



Les alliages à mémoire de forme gardent la mémoire de notre passé...

Danièle Wagner

► To cite this version:

Danièle Wagner. Les alliages à mémoire de forme gardent la mémoire de notre passé.... Matériaux & Techniques, EDP Sciences, 2004, pp.13-19. hal-01863984

HAL Id: hal-01863984

<https://hal-univ-paris10.archives-ouvertes.fr/hal-01863984>

Submitted on 29 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES ALLIAGES A MÉMOIRE DE FORME GARDENT LA MÉMOIRE DE NOTRE PASSÉ...

D. Wagner

Ecole Centrale de Paris, laboratoire mss/mat, Chatenay Malabry

RÉSUMÉ : Au cours des tremblements de terre de septembre 1997, la basilique Saint François à Assise a été gravement endommagée. Après la restauration classique de la basilique, le ministère italien de la culture a souhaité circonscrire les dégâts lors de tremblements de terre futurs en soutenant un projet original qui a repensé l'accrochage du toit de la basilique au tympan en y incorporant des connexions en alliage à mémoire de forme. Parmi les propriétés thermomécaniques des alliages à mémoire de forme, c'est l'effet superélastique qui est utilisé. En effet, cette propriété permet pour ces connexions d'accepter une déformation temporaire et de retrouver leur longueur initiale même après des déformations de quelques pour-cents. Les analyses numériques et les essais réalisés sur des murs en maçonnerie montés sur table vibrante et reliés à un cadre en acier rigide par des connexions en acier classique ou des connexions en alliage à mémoire de forme ont montré l'amélioration apportée par l'utilisation des alliages à mémoire de forme. Ces analyses et ces essais ont permis de valider ces connexions originales et de les mettre en œuvre pour l'accrochage du tympan au toit de la basilique.

Les 26 et 27 septembre 1997, une série de tremblements de terre ont provoqué de sérieux dégâts dans les régions d'Umbrie et de Marche en Italie du centre. A 20 km de l'épicentre, la basilique Saint François à Assise, près de Pérouse, a été particulièrement touchée. Au cours des tremblements de terre, une partie du tympan et plusieurs voûtes de la basilique se sont effondrées, causant la mort de deux personnes et réduisant à néant les fresques de Giotto et de Cimabue. Ce n'était pas la première fois que la basilique était touchée par l'activité sismique et ce ne sera certainement pas la dernière. Après la restauration classique de l'édifice, le ministère italien de la culture a souhaité circonscrire les dégâts lors de tremblement de terre futurs. Parmi les projets proposés, celui de l'équipe d'Istech⁽¹⁾ a retenu l'attention par l'originalité de sa technique innovante à base de dispositifs en alliage à mémoire de forme utilisés pour relier le mur du tympan au toit.

(1) ISTECH – Groupement de six partenaires : FIP Industriale (Italie) - ENEA Ente per le Nuove Technologie, l'Energia e l'Ambiente (Italie) – Università degli Studi di Roma “La Sapienza” (Italie) – Aristotle University, Thessaloniki (Grèce) – Instituto Superior Técnico, Lisbon (Portugal), ELSA, European Laboratory for Structural Assessment, JRC (Italie).

Les principaux produits en alliage à mémoire de forme sont des fils pour applications médicales (fils à usage orthodontique, orthopédique, ...), des connecteurs électriques, des raccords pour tuyauteries (la plus ancienne des applications), des ressorts pour ouverture de fenêtres, des antennes pour téléphone cellulaire, ..., mais ils n'avaient jamais été utilisés pour la restauration de bâtiments anciens. L'originalité du projet

Istech a été de remplacer les traditionnelles jonctions en acier utilisées jusqu'à maintenant pour consolider les bâtiments par des jonctions en alliage à mémoire de forme. Parmi les propriétés thermomécaniques inhabituelles des alliages à mémoire de forme, c'est en premier lieu l'effet superélastique qui est utilisé dans la consolidation de ces bâtiments anciens, c'est à dire la propriété pour ces jonctions en alliage à mémoire de forme d'accepter une déformation temporaire et de retrouver leur longueur même après des déformations de quelques pour-cents.

Ce projet Istech a été financé par l'activité de recherche "Patrimoine Culturel" de l'Union Européenne (relevant du programme Environnement et Climat du 4^{ème} programme cadre). Il a été coordonné par Julia Acevedo ⁽²⁾. L'Union Européenne a contribué au projet en le soutenant financièrement. Des tests à grande échelle sur des murs en maçonnerie protégés contre les secousses telluriques au moyen de dispositifs avec des alliages à mémoire de forme ont prouvé l'efficacité du système [1, 2]. Le développement et la pose des dispositifs en alliages à mémoire de forme a été réalisé par la société FIP Industriale sous la direction de Gabriella Castellano [2].

