrainte pour l'amélioration du comportement ou le renforcement de structures existantes.

REMERCIEMENTS : Mathilde Diez et Eva Grégorin, élèves-ingénieurs à l'IFMA.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] OTSUKA K., WAYMAN C.M., *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, 2002.
- [2] GUENIN G., *Alliages à mémoire de forme*, Techniques de l'Ingénieur, Matériaux métalliques, 1996, Doc. M530, 1-15.

- [3] CZADERSKI C., HAHNEBACH B., MOTAVALLI M., *RC beam with variable stiffness and strength*, Constr. Build. Mat. 2006, 20(9), 824-833.
- [4] BARTERA F., GIACCHETTI R., *Steel dissipating braces for upgrading existing building frames*, J. Constr. Steel Res. 2004, 60(3-5), 751-769.
- [5] LIU H., LI H., SONG G., OU J., *Investigation of vibration mitigation of stay cables incorporated with superelastic shape memory alloy dampers*, Smart Mat. Struct. 2007, 16(6), 2202-2313.
- [6] DESROCHES R., DELEMONT M., *Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys*, Engng. Struct. 2002, 24(3), 325-332.
- [7] SHARABASH A.M., ANDRAWES B.O., *Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges*, Engng. Struct. 2009, 31(2), 607-616.
- [8] MAZZOLANI F.M., MANDARA A., *Modern trends in the use of special metals for the improvement of historical and monumental structures*, Engng. Struct. 2002, 24(7), 843-856.
- [9] PARET T.F., FREEMAN S.A., SEARER G.R., HACHEM M., GILMARTIN U.M., *Using traditional and innovative approaches in the seismic evaluation and strengthening of a historic unreinforced masonry synagogue*, Engng. Struct. 2008, 30(8), 2114-2126.
- [10] MOTAVALLI M., CZADERSKI C., BERGAMINI A., JANKE L., *Shape memory alloys for civil engineering structures – on the way from vision to reality*, AMCM'2008, Lodz, Poland, 2008, June 9-11, 91-108.
- [11] JANKE J., CZADERSKI C., MOTAVALLI M., RUTH J., *Applications of shape memory alloys in civil engineering structures: overviews, limits and new ideas*, Mater. Struct. 2005, 38(5), 578-592.
- [12] DENG Z, LI Q, SUN H., *Behavior of concrete beam with embedded shape memory alloy wires*, Eng. Struct. 2006, 28(12), 1691-1697.
- [13] LI H, LIU Z, OU J. *Behavior of a simple concrete beam driven by shape memory alloy wires*, Smart Mater. Struct. 2006, 15(4), 1039-1046.
- [14] CHOI E., CHUNG Y.S., CHO B.S., NAM T.H., *Confining concrete cylinders using shape memory alloy wires*, Eur. Phys. Journal, 2008, 158(1), 255-259.
- [15] DESTREBECQ J.F., BALANDRAUD X., *Interaction between concrete cylinders and shape-memory wires in the achievement of active confinement*, in Materials with Complex Behaviour, Advanced Structured Materials, Springer 2010, 19-34.
- [16] BHATTACHARYA K., *Microstructure of martensite: why it forms and how it gives rise to the shape-memory effect*. Oxford University Press, 2003.