L'objectif de cet article est de présenter cette application origi-

(2) Acevedo Julia, Responsable scientifique du projet, DG XII D 14, e-mail : julia.acevedo-bueno@cec.eu.in

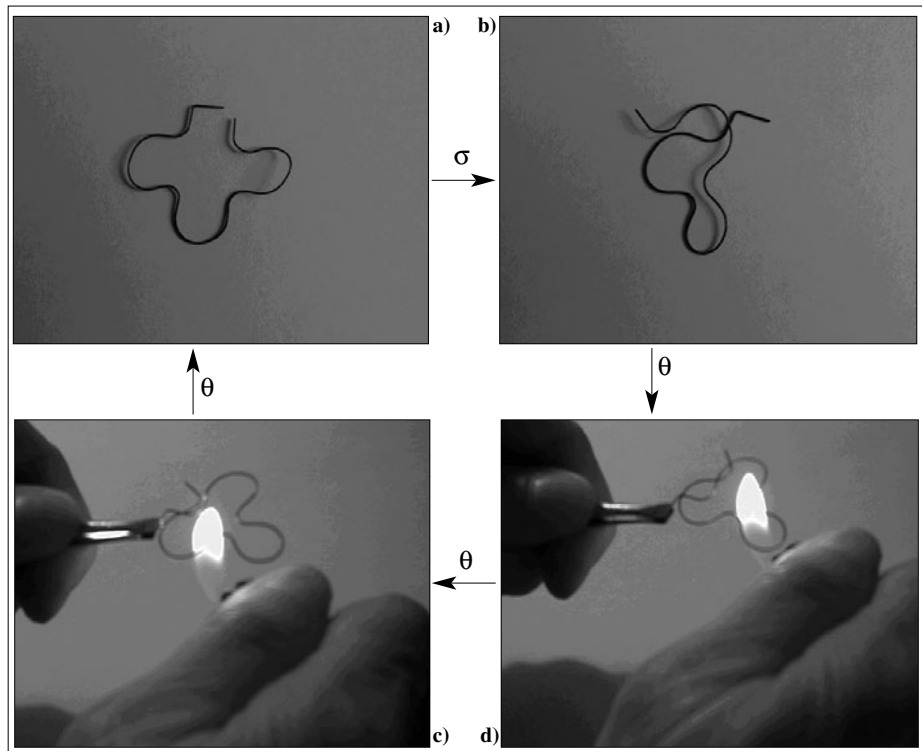


Fig. 1 - Effet mémoire de forme.

Fig. 1 - Shape memory effect.



Fig. 2 : Effet superélastique.

Fig. 2 - Superelastic effect.

nale des alliages à mémoire de forme. Cependant, avant de décrire le projet, il a semblé utile de préciser certains points de la métallurgie des alliages à mémoire de forme.

Alliages à mémoire de forme

Métallurgie

Généralités

Quand un métal ou un alliage ordinaire est soumis à une contrainte qui le déforme au-delà de sa limite d'élasticité vraie, il subit une déformation plastique ϵ_p qui subsiste après relâchement de la contrainte, même si l'on chauffe l'alliage.

Par contre, certains alliages, appelés alliages à mémoire de forme [3–5] peuvent subir une déformation apparemment plastique de quelques pour-cents (jusqu'à 8 % en traction dans certains cas) et retrouver leur forme initiale par simple chauffage (fig. 1) ou déchargement (fig. 2). Ce phénomène appelé "effet mémoire de forme" (restitution de la forme initiale par chauffage) ou "effet pseudo-élastique" (ou superélastique) (restitution de la forme initiale par annulation de la contrainte) est dû à une transformation structurale à l'état solide réversible (mécaniquement) de type martensitique. Suivant la température à laquelle on déforme l'alliage à mémoire de forme, et les points de transformations associés au changement de phases, on aura uniquement l'effet mémoire de forme ou uniquement l'effet pseudo-élastique ou en général une combinaison des deux effets.

La transformation martensitique est une transformation de phase à l'état solide entre deux états cristallographiques différents : l'austénite ou phase mère et la martensite. Cette transformation peut se produire dans de nombreux alliages, qu'ils soient classiques ou à mémoire de forme. Cette transformation est provoquée soit par :

- un changement de température régi par un cycle d'hystérésis (fig. 3) : au refroidissement, la transformation martensitique débute à une température déterminée M_s (Martensite Start) et devient complète à la température M_f (Martensite finish). Au chauffage, la transformation inverse se déroule dans l'intervalle de température A_s - A_f . A température constante entre M_s et M_f (ou entre A_s et A_f), il y a coexistence entre la phase mère (austénite) et la martensite.

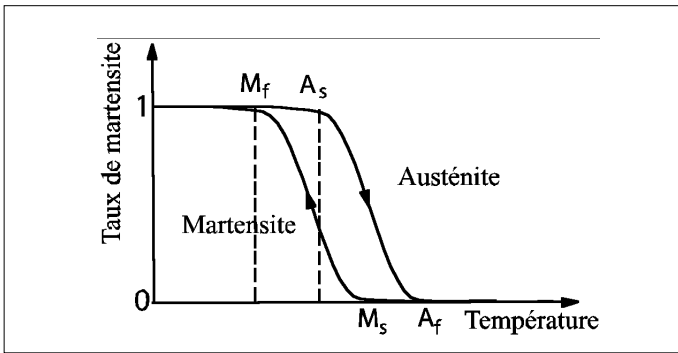


Fig. 3 - Effet de la température sur le taux de martensite formée.

Fig. 3 - Temperature effect on martensite content.

Fig. 4 - Effet d'une contrainte sur les points de transformation (alliage NiTi, résultats internes Framatome).

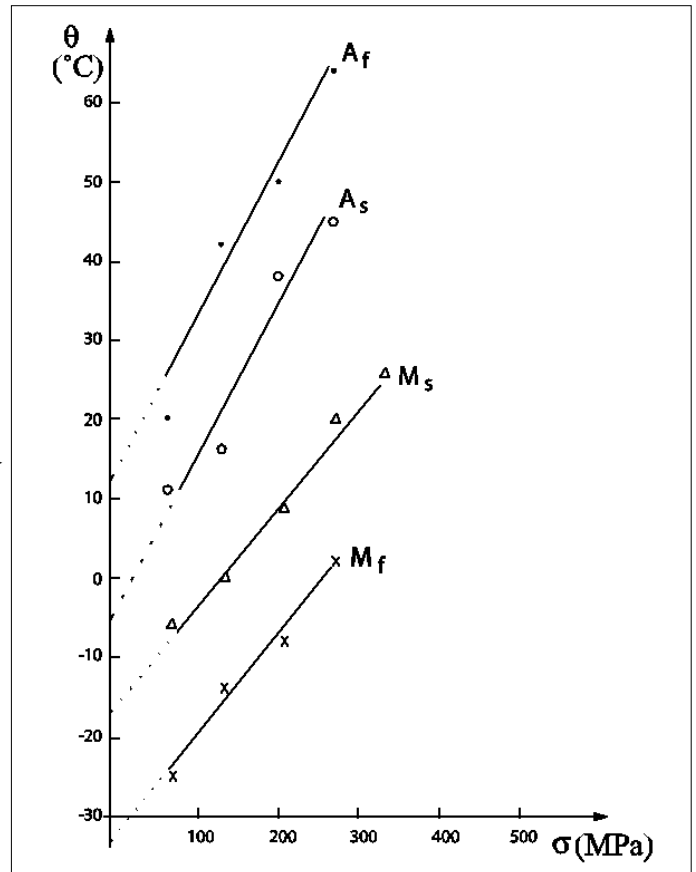
Fig. 4 - Stress effect on phase transformation points (NiTi alloy, Framatome internal results).

- l'action d'une contrainte (fig. 4) : en effet, lorsque l'on applique une contrainte, au refroidissement, la transformation martensitique débute à une température $M_{s\sigma}$ supérieure à M_s , on parle alors de martensite induite par contrainte ou déformation. Lorsque la température de fonctionnement de l'alliage est égale à $M_{s\sigma}$, la transformation martensitique débutera sous la seule action de la contrainte lorsque cette dernière sera égale à la contrainte correspondant à $M_{s\sigma}$. Cette température de début de transformation martensitique sous contrainte est une fonction linéaire de la contrainte appliquée. Il en est de même pour les autres températures M_f , A_s et A_f .

On distingue deux catégories de transformations martensitiques suivant les positions relatives de M_s , M_f , A_s , A_f et les caractéristiques associées : les transformations "non-thermoélastiques" et les transformations "thermoélastiques". Dans les alliages à mémoire de forme, la transformation est du type thermoélastique, alors que dans les alliages classiques, elle est du type non-thermoélastique. Le tableau I compare ces deux types de transformation.

Tableau I - Comparaison alliage à mémoire de forme/alliage classique.

Table I - Shape memory alloy/classical alloy comparison.



	Alliage classique	Alliage à mémoire de forme
Transformation martensitique	Transformation non thermoélastique irréversible	Transformation thermoélastique réversible
Hystérésis	<p>% de martensite</p> <p>Température</p>	<p>% de martensite</p> <p>Température</p>
Déplacement des atomes	<p>Important</p> <ul style="list-style-type: none"> - déformation permanente au niveau micro et macroscopique - interface bloquée → transformation irréversible → conservation de la déformation <p>Nouvelle germination nécessaire (si θ, ou σ)</p> <p>Interface bloquée</p>	<p>Faible</p> <ul style="list-style-type: none"> - pas de déformation au niveau micro et macroscopique - interface mobile dans les 2 sens → transformation réversible → pas de déformation <p>Interface mobile</p> <p>Croissance continue de la plaquette (si θ, ou σ)</p>

La transformation *thermoélastique* est caractérisée par un faible hystérésis entre les points de transformation. Une autre différence essentielle entre les deux types de transformation est la réversibilité de la transformation thermoélastique. Dans ce type de transformation, lors du refroidissement ou de l'application d'une contrainte on assiste à une croissance continue des plaquettes de martensite et à la germination de nouvelles plaquettes. Dans cette transformation, si la température ou la contrainte n'évolue plus, la croissance des plaquettes cesse, les interfaces martensite/phase mère sont immobiles et une modification de la température ou de la contrainte dans un sens ou dans l'autre, fait déplacer les interfaces dans un sens ou dans l'autre de façon réversible. Une des raisons essentielles de cette réversibilité est que les déformations à l'échelle du grain sont des déformations élastiques faibles, de sorte que la limite d'élasticité de la phase mère austénitique n'est pas atteinte. D'ailleurs dans la plupart des transformations thermoélastiques, la phase mère est ordonnée et possède donc une limite d'élasticité élevée.

Par contre, dans la transformation martensitique *non-thermoélastique*, lorsque la plaquette de martensite atteint une certaine dimension, l'interface phase mère/martensite se bloque en raison de la déformation plastique locale de la phase mère. En conséquence, au chauffage, la transformation inverse ne peut se faire que par germination de la phase mère dans les plaquettes de martensite. Dans ce type de transformation, les déformations engendrées par la transformation sont des déformations plastiques, ce qui limite voire supprime la réversibilité.

Lors de la transformation martensitique, dans la zone de coexistence, l'interface entre phase mère et martensite est un plan, invariant en dimension et en orientation, encore appelé plan d'habitat. A l'échelle du microscope optique, la transformation peut se décrire par un cisaillement homogène parallèle au plan

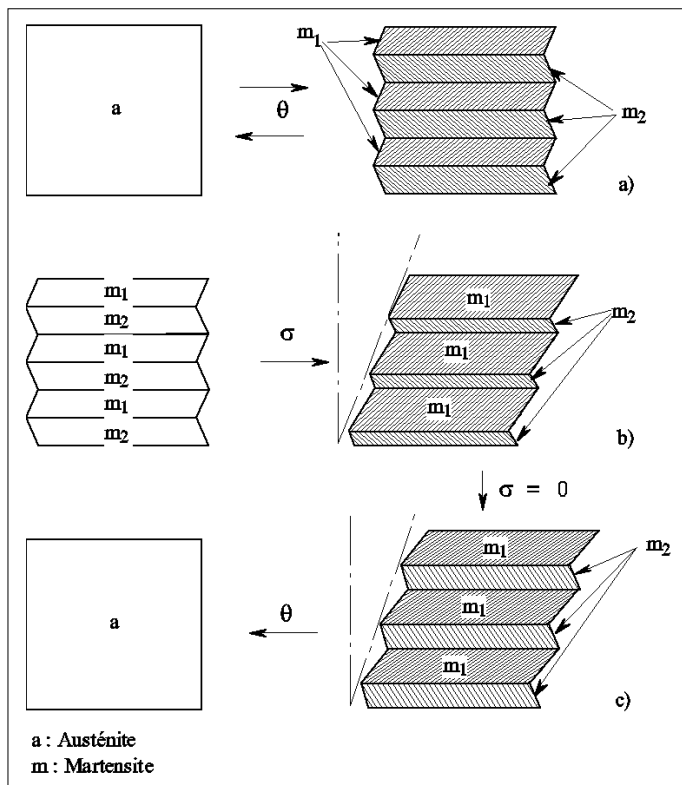


Fig. 5 - Relation entre l'effet mémoire de forme et la microstructure.

Fig. 5 - Relationship between the shape memory effect and the microstructure.

d'habitat. Pour un monocristal de phase mère, il existe plusieurs possibilités d'orientation de la martensite appelée variantes correspondant à des plans d'habitat et des cisaillements équivalents du point de vue cristallographique. Pour une phase mère de structure cubique, il existe en général 24 variantes différentes. En l'absence de contrainte, ces variantes sont équiprobables et les déformations associées à chaque variante se compensent mutuellement, ce qui fait que le matériau garde sa forme initiale après transformation.

Effet mémoire de forme

Comme il a été exposé précédemment, un monocristal de phase mère que l'on refroidit sans contrainte au dessous de M_f se transforme en toutes les variantes de martensite possibles. Ces variantes sont équiprobables et les déformations de cisaillement associées se compensent, de telle sorte que la forme macroscopique n'est pas modifiée. Sur le schéma a) de la figure 5 où la martensite a été obtenue par refroidissement de la phase mère, seules deux variantes (sur 24 possibles pour la structure cubique) sont représentées. Si, on applique alors une contrainte, on assiste à un mouvement des interfaces entre certaines variantes, ce qui conduit à la croissance de variantes favorisées, et donne une déformation du matériau dans le sens de la contrainte (fig. 5b). Lorsque l'on décharge l'échantillon, on assiste alors à un retour en arrière partiel des interfaces entre variantes, mais une grande partie de la déformation subsiste après annulation de la contrainte (fig. 5c). Si l'échantillon est alors réchauffé au dessus de A_f , il y a transformation inverse par retour des interfaces de la martensite vers la phase mère initiale, c'est l'effet mémoire de forme. Sur un digramme σ - ϵ , ce comportement est schématisé sur la figure 6a, et correspond à la région 6 ($T < M_f$).

Pour un polycristal, le phénomène est identique pour chacun des monocristaux constituant l'échantillon; c'est le problème de compatibilité entre les déformations des différents grains qui va limiter l'amplitude de la déformation pseudo-plastique.

Effet pseudo-élastique (ou superélastique)

Pour un échantillon soumis à une contrainte à une température T comprise entre A_f et $M_{s\sigma}$, variable en fonction de la contrain-

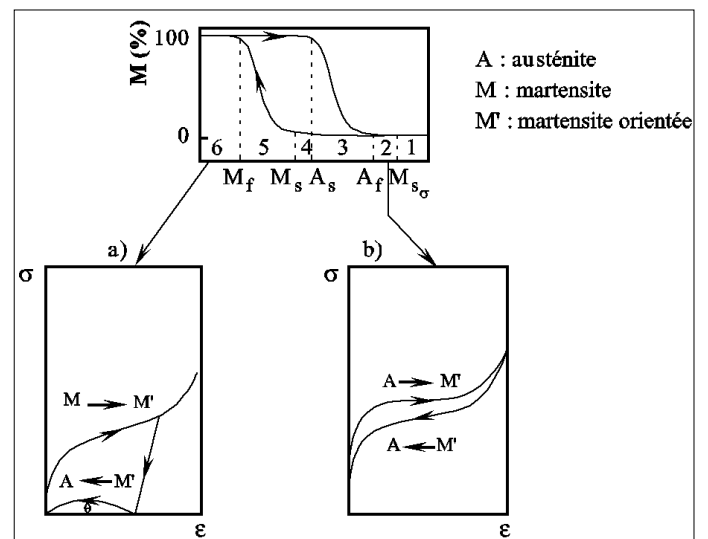


Fig. 6 - Courbes contrainte-déformation pour l'effet mémoire de forme (a) et l'effet superélastique (b).

Fig. 6 - Stress-strain curves for shape memory alloy effect (a) and superelastic effect (b).

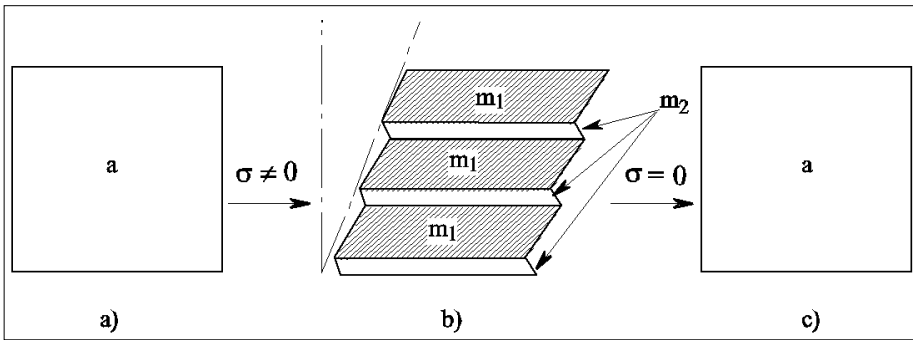


Fig. 7 - Relation entre l'effet superélastique et la microstructure.

Fig. 7 - Relationship between the superelastic effect and the microstructure.

te (région 2 de la fig. 6), la transformation martensitique va débuter lorsque la contrainte appliquée est égale à celle pour laquelle on a égalité entre $M_{s\sigma}$ et T la température de l'essai. Comme il est représenté schématiquement à la figure 7, l'application d'une contrainte entraîne la transformation martensitique et la réorganisation des variantes de martensite formées (fig. 7b). Si l'effort est relâché, comme la température est supérieure à A_f , il y a réversion totale de la martensite (fig. 6b) et donc de la déformation (fig. 7c). Ce phénomène est appelé *effet pseudo-élastique* ou *superélastique* [6].

Lorsque la température à laquelle est soumis l'échantillon est située dans les régions 3, 4 ou 5 de la figure 6 (c'est à dire comprise entre M_f et A_f), on aura un comportement faisant intervenir les deux phénomènes effet mémoire et pseudo-élastique. Lorsque l'effort est relâché, la réversion de la martensite n'est pas totale, il faudra chauffer pour revenir à l'état initial.

Propriétés

Comme il a déjà été montré dans le paragraphe "généralités" (fig. 6), la forme des courbes de traction évolue fortement avec la température, selon que l'on déforme une martensite, une martensite induite ou une austénite. Les différents mécanismes de déformation peuvent être schématisés de la façon suivante (fig. 8) :

- à basse température lorsque l'état initial est la phase martensitique, l'application d'une contrainte va d'abord entraîner une

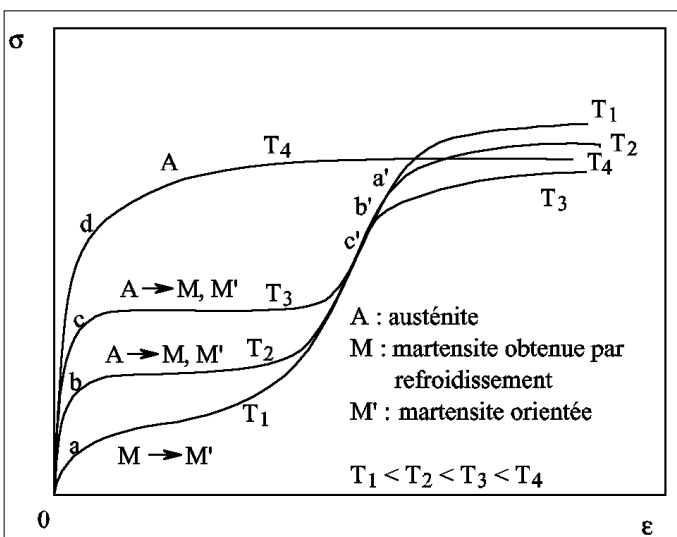


Fig. 8 - Représentation schématique des courbes contrainte-déformation pour différentes températures d'essais.

Fig. 8 - Schematic representation of stress-strain curves for different temperature of tests.

réorganisation des 24 variantes de martensite (courbe T1). Le point *a* est une pseudo limite d'élasticité et ne correspond aucunement à un début de déformation plastique, qui se produit par contre à partir du point *a'* par glissement des dislocations.

- aux températures intermédiaires, lorsque l'état initial est la phase austénitique et que la température est telle que l'on forme de la martensite induite lors de l'application de la contrainte, la courbe de traction a l'allure des courbes T2 et T3. De l'origine jusqu'au point *b* ou *c*, la

montée correspond à la déformation élastique de l'austénite. A partir du point *b* ou *c* la contrainte atteinte est suffisante pour qu'à la température de l'essai, se produise la transformation. Là aussi, les points *b* ou *c* correspondent à des pseudo limites d'élasticité à partir desquelles se produit la formation de martensite dans une ou plusieurs variantes privilégiées, celles pour lesquelles la déformation associée à la transformation austénite → martensite va dans le sens de la contrainte appliquée. A partir des points *b'* et *c'* se produit la déformation plastique de la martensite.

- aux hautes températures, lorsque l'état initial est austénitique, la courbe de traction a l'allure de la courbe T4 et correspond à une courbe classique de déformation de l'austénite. A partir du point *d* se produit la déformation plastique de l'austénite par glissement des dislocations.

Mise en œuvre des alliages à mémoire de forme pour la restauration de la basilique

Dégâts causés par le tremblement de terre et restauration classique

La basilique construite au XIII^{ème} siècle avait déjà subi maint tremblements de terre (1279, 1328, ...) mais aucun n'avait produit autant de dégâts que celui de la nuit du 26 septembre 1999 et celui qui suivit, le 27 septembre vers midi.

Plusieurs voûtes se sont effondrées et plusieurs fissures et déformations sont apparues sur les autres voûtes. L'effondrement des voûtes a été provoqué par l'accumulation de matériaux sans cohésion laissés au cours des siècles (tuiles cassées, matériaux de réparation laissés sur place, ...) qui avait occasionné une déformation permanente des voûtes.

Au tympan, sur le mur de façade de la basilique, est apparu un trou. Ce mur de façade a été construit selon la technique employée au XIII^{ème} siècle. Il est fait d'un noyau en "blocage" (éléments bruts jetés dans un bain de mortier) et entouré de deux faces : les parements, en "appareil" (fait d'éléments posés, assemblés). Les dégâts ont été occasionnés d'une part par le vieillissement du mortier qui reliait le parement extérieur au blocage intérieur, et d'autre part par l'interaction avec le toit de la basilique.

La restauration de la basilique a été réalisée en plusieurs phases :

- une restauration classique par le comblement du trou dans le tympan,
- une modification de l'accrochage du toit au tympan,
- la consolidation de cet accrochage par l'utilisation de barres

de connexion en acier classique et en alliage à mémoire de forme.

Avantages des connexions en alliage à mémoire de forme

La propriété des alliages à mémoire de forme utilisée dans le cas de la restauration de bâtiments anciens sujets à des tremblements de terre est la propriété de superélasticité (courbes T2 ou T3 de la figure 8). Les avantages attendus de connexions en alliage à mémoire de forme sont les suivants :

- dans le cas de faibles actions horizontales (vent, tremblement de terre de faible intensité), la connexion reste rigide (comme dans un acier classique) ne permettant que de petits allongements.
- dans le cas d'actions horizontales de forte intensité (forts tremblements de terre), la rigidité de la connexion diminue permettant des déplacements importants sous une force pratiquement constante, mais surtout après la fin de la sollicitation, la connexion retrouve sa longueur initiale alors que dans un alliage classique il peut subsister une déformation plastique de la connexion. De plus, cet effet superélastique dissipe plus d'énergie qu'un alliage classique par la transformation de phases qui en est à l'origine. Et enfin, lors d'un rechargement, l'on retrouve la même courbe contrainte-déformation, alors que dans les alliages classiques, la consolidation entraîne une augmentation de la limite d'élasticité.
- dans le cas d'actions horizontales de très forte intensité, la rigidité augmente ce qui évite des déplacements importants et prévient l'instabilité.

Des analyses numériques ont été effectuées sur diverses architectures (arche, mur, tour) sans éléments de consolidation ou avec éléments en acier classique ou en alliage à mémoire de forme. Toutes ces analyses ont montré que l'effondrement de la structure se produit pour des accélérations horizontales (et des déplacements horizontaux) plus importants dans le cas de structures renforcées par des alliages à mémoire de forme. A partir de ces analyses numériques, un prédimensionnement de

fil en alliage à mémoire de forme a été possible. La difficulté dans le dimensionnement des connexions vient de la méconnaissance des caractéristiques mécaniques des murs en maçonnerie à relier. Pour pallier cette difficulté, des connexions en alliage à mémoire de forme avec différentes longueurs initiales de fil ont été mises au point. Cette configuration permet également d'avoir des connexions actives sur une plus large gamme de séismes (en intensité).

Puis, des tests en vraie grandeur sur des murs en maçonnerie montés sur table vibrante et reliés à un cadre en acier rigide ont été réalisés (fig. 9). Les murs en maçonnerie simulaient la façade d'un monument historique tandis que le cadre rigide en acier représentait le reste du bâtiment. Un des murs était relié au cadre par deux connexions en acier classique, alors que le second était relié par deux connexions en alliage à mémoire de forme. Chaque connexion en alliage à mémoire possédait des fils de longueurs initiales différentes de façon à avoir un multi-plateau superélastique. Les tests étaient instrumentés par des accéléromètres, des capteurs de déplacement verticaux et horizontaux et des capteurs de force aux endroits les plus critiques déterminés par les analyses numériques précédentes.

Huit essais représentant huit séismes d'intensité croissante (accélération de la table variant de 0,05 g à 0,939 g) ont été réalisés. Ces essais ont confirmé l'amélioration apportée par des connexions en alliage à mémoire par rapport à des connexions en acier classique. Pour le mur relié au cadre par des connexions en acier classique, un endommagement a été visible à partir d'une accélération de la table de 0,6535 g, alors que pour le mur relié au cadre par des connexions en alliage à mémoire, aucun dommage n'était visible dans l'essai correspondant à une accélération de la table de 0,939 g. La différence de comportement entre les deux murs a été interprétée par la différence d'accélération maximale mesurée en différents points du mur. Pour l'essai correspondant à une accélération de la table de 0,6535 g, la baisse de l'accélération dans le mur relié avec une connexion en alliage à mémoire est de 50% en

haut du mur et de 60% au niveau de la connexion. Cette réduction de l'accélération est due à la rigidité moindre, la limitation de la force et la dissipation d'énergie provenant du phénomène de superélasticité des alliages à mémoire. Pour les essais à plus forte accélération de la table, les deux connexions avec des fils de longueurs différentes ont été actives.

Consolidation de la basilique par des connexions en alliage à mémoire de forme

Après la restauration classique, des connexions en alliage à mémoire ont été utilisés pour relier le tympan au toit de la basilique. Des faisceaux de fils de 1 mm de diamètre en alliage nickel-titane ont été protégés par des fourreaux en acier inoxydable. Trois groupes de connexions avec trois longueurs de fils différentes ont été installés (fig. 10) au cours de l'automne 1999. Il faut également évoquer que des alliages à mémoire de forme ont été utilisés dans la restauration de la tour de

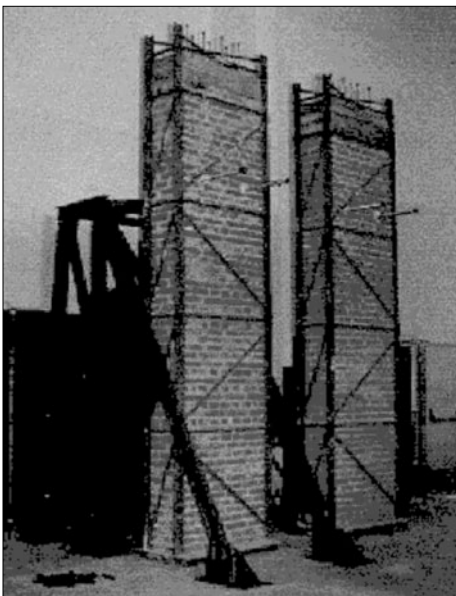


Fig. 9 - Murs en maçonnerie montés sur table vibrante et reliés à des cadres rigides (d'après [3]).

Fig. 9 - Masonry walls placed on shaking table and connected to stiff steel frames (from [3]).



Fig. 10 - Connexions en alliage à mémoire de forme posées entre le tympan et le toit de la Basilique (d'après [3]).

Fig. 10 - Shape memory alloy devices connecting the Basilical tympanum and the roof (from [3]).

l'horloge de l'église S. Giorgio in Trigano à S. Martino in Rio dans la province d'Emilie Romagne [4]. Dans ce cas, des composants en alliage à mémoire de forme (60 fils de 1 mm de diamètre d'une longueur de 300 mm) ont été montés en série avec

quatre barres précontraintes en acier classique montés aux quatre coins de la tour. Dans ce cas, l'objectif est de maintenir la force appliquée à la maçonnerie de la tour en dessous d'une certaine valeur.

Conclusion

La propriété de superélasticité (ou pseudoélasticité) des alliages à mémoire de forme, conséquence d'une transformation martensitique réversible, est utilisée dans cette application pour protéger des monuments historiques et donc conserver "la mémoire du passé".

Le projet ISTECH financé par la communauté européenne a su montrer par des analyses numériques et des essais sur des structures complètes (murs en maçonnerie montés sur table vibrante et reliés à un cadre en acier rigide par des connexions en acier classique ou des connexions en alliage à mémoire de forme) la faisabilité et l'amélioration apportée en cas de tremblement de terre par des connexions en alliage à mémoire de forme entre différentes parties d'un monument historique.

L'utilisation la plus médiatisée des alliages à mémoire de forme dans la restauration des monuments historiques est celle de la Basilique Saint François d'Assise à Pérouse, mais cette utilisation a également été mise en œuvre auparavant (consolidation après restauration de la tour de l'horloge de l'église S. Giorgio à S. Martino), et il est à souhaiter que cette utilisation des alliages à mémoire de forme fasse école pour des constructions (neuves et anciennes) soumises à un risque sismique potentiel. □

Remerciements : Des remerciements sont à adresser à la société Framatome ANP pour la permission de publier des résultats internes (à Framatome) et la collaboration apportée à cette publication, et plus particulièrement à Yves MEYZAUD pour l'intérêt technique qu'il a montré et les discussions qui en ont résulté.

RÉFÉRENCES

- [1] CROCI G., BONCI A., VISKOVIC A., *Use of shape memory alloys devices in the Basilica of St Francis of Assisi – ISTECH Project, Final Workshop Shape Memory Alloy Devices for Seismic Protection of Cultural Heritage Structures*, JRC/EC, Ispra, Italie, 23 juin 2000.
- [2] CASTELLANO G., "Seismic protection of cultural heritage using shape memory alloy devices –an EC funded project (ISTECH)–" *Proc. of the Int. Post-SMIRT Conf. Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*, Cheju, Korea, 23-25 août 1999
- [3] PATOOR E., BERVEILLER M., *Technologie des alliages à mémoire de forme : comportement mécanique et mise en œuvre*, Ed. Hermès, Paris, juin 1994.
- [4] GUÉNIN G., "Alliages à mémoire de forme", *Techniques de l'ingénieur*, Traité "Matériaux Métalliques" M 50.
- [5] PERKINS J., "Shape behaviour and thermoelastic martensitic transformations", *Mat. Sc. And Eng.* **51**, 1981,181-192.
- [6] LEXCELLENT C., MOYNE S., ISHIDA A., MIYAZAKI S., "Deformation behaviour associated with the stress-induced martensitic transformation in Ti-Ni thin films and their thermodynamical modelling", *Thin Solid Films* **324**, 1998, 184-189